



Cercetări privind procesele de frecare și de uzare în tribosisteme de alunecare cu suport de sticlă

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Autor,

Ing. Bogdan CHIRIAC

Conducător de doctorat,

Prof. Em. Univ. Dr. Ing. Dumitru OLARU

Iași, 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de **11.09.2024** la ora 8:30 în **Sala de conferințe Cezar Oprișan (M3)**, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

"CERCETĂRI PRIVIND PROCESELE DE FRECARĂ ȘI DE UZARE ÎN TRIBOSISTEMELE DE ALUNECARE CU SUPORT DE STICLĂ"

elaborate de domnul **ING. CHIRIAC BOGDAN** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Conf. univ. dr. ing. Ianus Gelu

Decan, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi Iasi

președinte

2. Prof. em. univ. dr. ing. Olaru Dumitru

Profesor, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi Iasi

conducător de doctorat

3. Prof. univ. dr. hab. ing. Viorel Paleu

Prodecan, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi Iasi

referent oficial

4. Prof. em. dr. ing. Tudor Andrei

Profesor, Universitatea Politehnica din București

referent oficial

5. Prof. univ. dr. ing. Ilie Musca,

Decan, Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava

referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.



RECTOR,

.....

Secretar universitate,

.....

*pentru susținerile online se va preciza link-ul și soluția de software

Cuvânt înainte

Sticla este, probabil, unul dintre cele mai versatile materiale, având proprietăți mecanice excelente și utilizări diverse în domeniul ingineriei. Unul dintre aspectele remarcabile ale sticlei este capacitatea sa de a fi reciclată la nesfârșit fără a-și pierde proprietățile inițiale. Datorită acestor caracteristici, sticla a fost aleasă ca subiect de analiză în domeniul tribologiei pentru a studia comportamentul ei în diverse tribosisteme de frecare și uzură.

Această lucrare prezintă un studiu detaliat al interacțiunii sticlei cu diferite materiale, cu un număr de peste 3500 de teste efectuate în laborator, de la studierea frecării cu materiale moi, la investigarea uzurii cauzate de particulele de argilă impregnate în lavete. În plus, procesele tranzitorii implicând suportul de sticlă au fost modelate folosind simulări avansate în programe de actualitate. Pe lângă acestea, au fost realizate calcule teoretice și s-au evidențiat diverse modele pentru a oferi o înțelegere completă a comportamentului sticlei în condiții de frecare și de uzare.

Doresc să exprim aprecierea mea profundă față de domnul profesor universitar emerit doctor inginer Dumitru Olaru, fără de care această cercetare nu ar fi fost posibilă. Pasiunea sa pentru acest domeniu a fost o sursă de inspirație și mi-a fost transmisă cu generozitate, contribuind semnificativ la dezvoltarea mea academică și profesională. De asemenea, mulțumesc și domnilor profesori din comisia de îndrumare a tezei, cât și domnilor profesori referenți oficiali ai acestei lucrări, pentru îndrumare, sugestii valoroase și sprijinul acordat pe parcursul realizării acestei lucrări.

În încheiere, doresc să mulțumesc familiei mele pentru sprijinul, răbdarea și înțelegerea acordate pe parcursul acestor ani de studiu. Fără susținerea lor constantă, realizarea acestei lucrări ar fi fost mult mai dificilă.

Cuprins

Introducere	6
CAPITOLUL 1 - STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN TRIBOSISTEMELE CU SUPPORT DE STICLĂ.....	8
1.1 Context	8
1.2 Stadiul actual al cercetărilor privind frecarea si uzarea pe suport de sticlă.	10
1.2.1 Originile frecării	10
1.2.2 Componenta de adeziune	11
1.2.3 Componenta mecanică	11
1.2.4 Coeficienți de frecare și determinarea acestora.....	12
1.2.5 Determinarea coeficientului de frecare static	13
1.2.6 Determinarea coeficientului de frecare cinetic.....	14
1.2.7 Fenomenul de stick-slip	14
1.3 Frecarea din sticlă și diferite materiale	15
1.3.1 Frecarea dintre sticlă și suprafețe textile	15
1.3.2 Frecarea dintre sticlă și suprafețe metalice	16
1.3.3 Frecarea dintre sticlă și pielea umană	17
1.3.4 Frecarea dintre sticlă și cauciuc	18
1.4 Uzarea materialelor	18
1.4.1 Uzarea dintre materiale moi și sticlă	18
1.4.2 Uzarea dintre materiale dure și sticlă	19
1.4.3 Uzarea dintre pulbere și sticlă	20
CAPITOLUL 2 – METODICA DE CERCETARE EXPERIMENTALĂ. APARATURĂ ȘI ECHIPAMENTELE UTILIZATE	21
2.1 Tribometrul CETR UMT2 și accesorii pentru studiul frecării și al uzării.	21
2.1.1 Accesorii și senzori utilizați.	22
2.1.2 Analiza Datelor	24
2.2 Profilometru pentru determinarea parametrilor de rugozitate și a urmelor de uzură	25
2.2.1 Unitatea de înălțime reglabilă	26
2.2.2 Parametri și definiții	26
2.3 Concluzii	26
CAPITOLUL 3 – DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FRECARA USCĂTĂ DE ALUNECARE PE STICLĂ A DIVERSELOR MATERIALE, CU DETERMINAREA COEFICIENȚILOR DE FRECARA STATICĂ ȘI CINETICĂ. ...	27

3.1 Frecarea dintre sticlă și materiale moi. Determinări ale coeficienților de frecare. Particularități în cazul vitezelor mici	27
3.1.1 Influența rigidității în cazul materialelor soft.....	28
3.1.2 Testări sticlă-lavetă	30
3.1.3 Testări sticlă – bumbac.....	32
3.1.4 Frecarea dintre sticlă și hârtie compozită (celuloză – polietilenă).	33
3.1.5 Testările sticlă-material stratificat din celuloză moale 15g/m ²	34
3.2 Particularități la frecarea dintre sticlă și deget.	35
3.2.1 Analiza testărilor efectuate.	36
3.2.2 Analiza coeficienților medii de frecare.	37
3.3 Frecarea dintre sticlă și materiale metalice. Coeficienți de frecare;	39
3.3.1 Materiale folosite.....	39
3.3.2 Particularități la frecarea dintre sticlă și aluminiu.....	39
3.3.3 Testări sticlă – bronz laminat	41
3.4 Concluzii.	42
CAPITOLUL 4 – MODELAREA PROCESELOR DE FRECARĂ USCATĂ LA VITEZE MICI.....	43
4.1 Simularea fenomenului de aderență la alunecarea pe sticlă.....	43
4.1.1 Modelarea variației coeficienților de frecare cu viteza de alunecare.	45
4.2.1 Analize ale coeficientului de frecare static	48
4.2.2 Analize ale coeficientului de frecare cinetică	49
4.3 Concluzii	53
CAPITOLUL 5 – DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FRECARA DINTRE CAUCIUC ȘI STICLĂ ÎN CONDIȚII USCATE ȘI ÎN PREZENTA UNOR FLUIDE.	54
5.1 Frecarea uscată a lamelor de cauciuc pe sticlă, pentru viteze și încărcări diferite;	54
5.2 Variația coeficientului de frecare	57
5.4 Concluzii.	58
CAPITOLUL 6 – DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND UZAREA STICLEI.	59
6.1 Uzarea sticlei de către materiale textile și fibre sintetice;	59
6.1.1 Uzarea sticlei de către materiale soft.....	59
6.1.2 Rezultate experimentale obținute pe lavetă din microfibră.....	59
6.1.3 Rezultate experimentale obținute cu hârtie:	63

6.1.4 Rezultate experimentale obținute la frecarea cu material stratificat.	63
6.2.1 Uzarea sticlei de către particule fine abrazive impregnate în materiale textile (sintetice)	63
6.2.2 Uzarea sticlei cu diferite pulberi (Eutalloy Tung Toc 10112, Nickel Chromium Alloy, ZrO ₂ CaO – Ceramic)	65
6.3 Concluzii	68
CAPITOLUL 7 – CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE.	70
7.1 Concluzii Finale	70
7.2 Concluzii privind uzarea sticlei	73
7.3 Contribuții Personale	75
7.4 Direcții Ulterioare de Cercetare	76
Bibliografie	77
LISTĂ LUCRĂRILOR PUBLICATE SAU ACCEPTATE PENTRU PUBLICARE	83

Introducere

Forța de frecare este forța opusă mișcării obiectelor care ating diferite suprafețe sau se ating unul de celălalt. Aceasta apare atunci când două suprafețe se mișcă una față de cealaltă sau se opun mișcării relative. Forța de frecare este o forță necesară pentru a efectua multe activități cotidiene, cum ar fi mersul pe jos sau conducerea unei mașini.

Frecarea este una dintre cele mai importante și universale fenomene fizice, care apare oriunde există atingere dintre două obiecte. Fără frecare, mașinile ar aluneca în afara drumurilor, iar picioarele noastre ar aluneca pe jos. Frecarea ne permite să ne ținem echilibrul și să efectuăm munca mecanică.

Tribologia se ocupă cu studiul frecării, uzurii și lubrifierii. Relațiile fundamentale care guvernează frecarea sunt adesea denumite „legile lui Amontons”, numite după omul de știință Guillaume Amontons din secolul al XVII-lea/XVIII [Gao et al., 2004]. Cu toate acestea, originea acestor teorii este anterioară lucrării lui Amontons, iar cea mai veche abordare teoretică despre frecare a fost atribuită lui Leonardo Da Vinci. Cele două componente fundamentale ale teoriei frecării macroscopice atribuite lui Da Vinci și mai târziu lui Amontons sunt:

1. Forța de frecare dintre două corpuri este independentă de aria (aparentă) de contact dintre aceste două corpuri;
2. Forța de frecare dintre două corpuri este proporțională cu forța normală dintre ele.

Coulomb a extins în continuare acest lucru, specificând că pentru frecarea de alunecare mărimea forței de frecare este independentă de viteza de alunecare. Coulomb a fost, de asemenea, primul care a propus unul dintre celelalte concepte fundamentale ale teoriei moderne a frecării. Mai exact, frecarea dintre materiale a fost determinată de interacțiunea caracteristicilor microscopice ale suprafeței cunoscute sub numele de asperități, fiind unul dintre contributorii la categoria largă de atribute ale suprafeței pe care oamenii le pot percepe ca rugozitate. Coulomb a emis ipoteza cum că „frecarea este o funcție a geometriei acestor asperități, cu un mecanism precum efectul împingerii unui obiect în sus pe un deal”.[Popova et al., 2020]

Tribologia se concentrează pe înțelegerea mecanismelor de frecare și uzură la nivelul interfețelor dintre două suprafețe care se ating și se mișcă una față de cealaltă. Prin intermediul tribologiei se înțelege cum se pot controla, reduce sau chiar elimina aceste forțe, îmbunătățind astfel performanța și durabilitatea sistemelor mecanice.

Conform teoriilor contemporane despre frecare, aria reală de contact dintre două suprafețe influențează forțele de aderență și de frecare. Într-un efort de a simula și prognoza mecanismele de aderență și de frecare, au fost create o serie de modele - de la contact elastic simplu, la contact plastic și, în cele din urmă, la combinarea componentelor adezive cu cele de deformare elastică sau plastică.

Potrivit lui Johnson [Johnson K. L., 1982], Heinrich Hertz, a făcut prima încercare de a cuantifica analitic aria de contact dintre două corpuri. Teoria Hertziană prezice că pentru contactele elastice, aria de contact ar crește proporțional cu solicitarea aplicată la puterea $2/3$, ignorând procesele adezive și folosind o aproximare sferică pentru formele asperității. Dar, după cum notează Persson, [Persson B. N., 2006] acest lucru este în contradicție cu un lot mare de dovezi experimentale care arată o relație mai apropiată de una liniară între sarcina aplicată și forța de frecare. Greenwood și Williamson au sugerat un model alternativ care seamănă mai mult cu suprafețele materialelor reale, tratând suprafața ca o multitudine de asperități sferice, folosind o distribuție Gaussiană a înălțimii. Deoarece aria de contact reală și frecarea au fost

aproape proporționale cu sarcina aplicată, studiul lui Greenwood și Williamson prezice un rezultat extrem de apropiat de legătura liniară dintre forța normală și forța de frecare indicată de teoria clasică a frecării [Persson , 2006].

În proporții diferite, în funcție de mărimea rugozităților, componenta de adeziune și cea de deformare mecanică a rugozităților sunt considerate astăzi ca fiind principalele cauze ale frecării de alunecare [Bushan, 2004]. În procesele de alunecare, ce fac obiectul prezentei teze, apar și mărimile ce caracterizează frecarea în raport cu sarcina de încărcare, adică coeficienții de frecare - statică (sau de aderență) și cinetică (sau dinamică), atunci când corpurile alunecă între ele.

În Cap. 1 este făcut un studiu bibliografic privind stadiul actual al cercetărilor axate pe frecarea și uzarea diverselor materiale în contact cu sticla. Capitolul al 2-lea este axat pe echipamentele și metodologiile de testare la frecare și la uzare a sticlei.

Studiul frecării diverselor materiale în contact cu sticla formează obiectul Capitolelor 3, 4 și 5. Sunt puse în evidență echipamentele, metodologiile de testare, rezultatele, simulări ale curbelor de frecare precum și modelări ale variației coeficienților de frecare statică cu timpul de staționare și a coeficienților de frecare cinetică cu viteza de alunecare.

Uzarea sticlei, dominantă de natură abrazivă, face obiectul Capitolului 6 și are la bază numeroase testări experimentale cu diverse materiale abrazive impregnate în țesături. Capitolul 7 cuprinde concluziile tezei, contribuțiile personale și noi direcții de cercetare.

CAPITOLUL 1 - STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN TRIBOSISTEMELE CU SUPORT DE STICLĂ

1.1. Context

Sticla are o istorie îndelungată de implicare în tehnologiile de fabricație, atât în rolul de componentă esențială, cât și ca factor care facilitează procesul de producție. De exemplu, producția pe scară largă de sticlă a modificat arhitectura europeană începând cu secolul al XIV-lea. Macfarlane și Martin au avansat chiar teoria conform căreia stăpânirea tehnologiei sticlei de către europenii de vest, în special în domeniul materialelor optice, a deschis calea pentru epoca descoperirilor în secolele al XV-lea și al XVI-lea și a condus în cele din urmă la globalizarea ulterioară a economiilor occidentale și influența culturală [Macfarlane et al., 2002].

Sticla este unică printre materiale prin faptul că poate fi folosită pentru a rezolva orice problemă tehnică datorită a două proprietăți importante. În primul rând, sticla poate fi fabricată cu ușurință într-o mare varietate de produse utile, de la segmente mari ale unei oglinzi telescopice primare cu diametrul de 100 m, până la fibre la scară nanometrică pentru dispozitive fotonice. În al doilea rând, proprietățile optice ale sticlei pot fi reglate pe game largi prin controlul atent al compoziției chimice, permițându-i astfel să fie adaptată pentru o multitudine de aplicații tehnice și științifice [Tong et al., 2008]. Sticla este, de asemenea, utilizată pentru a genera energie prin panourile solare, fotovoltaice și turbine eoliene, care profită în mare măsură de fibra de sticlă.

Obținerea sticlei se face după ce nisipul este topit și răcit. În urma acestui proces, structura sa se transformă astfel încât nu revine la starea anterioară de substanță argilooasă galbenă, ci devine un material solid și amorf.



Fig. 1.1 – Materiale de bază din compoziția sticlei (Muzeul sticlei antice. Zadar, Croația).

Caracteristicile care determină răspunsul termic includ porozitatea, capacitatea termică, densitatea și conductibilitatea termică a sistemului de sticlă/aer. Capacitatea perlelor de sticlă de a absorbi energia solară în perioadele de flux solar ridicat și apoi de a stoca și elibera acea energie treptat atunci când fluxul solar este redus este susținută de modelare și de date experimentale.

Se crede că hidrogenul este mai sigur și mai ecologic decât benzina sau combustibili fosili, dar provocările legate de depozitare și transport au împiedicat utilizarea acestuia. Microsferele goale din sticlă (HGMS) ar putea fi un nou vas eficient de transport și stocare pentru hidrogen. HGMS poate stoca hidrogen la presiuni de până la 100 MPa și sunt relativ rezistente la presiuni ridicate datorită dimensiunilor lor mici [Kohli et al., 2008].

Microsferele de sticlă sunt utilizate în stocarea hidrogenului ca material de depozitare a hidrogenului. Acestea sunt mici particule de sticlă cu diametre de câțiva microni care pot absorbi cantități mari de hidrogen prin procesul numit absorbție. Microsferele de sticlă sunt utilizate datorită capacității lor mari de stocare și posibilității de a fi utilizate la temperaturi și presiuni ridicate.

Aproape nici un alt material fabricat de om nu oferă atât de multe posibilități în multe industrii și discipline precum sticla:

- este preferată pentru ambalarea alimentelor și băuturilor;
- joacă un rol important în transport;
- este un element cheie în arhitectură și construcții;
- face parte din strategia privind energia regenerabilă;
- are multe aplicații farmaceutice, de sănătate și știință.

Sticla este o componentă cheie în laboratoarele de toate tipurile, dar în special în problemele chimice, deoarece, atunci când este fabricată, prezintă o stabilitate chimică mai mare decât o fac multe alte materiale. Acest material are proprietăți izotrope la nivel macroscopic și demonstrează un fenomen de relaxare structurală, rezultând un interval de tranziție distinctiv între stările sale.

Sticla este un material rigid format prin încălzirea unui amestec din materiale uscate până la o stare vâscoasă, după răcire rapidă a amestecului astfel încât să se prevină o structură cristalină obișnuită. Pe măsură ce sticla se răcește, atomii devin blocați într-o stare dezordonată ca un lichid înainte ca el să se formeze într-o stare perfect solidă, nefiind nici lichid, nici solid, dar împărțând calitățile ambelor.

Avantajele utilizării sticlei sunt:

- Transparența: sticla permite o bună vizibilitate, fiind utilizată în construcții, în industria automobilistică, în industria alimentară, etc.
- Rezistența: sticla este rezistentă la încărcături mecanice și termice, fiind utilizată în construcții, în industria alimentară, în industria chimică, etc.
- Durabilitate: sticla poate rezista foarte mulți ani fără să se deterioreze sau să se degradeze.

Dezavantajele utilizării sticlei sunt:

- Fragilitate: sticla este un material fragil care poate fi ușor spart sau zgâriat.
- Greutate: sticla este un material greu, ceea ce poate fi problematic în construcții sau în industria automobilistică.
- Cost: Sticla poate fi costisitoare în funcție de tipul de sticlă utilizat și de procesul de fabricație.
- Ecologic: Sticla poate fi o problemă ecologică dacă nu este reciclată sau dacă este aruncată în mediu.

1.2. Stadiul actual al cercetărilor privind frecarea și uzura pe suport de sticlă.

1.2.1 Originile frecării

După cum ne este cunoscut, studiul frecării își are originile începând cu sfârșitul perioadei Renașterii Italiene, în vremea în care Leonardo Da Vinci a avut un interes crescut în ceea ce ține de studiul frecării și al uzării materialelor.

Cu toate că termenul de „tribologie” a fost inventat cu aproximativ 450 de ani după moartea lui Leonardo da Vinci (1452–1519), este clar că acesta era pe deplin familiarizat cu conceptele tribologice de bază ale frecării. El a fost creditat pe scară largă cu primele investigații cantitative ale frecării și cu definirea celor două „legi” fundamentale ale frecării cu aproximativ două sute de ani înainte de a fi enunțate (în 1699) de Guillaume Amontons [Hutchings, 2016], cu al cărui nume sunt acum de obicei asociate. Aceste afirmații simple, care au o aplicabilitate largă, sunt:

- forța de frecare care acționează între două suprafețe alunecătoare este proporțională cu sarcina care apasă suprafețele împreună (adică forțele au un raport constant, adesea numit coeficient de frecare);
- forța de frecare este independentă de aria aparentă de contact dintre cele două suprafețe.

Anumite desene din caietele lui Leonardo au devenit iconice pentru tribologie și au fost reproduse pe scară largă. Aceste schițe au fost aduse pentru prima dată în atenția generală a comunității de către Dowson [Dowson, 1979] în studiul său despre istoria tribologiei.

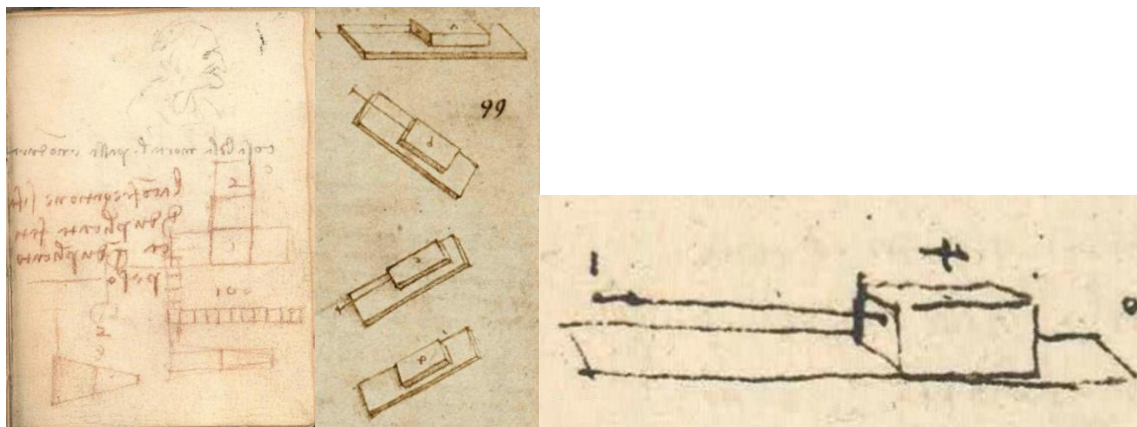


Fig. 1.2 – Schițe din caietul lui Leonardo Da Vinci [Ian M. Hutchings, 2016]

Leonardo da Vinci a explorat în profunzime fenomenul frecării în cadrul caietelor sale cu notițe, care acoperă un interval de aproximativ două decenii, începând din 1493 până în 1515. Lucrările sale sunt remarcabile pentru varietatea și profunzimea ideilor abordate, reflectând un proces de gândire rapid și o curiozitate intelectuală fascinantă [Dowson, 1977].

Studiile sale despre frecare au început cu observații fundamentale, cum ar fi relația dintre efortul necesar și greutatea aplicată în cazul suprafețelor care alunecă una peste alta. Leonardo a formulat ipoteze și a realizat experimente simple pentru a testa aceste teorii, folosindu-se de schițe și note explicative pentru a ilustra rezultatele.

Pe lângă cercetările sale asupra frecării în mișcările de alunecare, Leonardo a extins analiza sa și la mișcarea de rotație și la comportamentul roților și rulmenților. El a explorat

diverse configurații experimentale și a făcut observații detaliate privind comportamentul lor sub diferite condiții, incluzând și frecarea compusă.

Contribuția majoră în domeniul tribologiei a fost realizată în perioada în care Coulomb a efectuat experimente decisive pentru studiul frecării externe. Lucrarea sa "Theory of Simple Machines" din 1780 a reprezentat o bază solidă în teoria frecării, confirmând legea lui Amontons și evidențiind limitările acesteia.[Popova et al., 2020]

De-a lungul timpului, studiile lui Coulomb au fost extinse și continuate de alți cercetători, iar astăzi, formularea unor legi generalizate ale frecării rămâne un subiect de mare interes în tribologia modernă. Contribuțiile sale au pus bazele pentru cercetările viitoare în domeniul dinamic al frecării, influențând profund dezvoltarea teoretică și practică a acestui domeniu esențial în inginerie și știință.

1.2.2. Componenta de adeziune

Adeziunea are loc atunci când două suprafețe intră în contact, provocând o deformare elastică sau plastică a vârfurilor rugozităților lipind cele două suprafețe.

Pentru a explica contribuția adeziunii la frecare, este necesară descrierea adeziunii a două solide în contact static. Energia superficială liberă a unui solid este definită, din punct de vedere termodinamic, ca energia reversibilă necesară formării unei unități de arie a unei noi suprafețe. Similar, dacă două suprafețe sunt aduse în contact, energia liberă interfacială este definită, din punct de vedere termodinamic, ca energia reversibilă necesară formării unei unități de arie a interfeței [Johnson, 1982].

De exemplu, sticla de protecție pentru smartphone-uri nu mai utilizează adesea adezivi. Aceasta se atașează direct de ecranul curățat perfect al telefonului, fără a apărea imperfecțiuni la interfață, cu excepția cazurilor în care sticla de protecție se poate sparge.

Aceste informații evidențiază că adeziunea fără adeziv poate fi realizată în anumite condiții specifice, cum ar fi folosirea suprafețelor curățate și pregătite corespunzător, care permit un contact intim și uniform între materiale, asigurând o legătură mecanică puternică [Léo Bricotte et al., 2024].

1.2.3. Componenta mecanică

Deformarea reprezintă o parte importantă a tribologiei, influențând modul în care materialele răspund la forțele mecanice și afectează comportamentele de frecare și de uzură în cadrul zonelor de contact.

Una dintre formele primare de deformare întâlnite este deformarea elastică, în care materialele suferă modificări temporare de formă sau dimensiune atunci când sunt supuse la tensiuni. Acest tip de deformare este reversibil, adică materialul revine la starea inițială odată ce solicitarea este îndepărtată. Deformarea elastică are o importanță deosebită în mecanica contactului inițial și poate dicta magnitudinea forțelor transmise pe suprafețe în timpul interacțiunilor de alunecare sau de rostogolire.

În schimb, deformarea plastică implică modificări permanente ale formei sau dimensiunii dincolo de limita elastică a materialului. Apare atunci când tensiunile depășesc limita de curgere a materialului, determinând rearanjarea atomilor sau moleculelor și ducând la deformare ireversibilă. În tribologie, deformarea plastică este critică, deoarece contribuie la mecanismele de uzură provocând îndepărtarea materialului, schimbarea suprafeței și

modificări ale topografiei suprafeței în timp. Înțelegerea condițiilor în care are loc deformarea plastică este esențială pentru prezicerea durabilității și fiabilității materialelor în contactele de alunecare.

1.2.4 Coeficienți de frecare și determinarea acestora

Coeficientul de frecare reprezintă o măsură adimensională ce descrie rezistența la mișcare dintre două suprafețe aflate în contact. Acesta este deosebit de important în diferite aplicații ingineresti și fizice și influențează considerabil atât performanța, cât și durabilitatea sistemelor mecanice.

Coeficientul de frecare poate fi clasificat în două categorii fundamentale: coeficientul de frecare static (μ_s) și coeficientul de frecare cinetic (μ_k). Coeficientul de frecare static face ca să fie necesară o forță tangențială externă pentru a produce o mișcare relativă între două suprafețe. Pe de altă parte, coeficientul de frecare cinetic face referire la o forță necesară pentru a păstra mișcarea de alunecare respectivă. [Rahul Rathee, 2023]

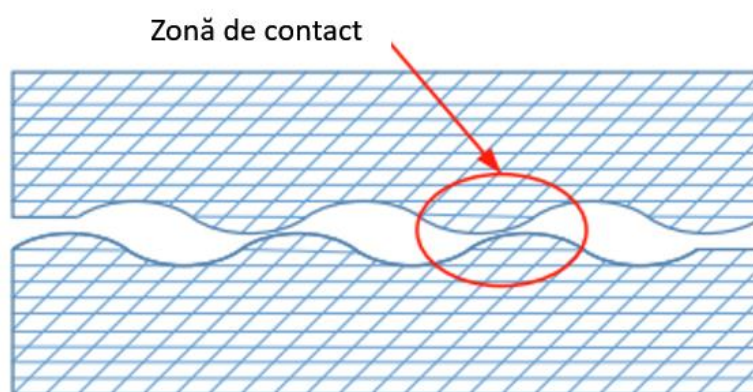


Fig. 1.3 – Zona de contact dintre două suprafețe [Rahul Rathee, 2023]

Coeficienții de frecare sunt influențați de multiple variabile, inclusiv materialele suprafețelor în contact, rugozitatea acestora, temperatura, și prezența lubrifianților. Materialele dure, cum ar fi oțelul, au de obicei coeficienți de frecare mai mici comparativ cu materialele moi, cum ar fi cauciucul, datorită interacțiunilor la nivelul asperităților. Lubrifianții reduc coeficientul de frecare prin crearea unui film fluid care separă suprafețele și minimizează contactul direct.

Determinarea coeficientului de frecare reprezintă un aspect fundamental al tribologiei, esențial pentru înțelegerea interacțiunii dintre suprafețele de contact în mișcare relativă. Coeficientul de frecare (μ) este o valoare adimensională care reprezintă raportul dintre forța de frecare (F) la sarcina normală (N) aplicată pe suprafețele în contact. Acest parametru este esențial în prezicerea uzurii, a pierderilor de energie și a eficienței generale a unui sistem.

Determinarea experimentală a coeficientului de frecare implică adesea tribometre, dispozitive concepute pentru a măsura forțele implicate în timpul alunecării suprafețelor. Tribometrele obișnuite au la bază teste “pin-on-disc” (pin-pe-disc), “ball-on-disc” (bilă-pe-disc). Într-o configurație tipică pin-pe-disc, un știft staționar sau o bilă este apăsată pe un disc rotativ sub o sarcină controlată [Eduardo Goti et. al, 2020] [Olawale et al., 2021] [Bjorn et al., 2021].

Unul dintre factorii ce influențează coeficientul de frecare este rugozitatea. Rugozitatea suprafeței influențează zona reală a interacțiunilor de contact și afectează forța de frecare [Jia Li et al., 2015]. Duritatea materialului determină gradul de deformare și uzură în timpul contactului. Temperaturile ridicate pot modifica proprietățile materialului și eficacitatea lubrifierii, modificând astfel comportamentul la frecare. Lubrifianții, prin formarea unei pelicule între suprafețele de contact, pot reduce semnificativ frecarea și uzura, tranzitionând sistemul de la regimurile limită la regimurile mixte [Amiri et al., 2010].

1.2.5. Determinarea coeficientului de frecare static

Coeficientul de frecare static este o mărime adimensională care reprezintă raportul dintre forța maximă de frecare statică dintre două suprafețe și forța normală care le presează împreună. Acest coeficient este esențial în înțelegerea și prezicerea rezistenței inițiale la mișcare atunci când două suprafețe sunt în repaus una față de cealaltă.

Determinarea experimentală a coeficientului de frecare static implică de obicei creșterea treptată a forței tangențiale aplicate asupra unui obiect până când începe să se miște. Această forță este măsurată folosind instrumente precise, cum ar fi senzorii de forță sau celulele de sarcină. O configurație experimentală simplă include plasarea obiectului de testare pe un plan înclinat și creșterea treptată a unghiului până când obiectul începe să alunece. Coeficientul de frecare static poate fi apoi calculat folosind unghiul critic la care începe mișcarea, deoarece se corelează direct cu forța maximă de frecare statică care depășește componenta gravitațională paralelă cu suprafața înclinată.

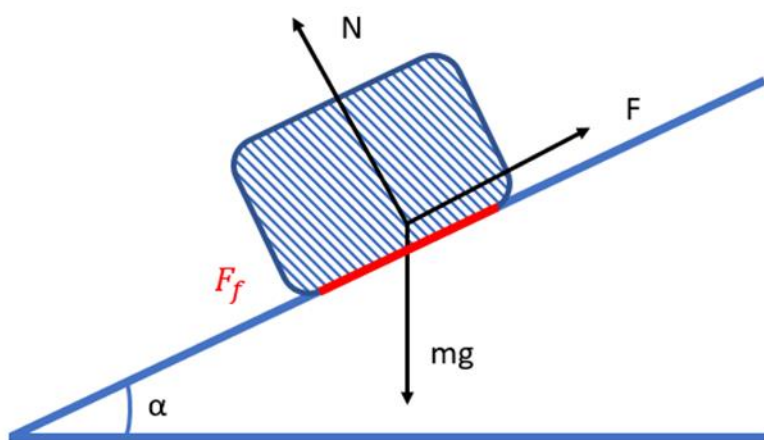


Fig. 1.4 – Metoda experimentală simplă de determinarea a coeficientului de frecare static

Determinarea teoretică a coeficientului de frecare static are la bază înțelegerea interacțiunilor microscopice la suprafețele de contact. Aceste interacțiuni sunt influențate de proprietățile de aderență ale materialului, rugozitatea suprafeței și prezența contaminanților sau lubrifianților. Modelele avansate iau în considerare asperitățile (punctele de contact microscopice) și deformarea lor sub sarcină. Abordările teoretice pot utiliza principii din mecanica contactului și știința materialelor pentru a prezice coeficientul de frecare statică, încorporând factori precum modulul elastic, energia suprafeței și caracteristicile de deformare plastică.

1.2.6. Determinarea coeficientului de frecare cinetic

Forța de frecarea cinetică, cunoscută și sub numele de frecare prin alunecare, este forța rezistivă care se opune mișcării relative dintre două suprafețe în contact atunci când acestea alunecă una pe lângă cealaltă. Coeficientul cinetic de frecare (μ_k) este un parametru adimensional care caracterizează această forță și depinde de natura materialelor în contact, de rugozitatea suprafeței lor și de prezența lubrifianților sau a contaminanților. Bineînțeles, înțelegerea și determinarea coeficientului cinetic de frecare are o importanță majoră în diferite aplicații ingineresti, inclusiv proiectarea sistemelor mecanice, studiul uzurii materialelor și optimizarea proceselor de fabricație, ca și în cazul coeficientului de frecare static.

Determinarea experimentală a coeficientului de frecare cinetic implică măsurarea forței de frecare și a forței normale care acționează între două suprafețe de alunecare, fiind utilizate mai multe metode pentru definirea valorilor corespunzătoare acestora (de regulă se utilizează metoda pin-on-disc).

Aceste modele subliniază faptul că zona reală de contact, care este mult mai mică decât zona aparentă, afectează în mod semnificativ forța de frecare. Teoriile deformării iau în considerare deformarea elastică și plastică a asperităților de suprafață, reprezentând disiparea energiei care apare în timpul alunecării. Această dublă considerație a aderenței și deformării oferă un cadru teoretic mai cuprinzător pentru înțelegerea frecării cinetice.

Atât metodele experimentale, cât și cele teoretice contribuie la determinarea și înțelegerea exactă a acestui coeficient. Pe măsură ce cercetarea progresează, tehnicile și modelele avansate continuă să sporească capacitatea noastră de a prezice și controla comportamentul de frecare în diferite contexte industriale și științifice. Coeficientul de frecare cinetic este de obicei mai mic decât coeficientul de frecare static pentru aceleași materiale.

1.2.7 Fenomenul de stick-slip

Fenomenul stick-slip este un tip de mișcare de alunecare care se caracterizează prin adeziuni și alunecări intermitente între cele două suprafețe de contact. Acest comportament este observat în mod obișnuit în diferite sisteme mecanice și este un factor critic în studiul tribologiei. Fenomenul este determinat de interacțiunea dintre frecarea statică, care trebuie depășită pentru a iniția mișcarea relativă, și frecarea cinetică, care guvernează mișcarea odată ce apare alunecarea. Mișcarea de stick-slip este adesea descrisă în termenii unui proces ciclic în care suprafețele se lipesc inițial împreună din cauza frecării statice, ceea ce duce la o acumulare de energie elastică. Odată ce forța aplicată depășește pragul de frecare statică, suprafețele alunecă brusc, eliberând energia stocată și provocând o mișcare relativă rapidă. Această fază de alunecare este urmată de o altă fază de lipire, repetându-se astfel ciclul.

Matematic, fenomenul stick-slip poate fi modelat folosind ecuații diferențiale care descriu dinamica sistemului. O abordare comună este utilizarea unui model masă cu arcuri. Suprafața plană se deplasează cu o viteză constantă, Forța tangențială dezvoltată între greutate și suprafața plană prezintă variații ca în Fig.1.5. Ecuațiile de guvernare încorporează atât coeficienții de frecare statică și cinetică, cât și sarcina normală, care influențează forțele de frecare. Mișcarea masei este descrisă de a doua lege a lui Newton, forța de frecare fiind o funcție neliniară a vitezei relative. Soluțiile analitice ale acestor ecuații pot oferi informații despre condițiile în care se produce stick-slip, precum și amplitudinea și frecvența oscilațiilor. [Wu-Wen et al., 2023]

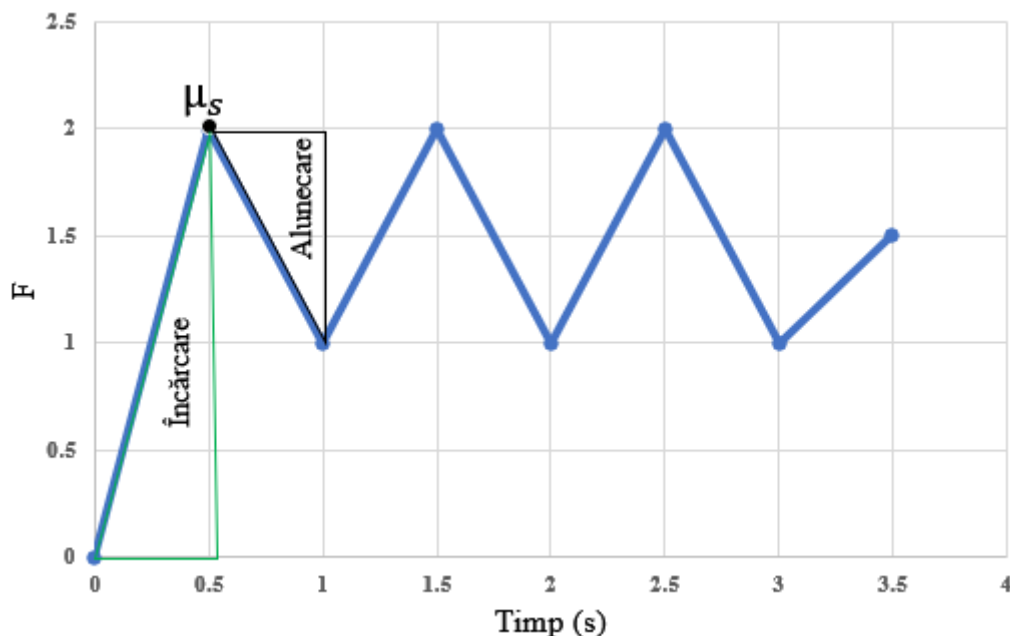


Fig. 1.5 – Exemplificare grafică a fenomenului de stick-slip

Din punct de vedere ingineresc, comportamentul de stick-slip poate avea implicații semnificative pentru proiectarea și funcționarea sistemelor mecanice. În mașinile de precizie, cum ar fi mașinile CNC și actuatorii robotizate, fenomenul de stick-slip poate duce la erori de poziționare și poate reduce precizia generală a sistemului. În contextul activității seismice, mecanismul stick-slip este fundamental pentru înțelegerea dinamicii cutremurelor, unde plăcile tectonice ale pământului prezintă un comportament intermitent similar de lipire și alunecare de-a lungul liniilor de falie. Atenuarea efectelor de stick-slip implică adesea tratamente de suprafață, lubrifiere sau proiectarea unor mecanisme conforme care pot absorbi și disipa energia, reducând astfel amplitudinea oscilațiilor. Studiile experimentale ale fenomenului de stick-slip sunt efectuate folosind tribometre și alte echipamente specializate pentru a măsura forțele de frecare și deplasările de suprafață. [Awrejcewicz et al., 2005]

În cele din urmă, mișcarea de stick-slip este semnificativă și în tehnologiile de imprimare cu jet de cerneală, unde capul de imprimare și mecanismele de alimentare cu hârtie sunt afectate. Pe măsură ce capul de imprimare se deplasează pe hârtie, forțele de frecare provoacă lipirea și alunecarea intermitentă, afectând calitatea imprimării. Studiile detaliate care utilizează senzori de mișcare și teste de frecare ajută la proiectarea sistemelor de control al mișcării mai fluide, îmbunătățind precizia și calitatea mecanismelor de imprimare.

1.3. Frecarea din sticlă și diferite materiale

1.3.1. Frecarea dintre sticlă și suprafețe textile

Frecarea dintre sticlă și materialele textile este influențată de mai mulți factori specifici, inclusiv de structura materialului fibros și tratamentele de suprafață aplicate atât sticlei, cât și materialului. Structura de țesătură a materialului textil, cum ar fi țesăturile simple sau satinat, afectează zona de contact și forța de frecare la alunecarea pe sticlă.

Într-unul din studiile de actualitate [Mahmoud, 2016] au fost efectuate experimente pentru a determina coeficienții de frecare ai interacțiunilor dintre materialele textile utilizate în confecționarea mănușilor și foi de sticlă. După cum bine știm, în domeniile de specialitate,

pentru siguranță, sticla este manevrată prin utilizarea mănușilor de protecție, așadar, un studiu în această direcție oferă concluzii legate de calitatea materialelor utilizate și de efectele pe care le are frecarea dintre cele două materiale.

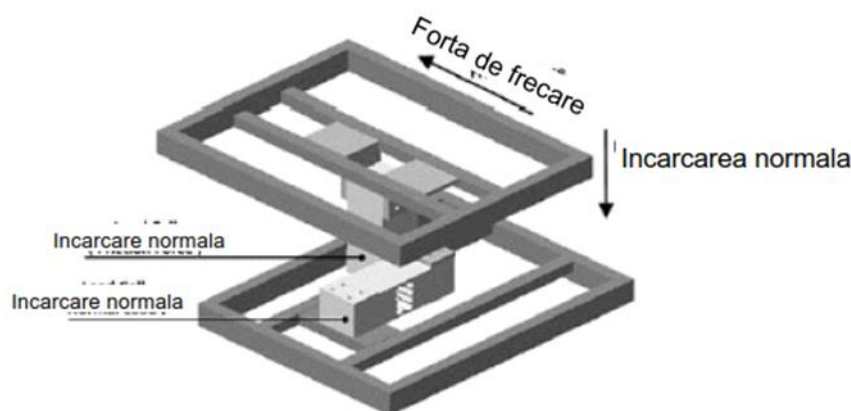


Fig. 1.6 – Echipament experimental utilizat pentru determinarea coeficienților de frecare [Mahmoud, 2016]

În realizarea experimentului a fost utilizat echipamentul din Fig.1.6 și șapte tipuri de materiale textile, ale căror valori ale coeficienților de frecare pot fi observate în graficul din Fig. 1.7.

Concluziile unui astfel de studiu au condus la soluții de optimizare a măsurilor de protecție în manevrarea sticlei.

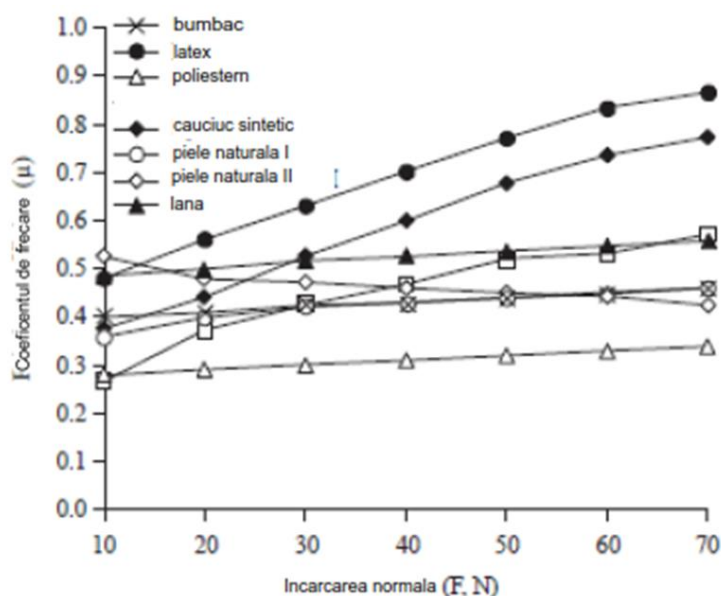


Fig. 1.7 – Graficul coeficienților de frecare obținuți pentru frecare dintre sticlă și diferite materiale moi și piele [Mahmoud, 2016]

1.3.2. Frecarea dintre sticlă și suprafețe metalice

Frecarea dintre sticlă și materialele metalice este un domeniu important de studiu, mai ales în contextul proceselor de fabricație, al dispozitivelor optice și al componentelor electronice. Sticla, caracterizată de obicei printr-o suprafață netedă și fragilă, interacționează cu metalele care au adesea o duritate mai mare și suprafețe potențial mai aspre. Această

diferență în proprietățile materialului duce la comportamente tribologice unice, în care metalul poate să alunece lin peste sticlă, sau poate provoca uzură și zgârieturi semnificative, în funcție de tratamentul suprafeței și de condițiile de contact.

Într-un studiu realizat de NASA au fost evaluați coeficienții de frecare rezultați din interacțiunea dintre sticlă și diferite metale, atât în aer, cât și în vid. Atunci când metalele alunecă sau se freacă de sticlă în aer la presiunea atmosferică cu umiditate prezentă, metalele tind să se transfere pe sticlă, rezultând coeficienți de frecare variind de obicei de la 0.5 la 0.7. În schimb, în vid, sticla realizează cu metalul un coeficient de frecare de aproximativ 0.5. În ciuda coeficienților de frecare similari în ambele condiții, mecanismele de transfer diferă din cauza proprietăților de rupere ale sticlei, care sunt influențate semnificativ de apă. Apa împiedică fracturarea sticlei, demonstrând efectul Joffe într-un solid amorf. Caracteristicile de transfer observate indică faptul că sticla are o rezistență la rupere mai mică în absența vaporilor de apă în comparație cu prezența sa.[Donald et al., 1973]

Așadar, frecarea dintre sticlă și materialele metalice este o interacțiune complexă ce depinde de rugozitățile suprafeței, a compoziției chimice, a condițiilor de mediu și a tratamentelor de suprafață aplicate. Progresele atât în tehnicile experimentale, cât și în modelarea computațională continuă să îmbunătățească înțelegerea acestor interacțiuni, permițând dezvoltarea unor sisteme mai durabile și mai eficiente în diverse industrii de înaltă tehnologie.

1.3.3. Frecarea dintre sticlă și pielea umană

Frecarea dintre sticlă și pielea umană este un fenomen complex care joacă un rol important în designul și capacitatea de utilizare a numeroase dispozitive de consum, în special ecranele tactile și dispozitivele portabile din sticlă. Interacțiunea este influențată de diverși factori, inclusiv rugozitatea suprafeței sticlei, anatomia pielii, condițiile de mediu, (umiditate, prezența unor produse cu rol de lubrifiant) și sarcina aplicată, fiecare contribuind în mod diferit la comportamentul tribologic general.[Subhi et al., 2019]

Nivelurile mai ridicate de umiditate cresc hidratarea pielii, ceea ce duce la o aderență crescută și la o frecare mai mare datorită forțelor capilare de la interfață. Dimpotrivă, umiditatea scăzută poate usca pielea, reducând frecarea și poate provoca disconfort sau alunecare.

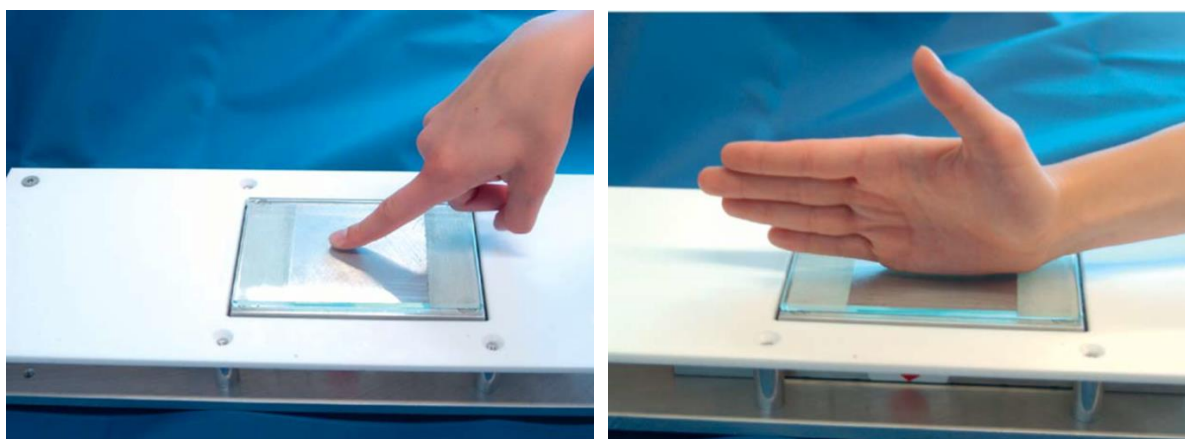


Fig. 1.8 – Mișcări de împingere și tragere a pielii pe sticlă, cu diferite zone ale mâinii [Derler S. et al, 2009]

Schimbările de temperatură pot modifica proprietățile vâscoelastice ale pielii, influențând și mai mult comportamentul de frecare a acesteia. Acești factori evidențiază

importanța proiectării dispozitivelor care funcționează constant în diverse condiții de mediu. Sarcina normală aplicată în timpul interacțiunii și viteza de alunecare sunt parametri critici în determinarea forțelor de frecare. Sarcinile normale crescute îmbunătățesc zona de contact dintre piele și sticlă, ceea ce duce la o frecare mai mare.[Zhonghuan X., et. al, 2024] Cu toate acestea, există un prag dincolo de care încărcarea suplimentară poate provoca disconfort sau deteriorarea pielii. Viteza de alunecare joacă, de asemenea, un rol important asupra frecării, mai exact, vitezele mai mari pot reduce frecarea datorită răspunsului vâscoelastic al pielii, în timp ce viteze mai mici permit mai mult timp pentru dezvoltarea interacțiunilor adezive, crescând frecarea. Studiile experimentale folosesc adesea teste tribologice controlate pentru a măsura aceste efecte, oferind date esențiale pentru optimizarea performanței dispozitivului. [Carlescu V., et. al, 2020]

1.3.4. Frecarea dintre sticlă și cauciuc

Interacțiunea dintre sticlă și cauciuc este un domeniu critic de studiu în diverse industrii, inclusiv auto și electronică. În acest caz, frecare este caracterizată de caracteristicile fizice distincte ale sticlei și cauciucului.

Sticla este un material dur, fragil, cu un coeficient de frecare scăzut, în timp ce cauciucul este moale, elastic și are un coeficient de frecare ridicat. Acest contrast duce la o interacțiune complexă în care elasticitatea cauciucului îi permite să se conformeze suprafeței netede și rigide a sticlei. Această conformitate mărește suprafața reală de contact, influențând semnificativ forțele de frecare. Adeziunea intrinsecă a cauciucului contribuie, de asemenea, la o frecare mai mare datorită forțelor de adeziune la nivelul interfeței.

Mecanica contactului dintre sticlă și cauciuc implică atât deformarea elastică a cauciucului, cât și deformarea potențială la scară micro a suprafeței sticlei. Când o suprafață de cauciuc alunecă peste sticlă, deformarea nu este pur elastică, iar efectele vâscoelastice pot juca, de asemenea, un rol, în special la viteze de alunecare și sarcini diferite.[Rapoport et al., 2005] Zona reală de contact este astfel influențată de proprietățile vâscoelastice ale cauciucului, care se pot modifica în diferite condiții de încărcare. Teoria JKR (Johnson-Kendall-Roberts) este adesea aplicată pentru a descrie aderența și deformarea la interfață, oferind un cadru pentru înțelegerea distribuției presiunilor și a zonelor de contact.

Frecarea dintre sticlă și cauciuc este importantă în aplicații precum ștergătoarele de parbriz auto, unde este necesară frecarea constantă pentru o curățare eficientă fără a deteriora sticla. În producție, benzile transportoare din cauciuc care interacționează cu produsele din sticlă au nevoie de frecare optimizată pentru a preveni alunecarea, minimizând uzura. În electronică, garniturile din cauciuc trebuie să mențină o frecare adecvată pentru a asigura etanșarea ideală cu suprafețelor de sticlă fără uzură excesivă.

1.4. Uzarea materialelor

1.4.1. Uzarea dintre materiale moi și sticlă

Uzura dintre sticlă și materialele moi este o preocupare esențială în diverse aplicații, de la electronice de larg consum până la dispozitive medicale. Interacțiunea dintre un material dur, fragil, precum sticla și materiale mai moi poate să producă forme diverse de uzură a sticlei.

Un prim caz de uzură a sticlei, des întâlnit, este datorat particulelor dure ce pot fi antrenate în procesele de alunecare dintre un material moale și suprafața sticlei (lavetă, bumbac, șervețele).

Există și alte forme de uzare a sticlei produsă de materiale polimerice. Astfel, studiile recente au oferit perspective detaliate asupra mecanismelor de uzură și a strategiilor de atenuare a contactelor dintre materiale moi și sticlă. De exemplu, unul dintre studii [Toshiaki et al., 2022] a explorat caracteristicile de uzură ale cauciucului siliconic în contact cu sticla la diferite niveluri de umiditate. Cercetătorii au concluzionat faptul că umiditatea crescută a redus uzura abrazivă, dar a crescut uzura adezivă datorită aderenței îmbunătățite mediată de apă la interfață.

Un alt studiu [Li et al., 2022] s-a concentrat pe comportamentul la uzură al acoperirilor de poliuretan pe substraturi de sticlă utilizate în dispozitivele cu ecran tactil. Experimentele au demonstrat că rugozitatea suprafeței sticlei a influențat în mod semnificativ rata de uzură a stratului de poliuretan, suprafețele de sticlă mai netede ducând la rate mai mici de uzură. Studiul a evidențiat importanța optimizării tratamentelor de suprafață a sticlei pentru a prelungi durata de viață a interfețelor din sticlă acoperită cu polimer.

1.4.2. Uzarea dintre materiale dure și sticlă

Interacțiunile de uzură dintre sticlă și materiale dure, cum ar fi metalele și ceramică, sunt critice în diferite aplicații industriale în care componentele din sticlă sunt supuse alunecării sau contactului cu acestea. Mecanisme primare de uzură în aceste interfețe sunt uzura abrazivă, uzura adezivă și oboseala suprafeței. Uzura abrazivă apare atunci când particule mai dure sau asperități de pe materialul dur pătrund pe suprafața sticlei, ducând la îndepărtarea materialului prin acțiuni de zgâriere a suprafeței de sticlă. [Mens et al., 1991] Acest tip de uzură este amplificat de finisaje rugoase ale suprafețelor și presiuni mari de contact.



Fig. 1.9 – Mașină cu placă de lepuit [Suratwala , 2015]

Totodată, un proces tehnologic bine cunoscut, numit lepuire abrazivă, se confruntă cu uzura dintre sticlă și diferite materiale utilizate în cadrul acțiunilor prevăzute de acesta. Lepuirea abrazivă este utilizată pentru a îndepărta suficientă sticlă pentru a elimina fracturile mai adânci cauzate de generare și pentru a produce suprafețe mai sferice prin acțiunea a două corpuri rigide ce se șlefuiesc reciproc. Materialul abraziv, în mod obișnuit cu diametre între 30 și 5 μm , în funcție de stadiul de lepuire, îndepărtează în locurile înalte pe ambele părți și pe sticlă, până când ambele suprafețe sunt sferice la mai puțin de 0,1 μm și diferă în rază de câțiva micrometri față de cele două suprafețe. Cea mai mare parte a procesului de lepuire se face cu peleți împregnați cu diamant, realizate dintr-o matrice de rășină care au raza corectă de lepuire. Această bandă abrazivă legată cu peleți este rapidă, mai puțin dezorganizată și oferă suprafețe

cu o consistență dimensională mai mare și un finisaj uniform. [Suresha B., et. al 2006] Odată ce procesul de lepuire a îndepărtat toate urmele cauzate de generare, piesa de prelucrat este gata pentru lustruire.

1.4.3. Uzura dintre pulbere și sticlă

Uzura dintre sticlă și particule este o preocupare critică în numeroase aplicații industriale și tehnologice, în care particulele pot interacționa cu suprafețele din sticlă, ceea ce duce la o degradare semnificativă în timp. Această interacțiune este guvernată în principal de mecanisme de uzură abrazivă, în care particulele încorporate într-o suprafață în mișcare sau suspendate într-un mediu fluid devin abrazive față de suprafața sticlei prin contacte repetate. Severitatea uzurii este influențată de mai mulți factori, inclusiv duritatea particulelor, dimensiunea, forma și concentrația. Particulele mai dure, cum ar fi carbura de siliciu sau alumina, tind să pătrundă mai ușor pe suprafața sticlei, rezultând acțiuni de micro-tăiere și zgâriere, care îndepărtează materialul din sticlă. Mărimea și forma particulelor joacă, de asemenea, roluri importante. Particulele mai mari și mai unghiulare cauzează de obicei o uzură mai severă în comparație cu particulele mai mici, rotunjite, datorită eficienței crescute de tăiere și datorită solicitărilor localizate mai mari. În plus, concentrația de particule în mediul care interacționează afectează rata de uzură, concentrațiile mai mari conducând la o abraziune crescută și la îndepărtarea materialului. [Zhao et al., 2021]

Prezența umidității poate intensifica și mai mult uzura prin promovarea interacțiunilor chimice dintre particule și suprafața sticlei, ducând la degradarea combinată mecanică și chimică. Strategiile de atenuare a uzurii sticlei induse de particule includ îmbunătățirea durității suprafeței prin tratamente precum schimbul de ioni sau depunerea chimică de vapori, aplicarea de acoperiri de protecție pentru a crea o barieră între sticlă și particulele abrazive și optimizarea mediului operațional pentru a minimiza contaminarea cu particule.

CAPITOLUL 2 – METODICA DE CERCETARE EXPERIMENTALĂ. APARATURĂ ȘI ECHIPAMENTELE UTILIZATE

Obiectivul general al tezei este de a studia comportamentul sticlei (Siliciu) la frecare precum și la uzare în diferite tribosisteme de alunecare.

Pentru a atinge scopul dorit, au fost necesare o serie de etape:

1. Stabilirea materialelor și a echipamentelor folosite;
2. Stabilirea procedurilor de testare;
3. Analiza datelor experimentale;
4. Elaborarea modelului matematic pentru validarea experimentelor;
5. Concluzii;

2.1. Tribometru CETR UMT2 și accesorii pentru studiul frecării și al uzării.

Pe Tribometru CETR UMT-2 din Laboratorul de Tribologie al Facultății de Mecanică am efectuat, pentru studiul frecării două tipuri de teste:

- Frecarea la viteze de alunecare mici cu evidențierea fenomenului de stick-slip, utilizând accesorii specifice și o anumită metoda de testare.
- Frecarea de alunecare prin metoda pin on disc, cu accesorii specifice și cu metoda de testare pin on disc.

Tribometru este utilizat pentru testarea diferitelor materiale precum a metalelor feroase și neferoase, materialelor plastice, ceramice, a materialelor compozite, hârtie, a diferitelor acoperiri, atât subțiri cât și groase, precum și a lubrifianților solizi sau a fluidelor precum uleiurile și unsoarele.

Tribometrul UMT-2, are capacitatea de a testa probe de diferite forme, de la cele mai simple până la cele mai complexe forme.

Tribometrul poate efectua măsurători de uzură cu o precizie de 50nm. ~~Azul de precizie~~ Masa rotativă are capacitatea de a roti proba inferioară într-un interval larg de viteze, de la 0.001 rotații pe minut (rpm) până la 5000 rpm. Senzorii pentru forțe tangențiale și normale prezintă o precizie excepțională și sunt capabili să efectueze măsurători concomitente ale sarcinii normale și tangențiale pe trei axe (OZ- forța axială, OX și OY pe direcțiile tangențiale.

Măsurătorile extrem de precise ale forțelor pot fi obținute cu trei tipuri de senzori (de la 10 μ N până la 20 N).

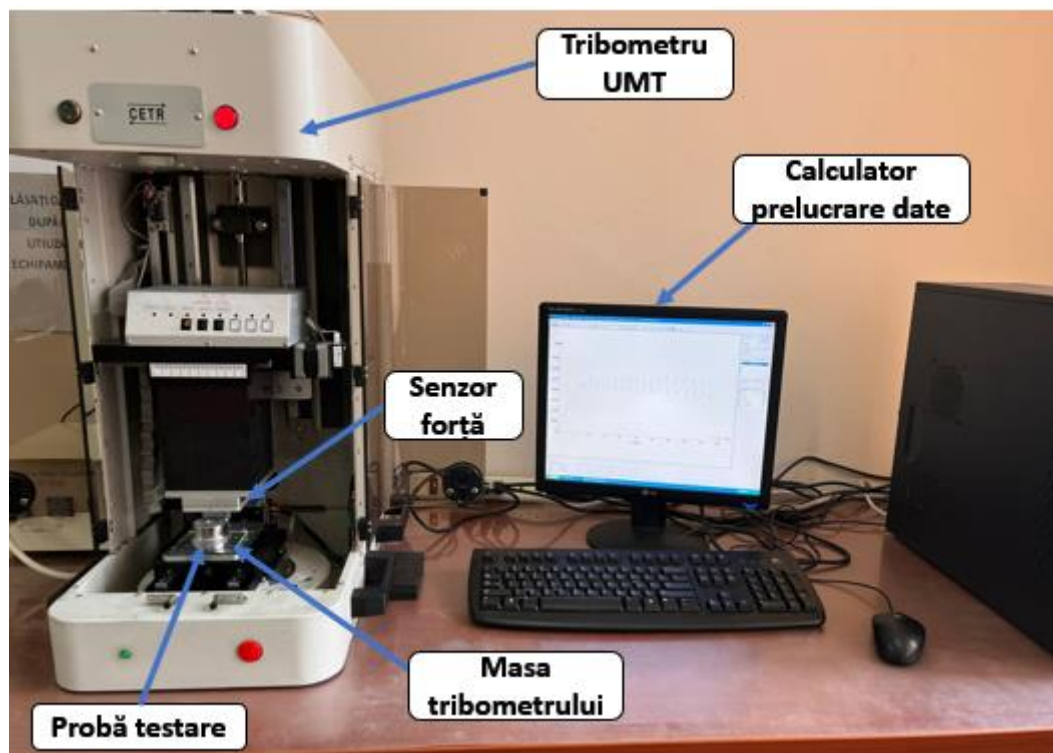


Fig. 2.1 – Schema de conectare a sistemului

2.1.1 Accesorii și senzori utilizați.

Pentru măsurarea forțelor, am utilizat senzorul de forță DFM-2, capabil să înregistreze forțe pe direcțiile F_x și F_z . Senzorul este echipat cu găuri filetate care permit montarea diversilor adaptori necesari pentru realizarea măsurărilor.



Fig. 2.2 – Senzorul de forță DFM-2 (20N)

Tab. 2.1 – Specificații senzor forță.

Model	Interval
DFM-2-0488	0.2 – 20N (20g – 2kg)

Mișcarea liniară este asigurată de masa L20HE-0308 prevăzută cu găuri filetate de dimensiuni diferite. Astfel se pot monta diferite probe de testare.

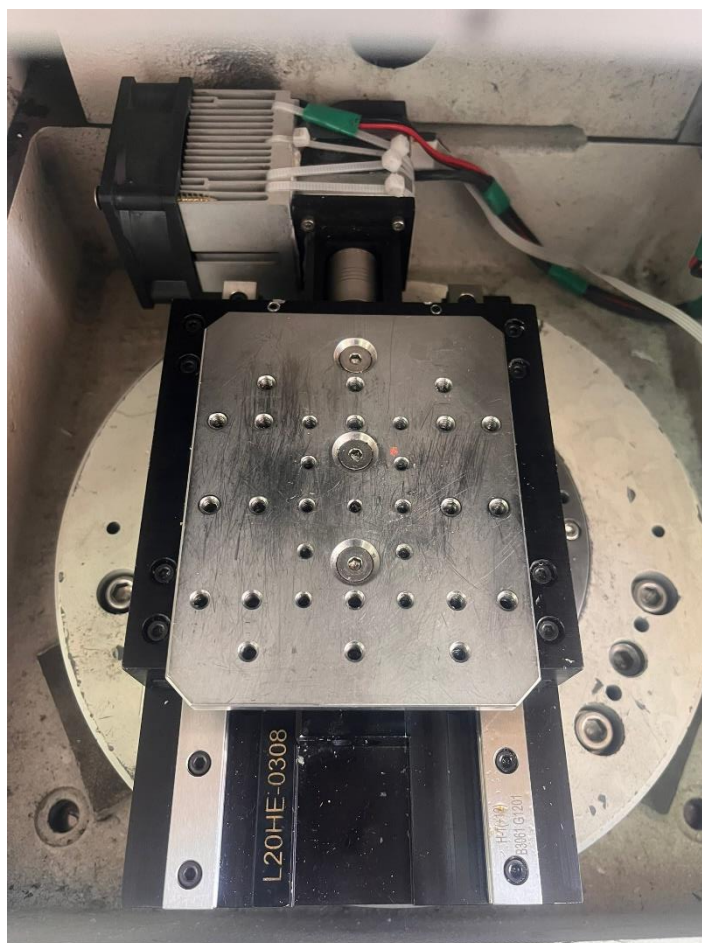


Fig. 2.3– Masa liniară a tribometrului.

Tab. 2.2 – Specificații masa liniară

Distanță	Viteză	Încărcare maximă
75 mm	0.001 - 10mm/s	100 kg

În testele de uzare, s-au utilizat modulele S25LE, care include o masă rotativă. Acest modul permite realizarea testelor de uzare prin rotație, simulând condiții reale de operare ale materialelor.

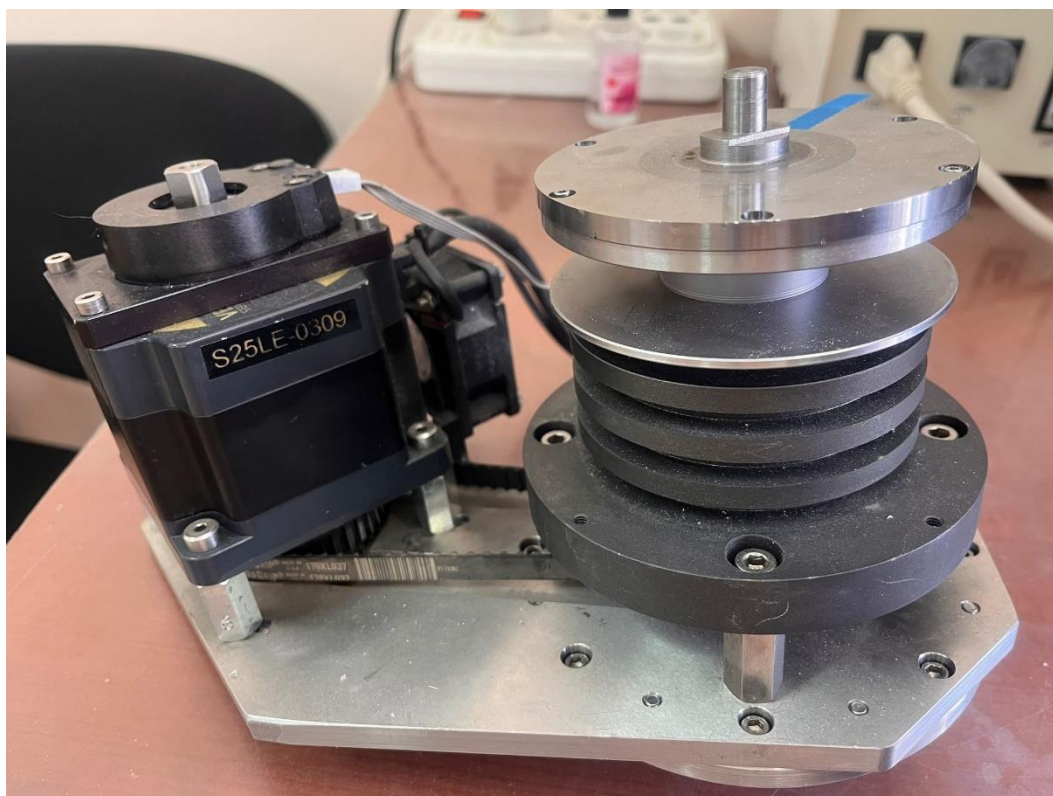


Fig. 2.4 – Modul S25LE-0309, masa rotativă

Tab 2.3 – Specificații modul masă rotativă

Max RPM	Încărcare maximă	Acc/Dec Sec
5000	20 kg	5

Pentru monitorizarea nivelului de zgomot acustic, s-a utilizat un senzor adițional AE-5 cu o frecvență de 0.2 până la 50 MHz. Acest senzor este esențial pentru detectarea și analiza semnalelor acustice generate în timpul procesului de uzare, oferind informații suplimentare despre mecanismele de degradare a materialelor.

2.1.2. Analiza Datelor

După colectarea datelor, analiza acestora s-a realizat utilizând programul Viewer, specific Tribometrului UMT-2. În Fig. 2.5 se prezintă o diagramă specifică de variație a forței tangențiale (F_x) în funcție de timp. Acest program permite:

- Vizualizarea graficelor forță-timp și uzură-timp.
- Filtrarea și prelucrarea datelor brute pentru eliminarea zgomotului și identificarea tendințelor semnificative.
- Extracția caracteristicilor tribologice, cum ar fi coeficientul de frecare și rata de uzură.
- Analiza semnalelor acustice pentru identificarea mecanismelor de uzare.

Pentru studiul frecării, datele furnizate de programul Viewer au fost transferate într-un program Excel cu care s-au obținut diverse modelări ale coeficienților de frecare statică și cinetică.

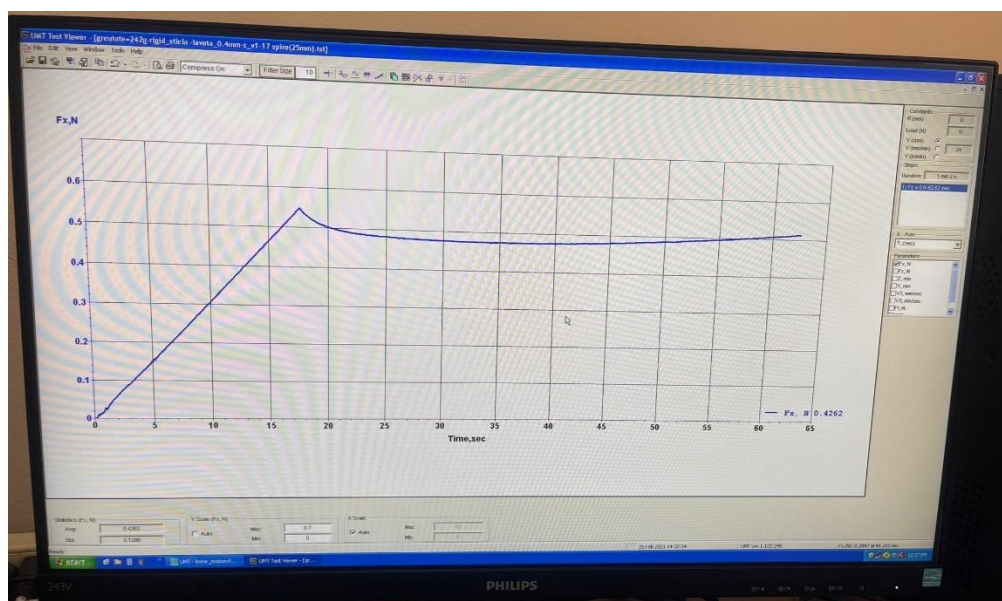


Fig. 2.5 – UMT Test Viewer

2.2. Profilometru pentru determinarea parametrilor de rugozitate și a urmelor de uzură

Pentru studiul rugozității s-a utilizat profilometrul Form Talysurf Intra de la Taylor Hobson. Acest profilometru este un dispozitiv compact și portabil bazat pe un palpator cu contact pe suprafața investigată, proiectat cu scopul de a măsura și analiza textura și forma suprafeței. Instrumentul este compus în mare parte dintr-o unitate transversală de 50 mm și un modul de control al procesorului. Ambele dispozitive au capacitatea de a fi alimentate cu baterii sau pot fi utilizate împreună cu o unitate de alimentare de joasă tensiune. Dispozitivele comunică între ele folosind fie o conexiune de interconectare, fie o legătură în infraroșu.

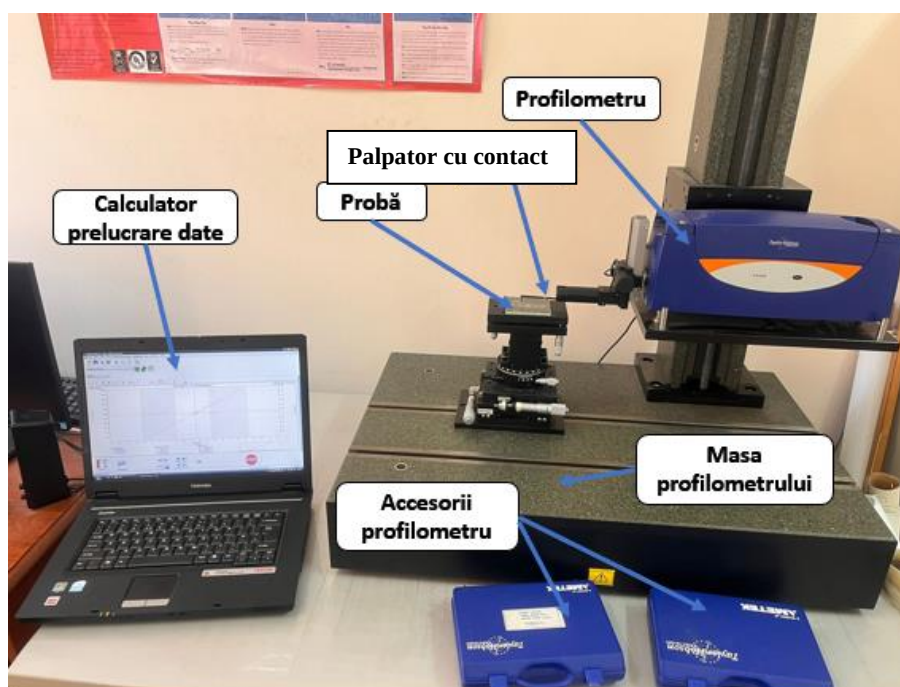


Fig. 2.6– Profilometru Taylor Hobson.

2.2.1. Unitatea de înălțime reglabilă

Montat la capătul arborelui de referință al unității transversale este montat un sport reglabil pe înălțime. Întregul ansamblu poate fi ridicat și coborât prin rotirea butonului de reglare a unității. Zona de reglare pe verticală permite poziționarea pinului cu vârf de diamant între 70 mm deasupra bazei transversale și 24 mm sub baza unității transversale.

Pinul este montat pe unitatea de înălțime prin cuplarea cu atenție a conectorului cu diametrul mic din partea din spate a pinului în mufa ecartamentului. Unitatea de înălțime reglabilă permite suportului să fie utilizat atât în poziția normală, cât și în unghi drept, în funcție de modul în care este orientat masa.

Cei sensibili la poziție, dau un semnal care este direct proporțional cu deplasarea, chiar dacă pinul este nemișcat. Avantajul acestui calibru este că acesta permite o înregistrare adevărată a ondulației și a formei.

Pe când calibrul sensibil la mișcare, produce o înregistrare atunci când pinul se mișcă, înregistrarea fiind strâns legată de viteza cu care pinul se deplasează.

2.2.2. Parametri și definiții

Pentru prelucrarea măsurătorilor a fost folosit programul Taylor Hobson Ultra, cu ajutorul căruia s-au obținut profilograme cu indicarea diversilor parametri specifici rugozității, inclusiv abaterea media aritmetică R_a (Fig. 2.7-(a) precum și curba de distribuire a înălțimilor rugozităților (curba Abbot) și curba de densitate a probabilității distribuției rugozităților în limita lungimii de referință, Fig. 2.7 –(b).

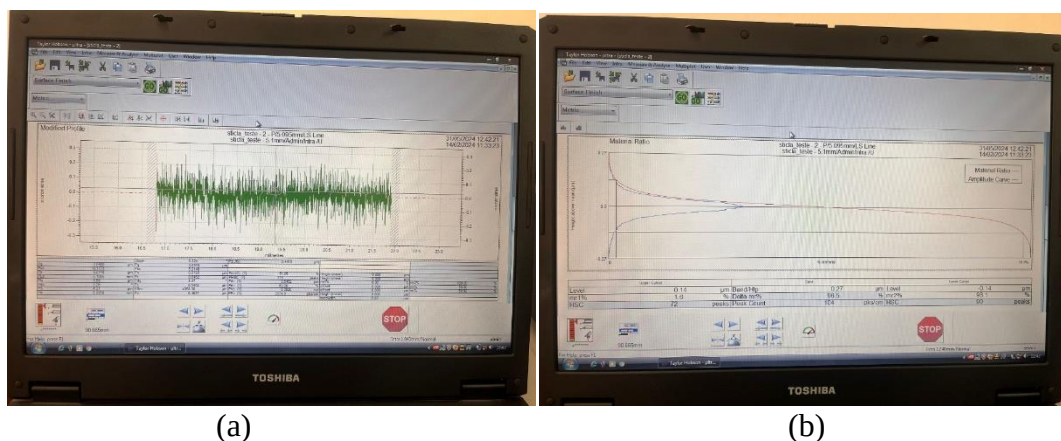


Fig. 2.7 – Profilograma plăcii de sticlă (captură laptop) –(a) și curba Abbot (curba de culoare roșie) împreună cu curba densității probabilității distribuției vârfurilor de rugozitate (curba de culoare albastră) –(b)

2.3. Concluzii

Prin utilizarea tribometrului UMT și a senzorilor asociați, am reușit să obținem date detaliate privind comportamentul tribologic al materialelor testate. Aceste date oferă informații valoroase pentru înțelegerea mecanismelor de frecare și uzare, contribuind la dezvoltarea și optimizarea materialelor în diverse aplicații industriale.

CAPITOLUL 3 – DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FRECARA USCATĂ DE ALUNECARE PE STICLĂ A DIVERSELOR MATERIALE, CU DETERMINAREA COEFICIENȚILOR DE FRECARA STATICĂ ȘI CINETICĂ.

3.1. Frecarea dintre sticlă și materiale moi. Determinări ale coeficienților de frecare. Particularități în cazul vitezelor mici

Experimentele au fost concepute pentru a investiga fenomenele de frecare care apar între suprafața de sticlă și diferite materiale textile, sub influența unor mărimi variabile precum viteza de deplasare și presiunea de contact. Obiectivele principale au inclus înțelegerea comportamentului la frecare al sticlei cu diverse materiale moi, aplicate pe suprafața de contact dintre un cilindru oscilant și placa de sticlă.

Prin variația parametrilor experimentali, cum ar fi viteza de deplasare și presiunea de contact, s-a urmărit obținerea unor date detaliate despre cum acești factori influențează comportamentul de frecare. De asemenea, testele cu materiale moi montate pe cilindru au avut scopul de a examina modul în care acestea pot modifica interacțiunea dintre cele două suprafețe și de a evidenția posibile strategii pentru reducerea frecării.

În sistemele tribologice de alunecare care funcționează la viteză mică și în condiții uscate, variația neliniară a forței de frecare poate fi observată cu procese alternative de aderență și alunecare. Doi parametri sunt importanți în acest proces de stick-slip: **diferențele dintre coeficientul de frecare static și dinamic și rigiditatea sistemului**. În general, coeficientul de frecare static are o valoare mai mare decât coeficientul de frecare cinetic [Chiriac et al., 2022]. Atât coeficienții de frecare statică, cât și cei cinetici nu sunt valori constante pentru o pereche de materiale, frecarea statică pentru materialele rigide având valori mai mari decât coeficientul de frecare cinetică.

Testele de frecare cu materiale moi în contact cu sticla s-au realizat utilizând masa liniară a Tribometrului, și un sistem oscilator unidirecțional format dintr-un cilindru cu masa m legat la senzorul Tribometrului printr-un arc elicoidal cu diverse rigidități k . O imagine de ansamblu a echipamentelor utilizate este prezentată în Fig.3.1.



Fig. 3.1 – Vedere de ansamblu a echipamentului de testare UMT-2 pentru frecarea dintre materiale moi și sticlă

Între masa oscilatorului (cilindru) și suprafața sticlei au fost incluse diferite materiale precum lavetă din microfibră pentru ștergerea ochelarilor și material textil din bumbac.

Metoda oscilatorului liniar cu un singur grad de libertate este un model simplificat pentru descrierea mișcării oscilatorii a unui sistem într-un singur sens. Acesta constă dintr-o masă care se poate deplasa pe o direcție liniară și care este legată printr-un element elastic, în acest caz, un arc, legat de un punct fix (pin) atașat unui senzor de forțe tangențiale.

Viteza de deplasare a masei liniare a Tribometrului **V2** variază între 0.02mm/s până la 8mm/s. Pentru a determina influența rigidității asupra comportamentului la alunecarea sacadată, rigiditatea arcului **k** a variat de la 46.54 N/m la 348.27N/m. Masa discului atașat de arc este de $m = 0.242$ kg. Coeficientul de frecare static se obține făcând raportul dintre forță **Fx** și greutatea cilindrului **G=mg**, iar coeficientul de frecare cinetic se obține diferențiat. Astfel, dacă se produce o alunecare constantă ca în Fig.3.2 , după efectuarea saltului, coeficientul de frecare se determina ca raportul dintre **Fx** și **G**. În condiții de stick-slip, unde au loc alunecări rapide, coeficientul de frecare cinetic se determină pe baza ecuației de echilibru dinamic întrucât apare și accelerația. Testele au fost realizate în condiții uscate. Astfel, placa de sticlă a fost curățată de grăsime și ulei cu ajutorul unui dizolvant, iar temperatura și umiditatea laboratorului au variat între (22-24°C) și (40 – 50%), respectiv.

Distanța maximă pentru încercări a fost de 25 mm, iar timpul încercărilor a variat în funcție de viteza de alunecare a mesei tribometrului.

Un aspect important pentru efectuarea unor teste cât mai corecte, este de a curăța suprafețele ce urmează a fi testate. Acest lucru a fost efectuat prin singura metodă acceptată în diferite domenii și anume tehnica de ștergere cu un șervețel care nu lasă scame și îndepărtează lin petele de pe suprafața de sticlă.

3.1.1 Influența rigidității în cazul materialelor soft.

Rigiditatea sistemului tribologic influențează semnificativ caracteristicile și amplitudinea fenomenului de stick-slip. O rigiditate mai mare tinde să reducă efectul de stick-slip, deoarece sistemul poate suporta mai bine variațiile forțelor de frecare fără a trece brusc de la faza de alunecare la cea de aderență. În contrast, o rigiditate mai mică poate amplifica aceste variații, ducând la oscilații mai pronunțate și, implicit, la un fenomen de stick-slip mai evident.

Rigiditatea sistemului este importantă pentru a vedea cei doi coeficienți de frecare, static și cinetic. Frecarea statică depinde de natura materialelor de contact, de rugozitate de viteza de alunecare dar și de timpul de staționare dintre suprafețe [Oprîșan et al., 2020].

După cum se poate observa în figura 3.2 variabilitatea forței de frecare este pronunțată, indicând fază de aderență și de alunecare. Faza inițială de frecare statică este caracterizată printr-un coeficient de frecare de 0.25, urmată de o tranziție la coeficientul cinetic de 0.15.

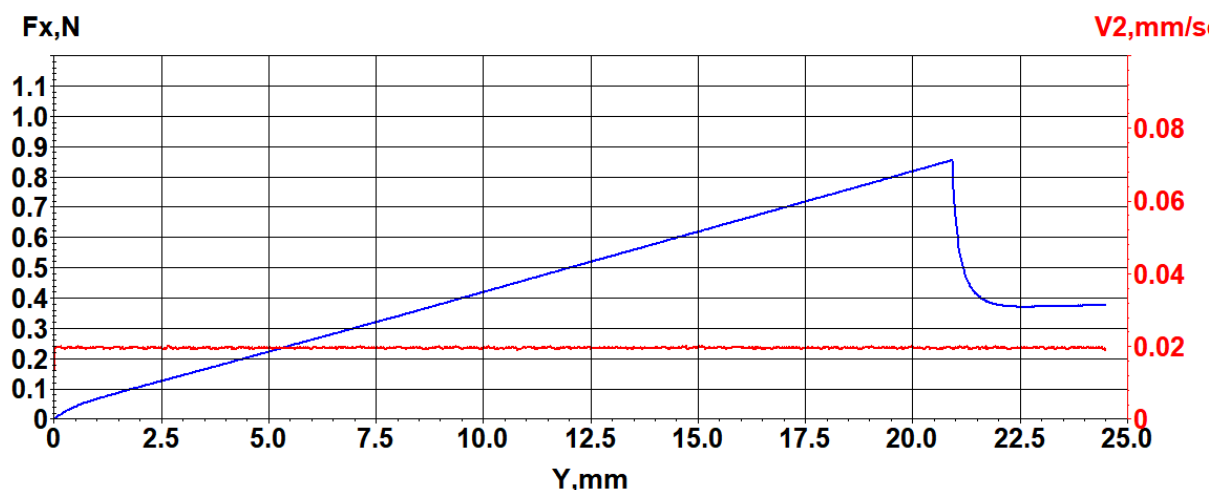


Fig. 3.2 – Variația forței F_x în funcție de timp, sticlă-lavetă. Rigiditatea arcului 46.54 N/m

Cu o creștere a vitezei de alunecare, coeficientul de frecare cinetic se stabilizează la o valoare de 0.27. Aceasta sugerează că rigiditatea arcului de 46.54 N/m permite o tranziție continuă, fără salt, între frecarea statică și cea cinetică.

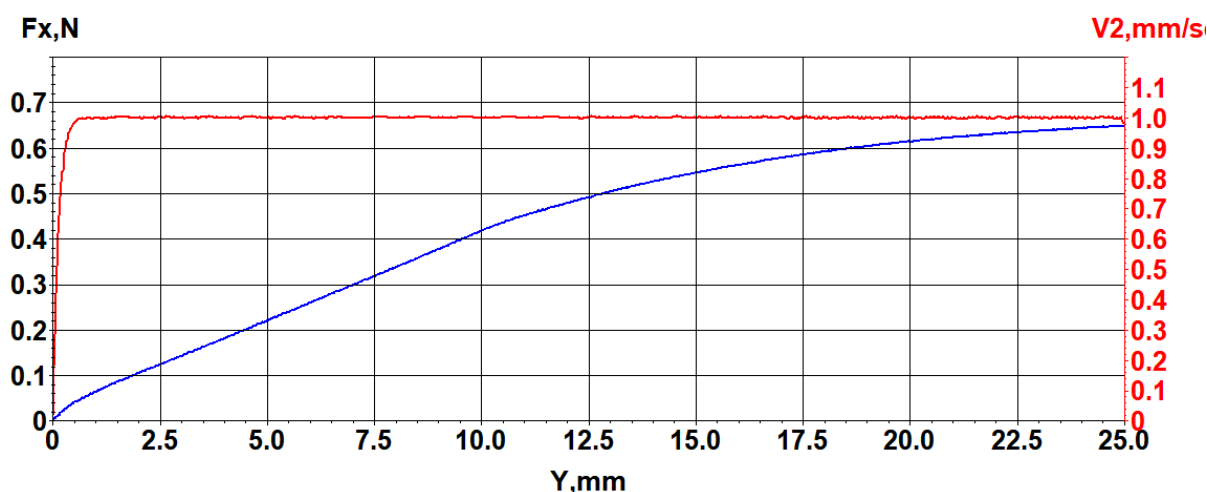


Fig. 3.3 – Variația forței F_x în funcție de timp, sticlă-lavetă. Rigiditatea arcului 46.54 N/m

Comparând cele două diagrame, este evident că pentru o rigiditate impusă sistemului tribologic, viteza joacă un rol important în comportarea la frecare dintre materialul moale și sticlă.

O rigiditate mai mare (348.27 N/m) reduce semnificativ variabilitatea forței de frecare și atenuează oscilațiile, așa cum se poate vedea din Fig.3.4. În acest caz, la o viteză de 4mm/s se poate menține un coeficient de frecare cinetic constant de 0.37 cu o alunecare totală pe sticlă, aproape pe întreg parcursul de 25 mm.

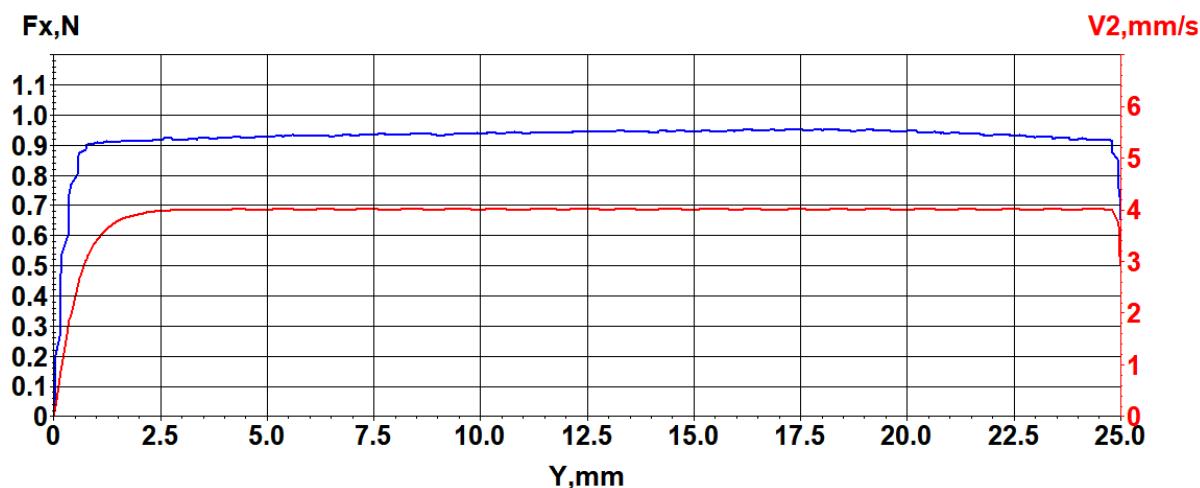


Fig. 3.4 – Variația forței F_x în funcție de timp, sticlă-lavetă. Rigiditatea arcului 348.27 N/m

În ambele cazuri, coeficientul de frecare dinamic crește odată cu viteza, dar această creștere este mai pronunțată la rigidități mai mari. Aceasta poate fi explicată prin faptul că, la rigidități mai mari, contactul dintre suprafețe este mai stabil, permițând o frecare cinetică mai consistentă.

3.1.2. Testări sticlă-lavetă

Figura 3.5 prezintă tribosistemul cu suport de sticlă-lavetă, unde a fost analizată frecarea statică și cinetică la o rigiditate a arcului de 74 N/m.

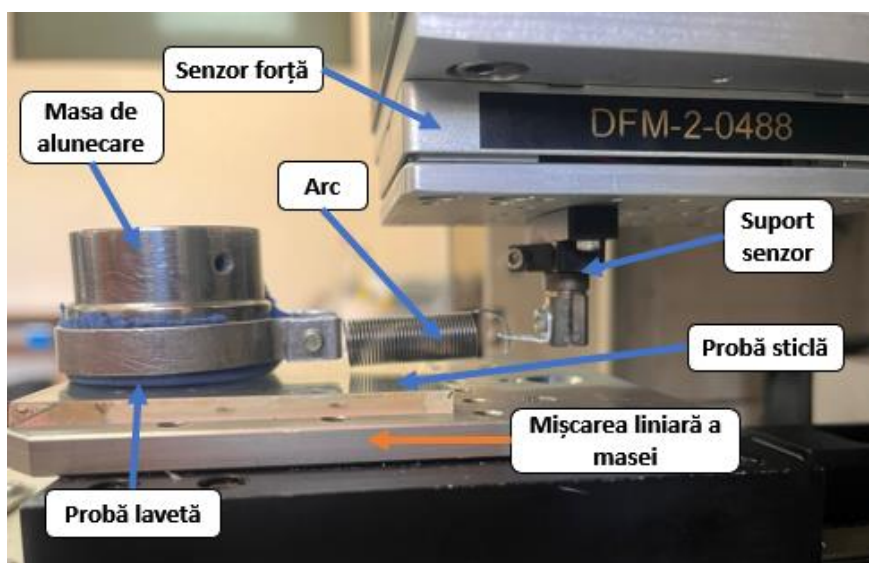


Fig. 3.5– Sistemul oscilatorului liniar cu lavetă.

În figura 3.6 a, b și c sunt prezentate diagramele de variație a forței de frecare (aderență) F_x între sticlă și laveta din microfibră pentru deplasarea masei de $Y=25\text{mm}$. Viteza liniară a variat între 0.02 și 8 mm/s. În figura 3.6 a, se observă primul caz, unde avem prezența procesului de stick-slip.

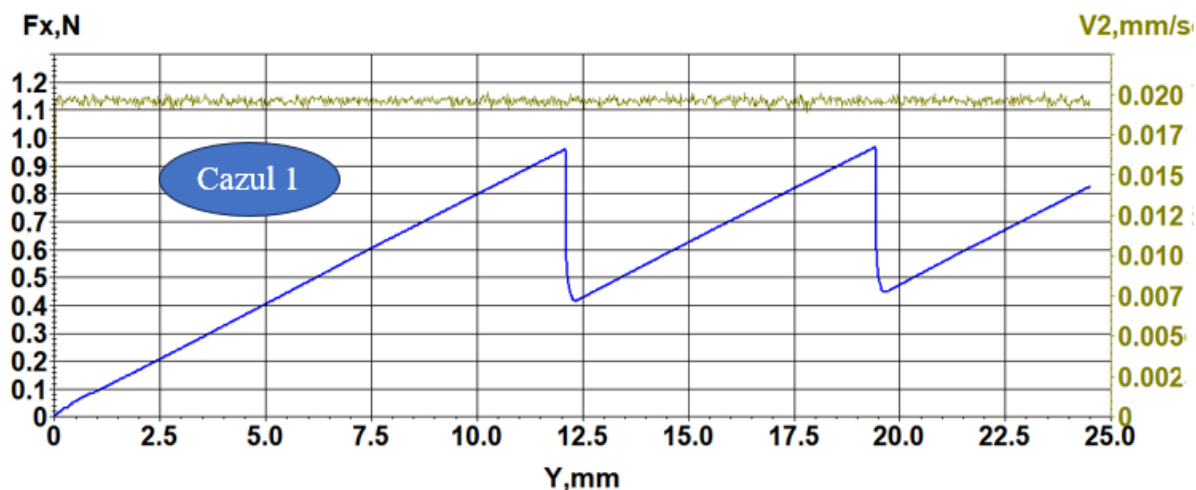


Fig.3.6 a – Variația forței F_x în funcție de distanță la diferite viteze. Prezența procesului de stick-slip

În figura 3.6 b, se observă cazul 2 unde avem un singur vârf urmat de o scădere a forței de frecare, pentru viteza mesei de la 0.05 mm/s până la 0.6 mm/s.

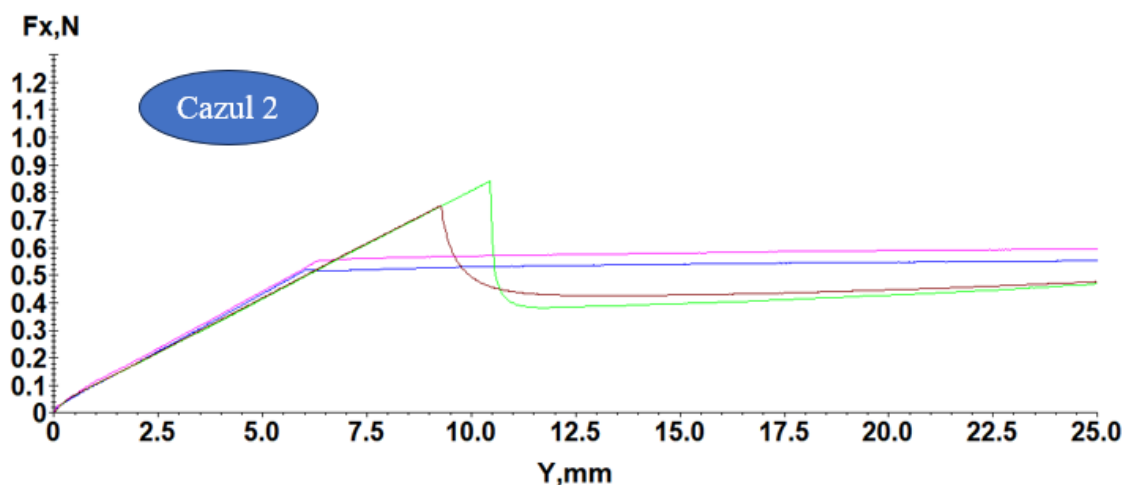


Fig. 3.6 b – Variația forței F_x în funcție de distanță la diferite viteze. Prezența procesului de stick-slip

Tab. 3.1 – Vitezele liniare ale mesei tribometrului la realizarea testelor

Viteza liniară a mesei mm/s			
<u>0.05</u>	<u>0.2</u>	<u>0.4</u>	<u>0.6</u>

Prin creșterea vitezei de la 0.8 mm/s se poate evidenția o creștere continuă a forței de frecare până la limita de 8mm/s, așa cum se poate observa în figura 3.7 c.

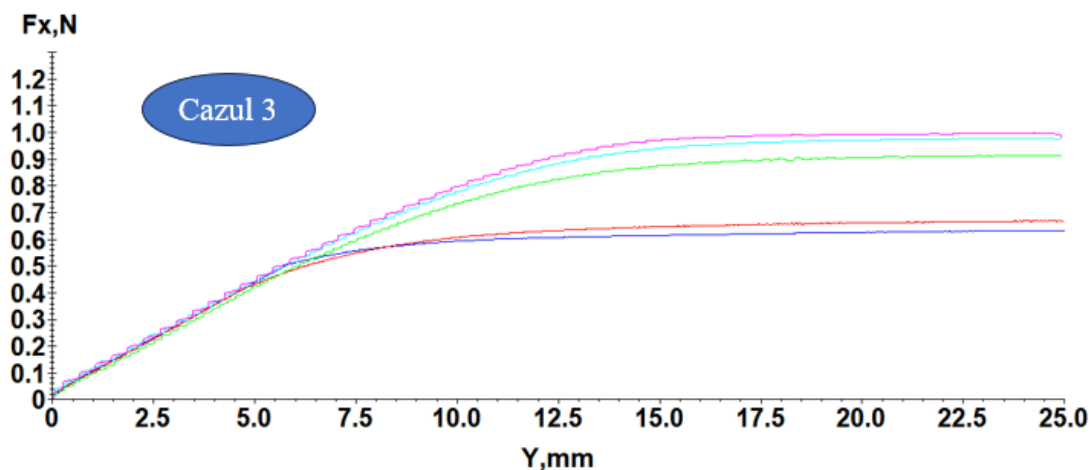


Fig. 3.6 c – Variația forței F_x în funcție de distanță la diferite viteze. Prezența procesului de stick-slip

Tab. 3.2 – Vitezele liniare ale mesei tribometrului la realizarea testelor

Viteza liniară a mesei mm/s				
<u>0.8</u>	<u>1</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>8</u>

Rezultatele experimentale indică un comportament deosebit al tranziției dintre aderență și alunecare pe suprafața sticlei. Astfel, pentru viteza de 0.02mm/s s-a observat prezența unui proces tipic stick-slip cu un coeficient de frecare static mai mare decât coeficientul de frecare cinetic așa cum este prezentat în figura 3.7.

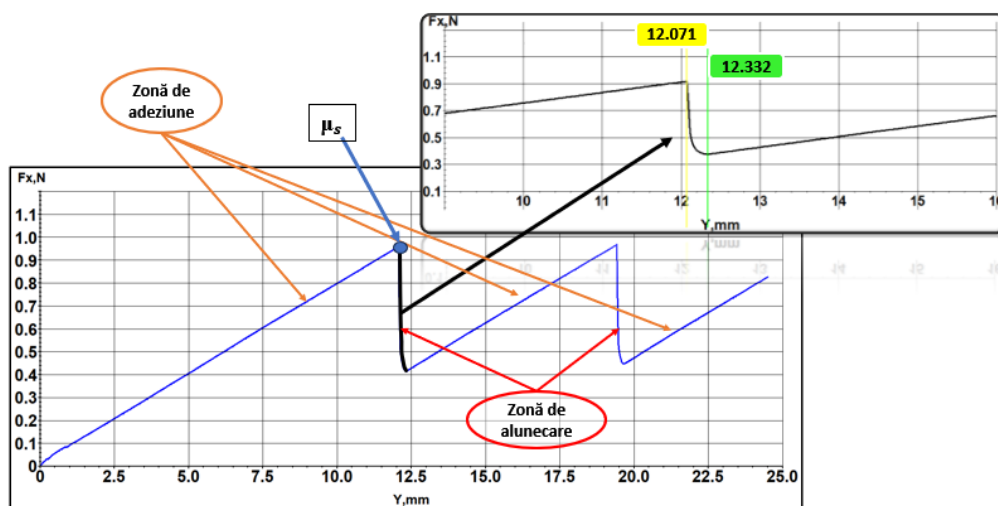


Fig. 3.7 – Variația forței F_x în funcție de distanță la viteza de 0.02mm/s.

3.1.3. Testări sticlă – bumbac

În figura 3.8 se poate observa o alunecare pe un interval de 0.054mm, reprezentând primul salt, pentru o viteză a mesei de 0.02mm/s cu un coeficient static de 0.34. Față de laveta din microfibră, bumbacul are o ușoară creștere a coeficientului de frecare static, la viteze mici apare fenomenul de stick-slip.

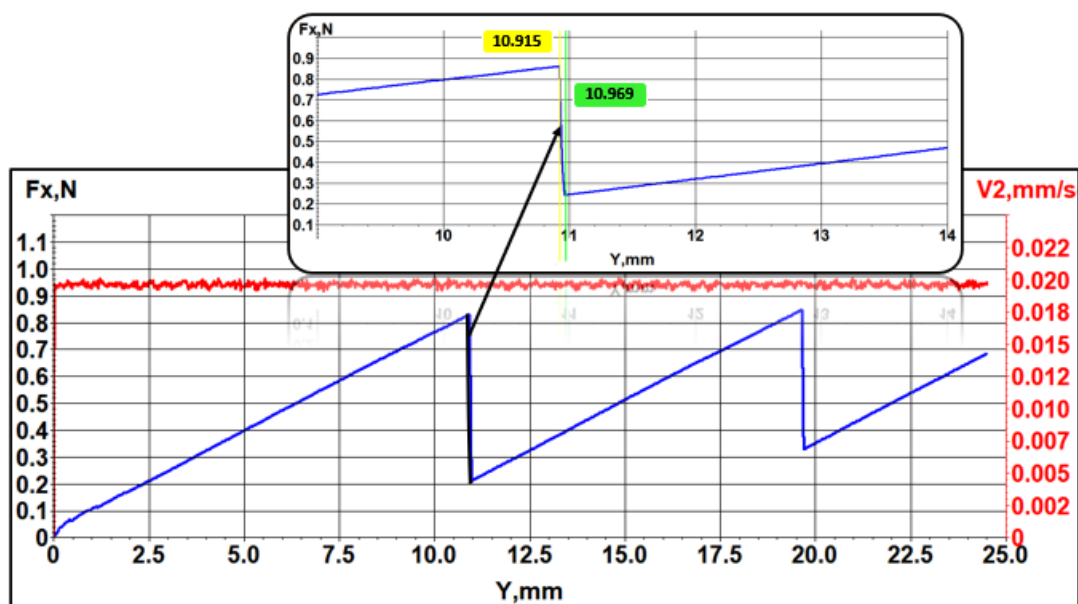


Fig. 3.8– Variația forței F_x în funcție de distanță.

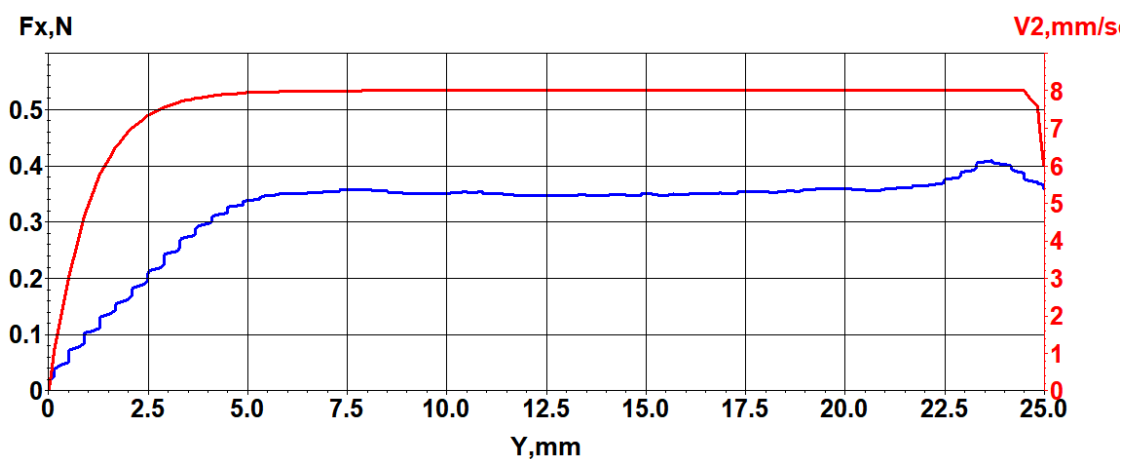


Fig. 3.9 – Variația forței F_x în funcție de distanță. Viteza mesei 8 mm/s

Modificarea neliniară a forței de frecare poate fi observată în sistemele tribologice de alunecare care funcționează la viteză mică și în condiții uscate. Diferențele dintre coeficientul de frecare static și cinetic au un comportament neașteptat, la viteze mici, condiții uscate și materiale moi precum laveta și bumbacul.

3.1.4. Frecarea dintre sticlă și hârtie compozită (celuloză – polietilenă).

Particularități în cazul frecării dintre sticlă și hârtie de scris cu o densitate de 80g/m^2 , unde avem un coeficient de frecare static maxim de 0.26, cu o mișcare clară la viteza de 0.02mm/s de stick-slip, primul salt cu o alunecare a mesei de 0.047 mm . (a se vedea figura 3.10)

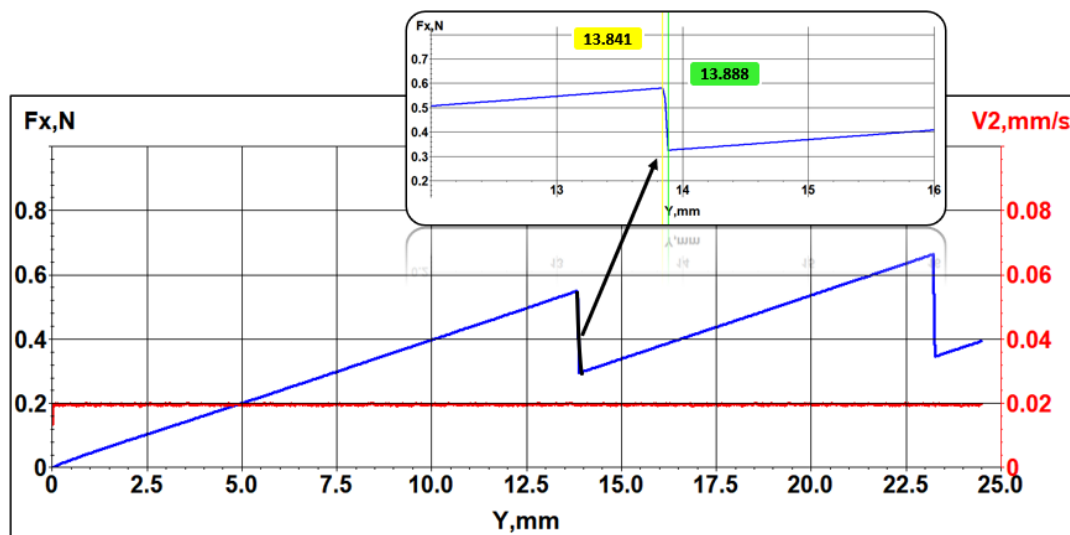


Fig. 3.10 – Grafic sticlă- hârtie la viteza masei liniare de 0.02 mm/s. Rigiditatea arcului 74 N/m

Prin creșterea vitezei putem observa că fenomenul de stick-slip nu mai apare și avem o creștere continuă a coeficientului cinetic de frecare de la zona desprinderii de masă cu un coeficient de 0.15 până la finalul testului unde coeficientul de frecare cinetic este de 0.18.

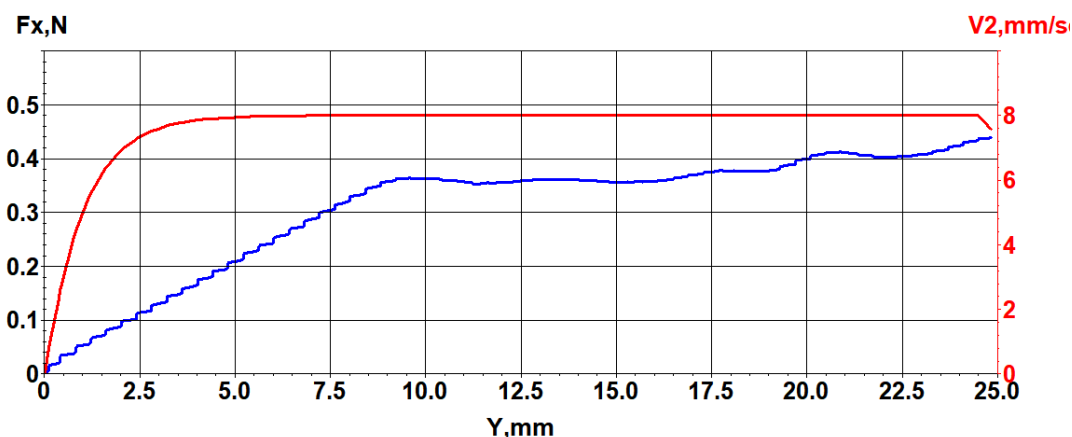


Fig. 3.11 – Variația forței F_x în funcție de distanță. Grafic sticlă- hârtie. Rigiditatea arcului 74 N/m

3.1.5. Testările sticlă-material stratificat din celuloză moale 15g/m².

Materialul stratificat din celuloză moale cu o densitate de 15g/m², prezintă forțe de frecare mult mai mari în comparație cu celelalte materiale, atingând 1.34N forța F_x la viteza de 0.02mm/s. Primul salt a fost realizat la timpul de 825.399 secunde și a durat 2.11 secunde conform figurii 3.12.

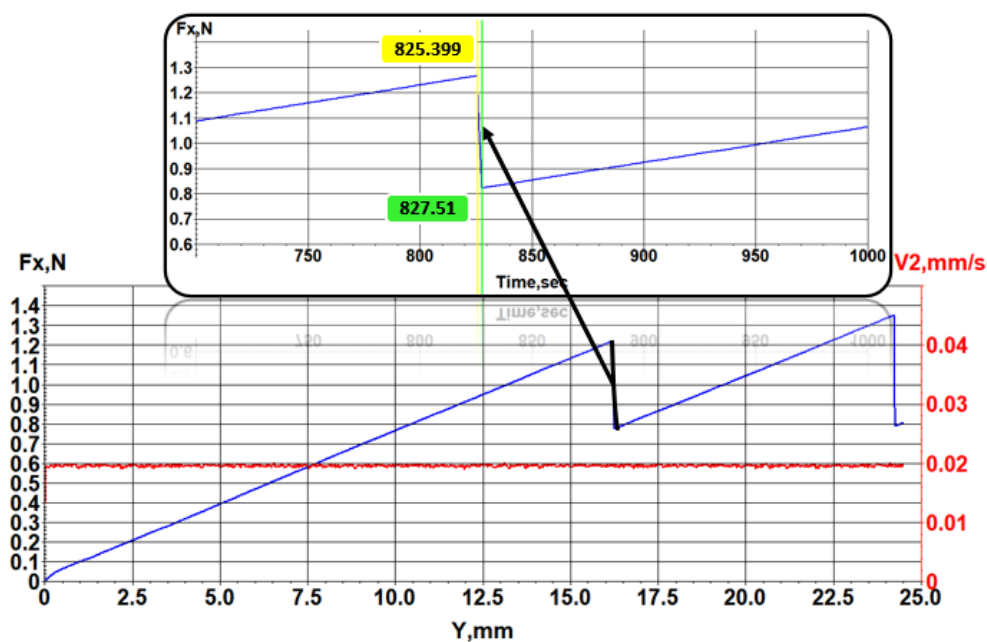


Fig. 3.12 – Variația forței F_x în funcție de distanță. Detalierea zonei de alunecare în raport cu timpul. Sticlă-material stratificat 15g/m^2

Figura 3.13 prezintă trecerea de la aderență la alunecare, într-un mod continuu a cilindrului pe suprafața din sticlă, acest lucru se produce la atingerea forței F_x de 0.5 N pentru viteza mesei de 4mm/s . Este evident că fenomenul de stick-slip nu mai apare.

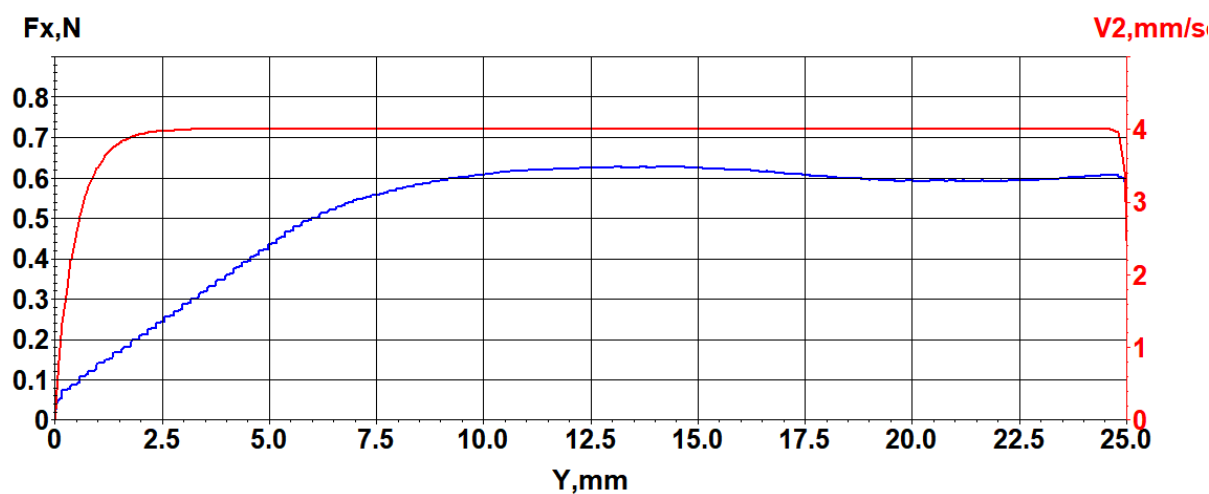


Fig. 3.13– Variația forței F_x în funcție de distanță. Sticlă- material stratificat 15g/m^2

3.2 Particularități la frecarea dintre sticlă și deget.

Frecarea dintre degetul uman și suprafețe joacă un rol important în percepția noastră tactilă.

Pielea umană, fiind un țesut moale complex, are caracteristici mecanice și fiziologice complicate. Cercetările privind mecanismele biotribologice implicate în percepția tactilă și activitatea creierului au câștigat o atenție semnificativă în domeniul tribologiei. [Carlescu et al., 2021]

Cercetările legate de contactul dintre zona tactilă a corpului uman și sticla, prezintă numeroase interese în domeniul ingineriei.

Pentru acesta au fost efectuate mai multe teste pentru a determina frecarea dintre degetul uman și o suprafață de contact din sticlă, în diferite condiții. Testele examinează efectul forței normale, aria de contact și influența lubrifianților.

Testele au fost realizate utilizând un tribometru UMT, unde degetul arătător a fost fixat într-un suport special, conform figurii 3.16 pentru a preveni orice deplasare. Proba de sticlă și poziționarea degetului în suport pot fi observate în figura 3.15 unde avem senzorul de forță de 2kg, pinul de care este atașat proba de sticlă și poziția degetului arătător.

În figura 3.14, suportul de prindere este prins de masa liniară a tribometrului pentru imobilizarea degetului.

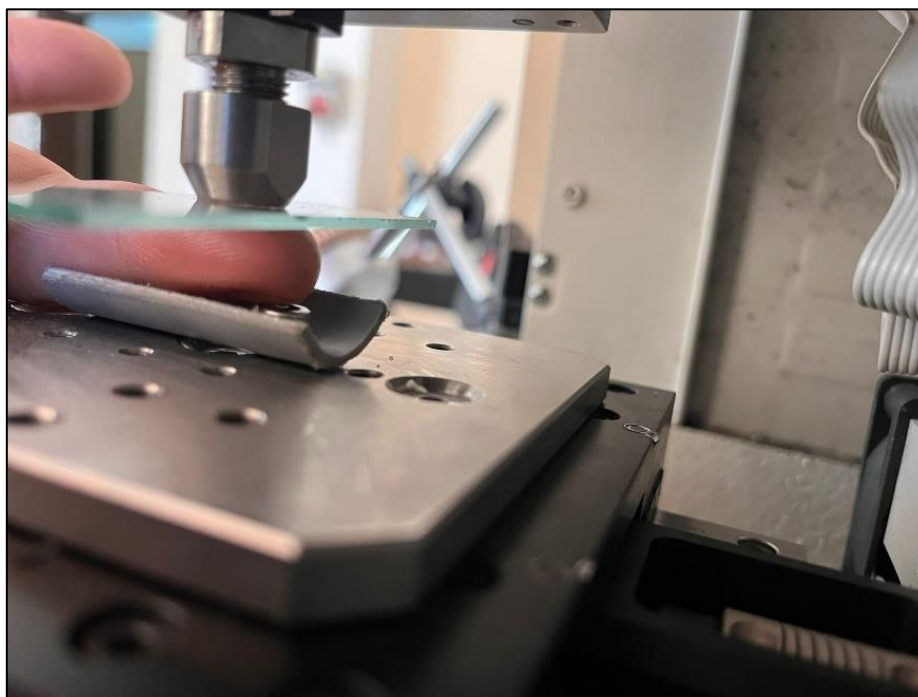


Fig. 3.14 – Suportul de imobilizare a degetului

3.2.1. Analiza testărilor efectuate.

În figura 3.15 se poate observa variația forței F_x în funcție de timp la o viteză de 0.5mm/s și o încărcare de 1N, unde se poate observa marcat cu roșu testul efectuat în mediu uscat, cu albastru testul efectuat cu apă și cu verde testul efectuat în prezența unsorii.

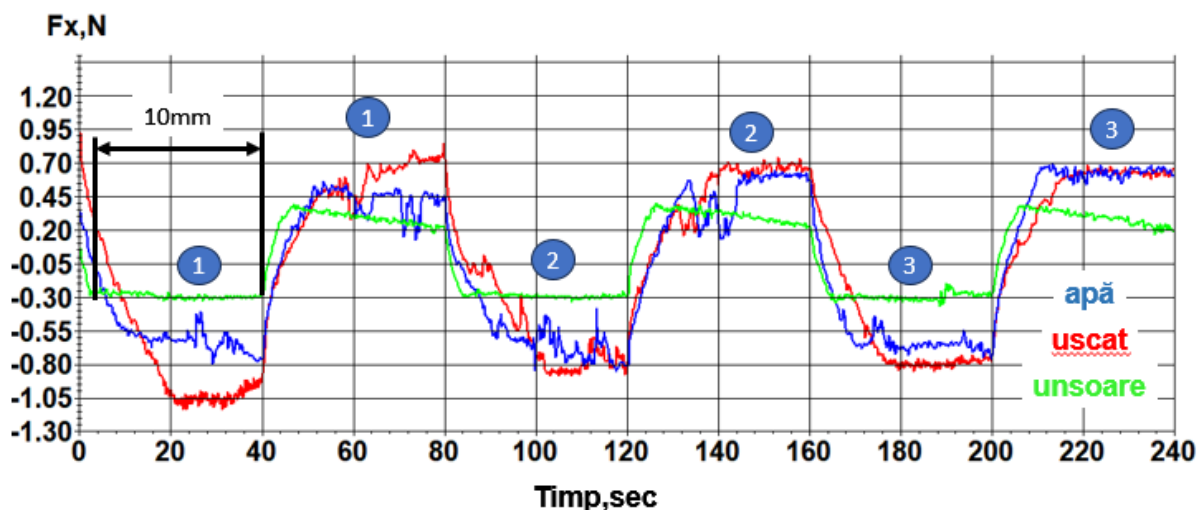


Fig. 3.15 – Variația forței F_x în funcție de timp. Pentru viteza de 0.5 mm/s și o încărcare de 1 N.

Mișcarea reciprocă a avut o cursă de 10 mm, cu un număr total de 3 cicluri pentru observarea îndepărtării lubrifianților o dată cu trecerea unui ciclu.

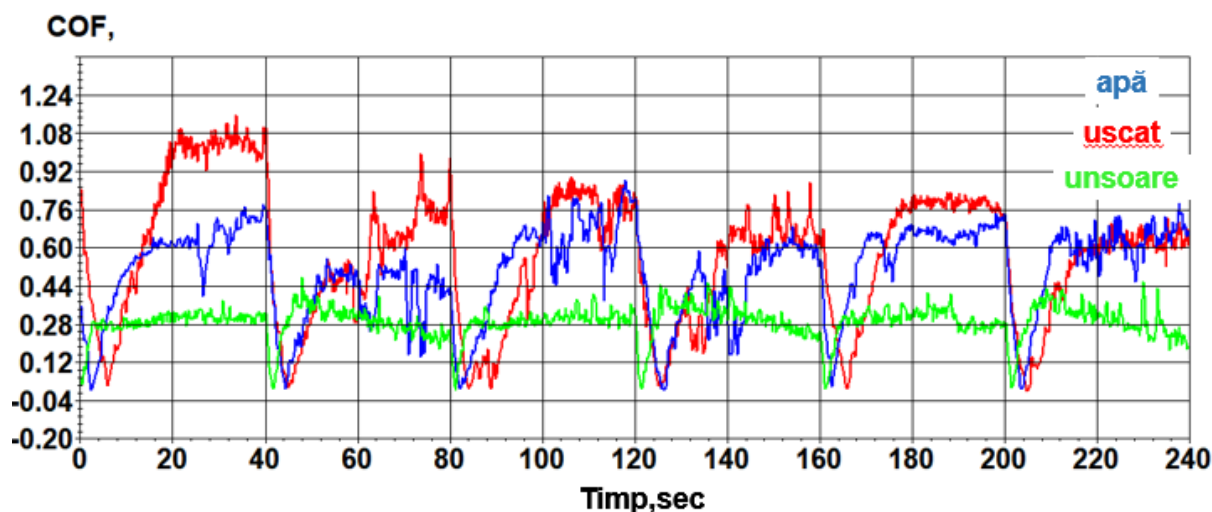


Fig. 3.16 – Variația COF în funcție de timp. Pentru viteza de 0.5 mm/s și o încărcare de 1 N.

Putem observa că la viteze mici și încărcări mici avem o creștere a coeficientului de frecare în mediu uscat cât și cel umed. Primele salturi în cele două medii, se poate observa că avem o creștere a coeficientului de frecare comparativ cu cel uscat, ca pe parcurs acesta să se stabilizeze.

3.2.2. Analiza coeficienților medii de frecare.

Variația coeficientului de frecare în mediu uscat prezintă valori ridicate la încărcare mică, în timp ce la încărcări mari de 10 N, coeficientul de frecare cinetic scade.

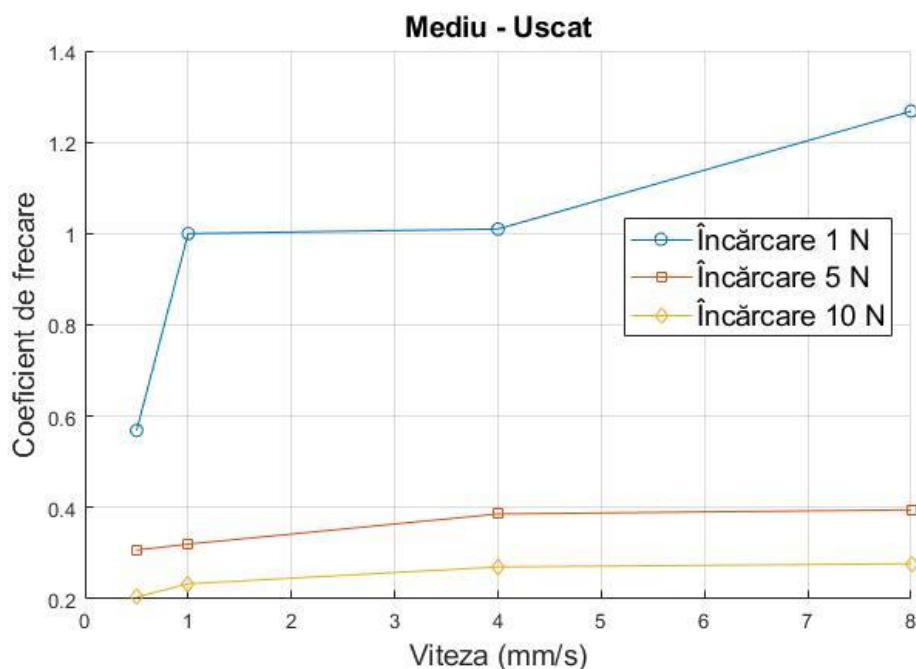


Fig. 3.17 – Coeficientul de frecare în mediu uscat

Variația vitezei are o implicare destul de importantă, după cum putem observa coeficientul de frecare crește până la 1.25 la încărcare de 1N.

Mediul cu unsoare este cel care reduce cel mai mult coeficientul de frecare atingând valori de 0.09 la viteza de 8mm/s și la o încărcare de 10N.

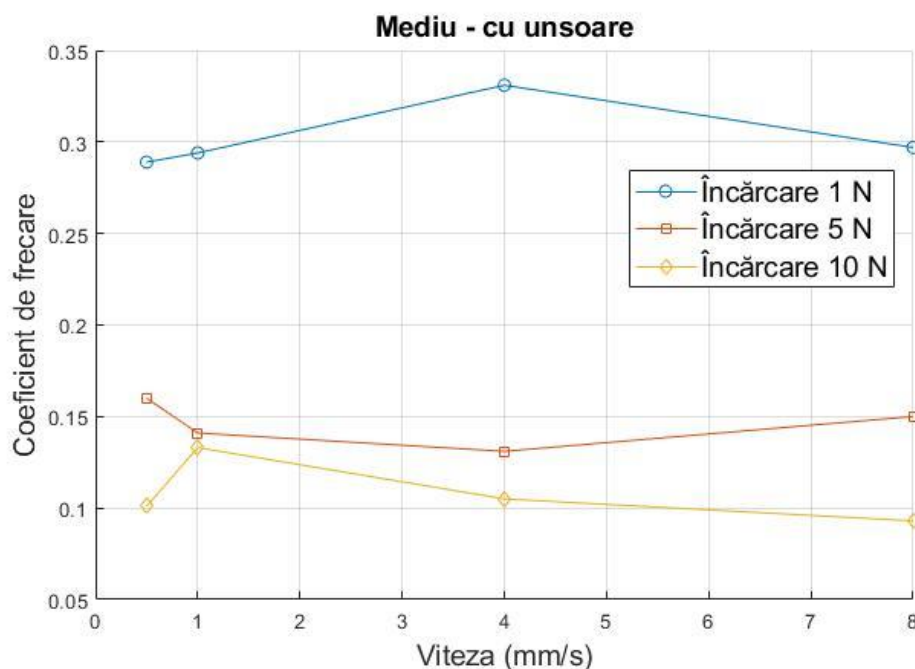


Fig. 3.18 – Coeficientul de frecare în mediu unsoare

În condiții uscate, coeficientul de frecare crește cu viteza, pe când în condiții umede, coeficientul de frecare variază mai puțin cu viteza iar în condiții cu unsoare, rămâne relativ constant o dată cu creșterea vitezei.

Măsurătorile au fost realizate pe o plajă mult mai largă pentru surprinderea mai detaliată a fenomenelor. Astfel s-au efectuat măsurători cu viteză mică 0.5mm/s cu o încărcare de 1N (descrise anterior) continuând cu 1mm/s, 4mm/s respectiv 8mm/s.

3.3 Frecarea dintre sticlă și materiale metalice. Coeficienți de frecare;

Progresul sectoarelor industriale, cum ar fi industria aerospațială, ingineria materialelor, inginerie auto, a condus la realizarea faptului că încrederea într-un singur material este insuficientă pentru a satisface cerințele existenței noastre practice. Pentru a îndeplini cerințele noastre actuale, este necesar să se utilizeze componente complexe care constau din îmbinarea mai multor materiale. Asocierea dintre sticlă și metal este o problemă datorită caracteristicilor lor diferite.

Integrarea sticlei și metalului este o necesitate crucială în mai multe industrii, inclusiv în sectorul aerospațial, dezvoltarea senzorilor, fabricarea ferestrelor, construcția șasiului fuzelajului, fabricația dispozitivelor semiconductoare, producția de panouri solare termice în vid, proiectarea conexiunilor de etanșare în vid și dezvoltarea celulelor de combustibil cu oxid solid și avansarea sistemelor microelectronice și mecanice.

3.3.1. Materiale folosite.

Pentru acest tip de testare au fost propuse unele dintre cele mai comune aliaje, precum oțelul, bronz și aluminium. Unde a fost măsurată pe direcția de mișcare rugozitatea plăcutelor din dur aluminium, bronz laminat, bronz grafitat, oțel și sticlă, după cum se poate observa în tabelul 3.3.

Tab. 3.3 – Rugozitatea materialelor dure

Nr. crt.	Denumire	Ra
1.	Dur aluminium	1.94 μm
3.	Bronz laminat	3.07 μm
4.	Oțel	0.109 μm
5.	Sticlă	0.033 μm

Măsurătorile efectuate pentru aceste materiale au fost realizate cu profilometru Taylor Hobson.

3.3.2. Particularități la frecarea dintre sticlă și aluminiu.

Pentru aceste teste, au fost efectuate pe tribometru, folosind același principiu descris anterior, cu un sistem de masă-arcuri, unde am înlocuit materialele moi cu cele dure.

În figura 3.19 se poate observa schimbarea probei de testare în contact cu sticla, a fost realizat un cilindru din duraluminiu ce a fost atașat cilindrului inițial pentru schimbarea suprafețelor ce intră în contact, greutatea ansamblului fiind de 0.299 kg (conform tabelului 3.4)

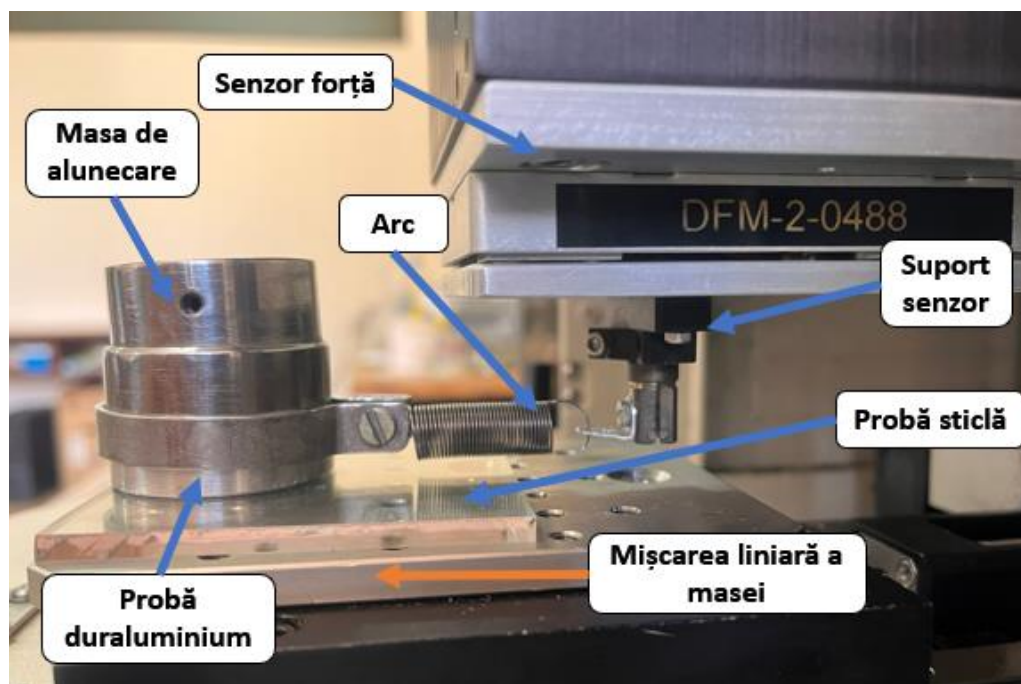


Fig. 3.19 – Sistemul de masă-arcuri pentru tribosistemul sticlă-materiale dure.

În figura 3.20 se prezintă variația forței F_x în raport cu distanța parcursă de masa liniară a tribometrului la viteze ce au variat de la 0.02mm/s până la 0.8mm/s. Se remarcă faptul că în o dată cu creșterea vitezei fenomenul de stick-slip se atenuează, ajungând la un coeficient cinetic de frecare în valoare de 0.07. Coeficientul static maxim la viteza de 0.02mm/s este de 0.12.

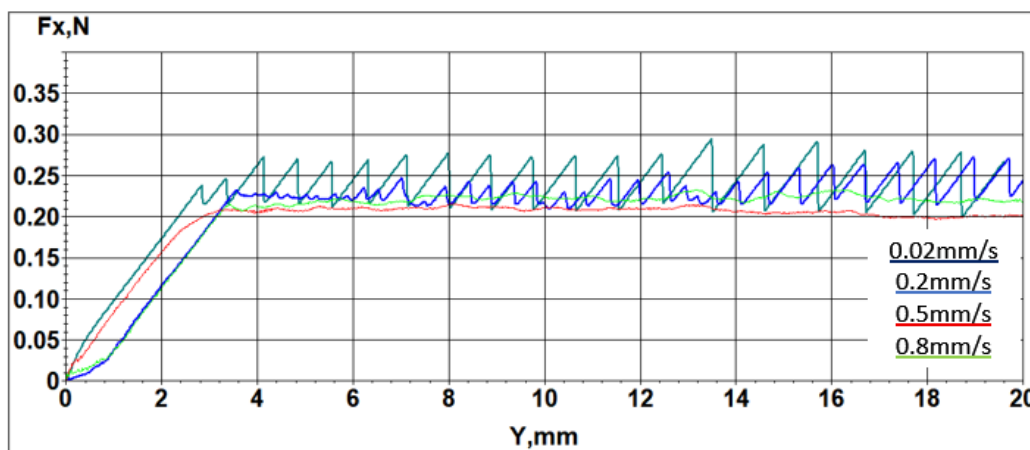


Fig. 3.20 – Variația forței F_x în raport cu distanța

Tab. 3.4 – Specificații ale testului efectuat pentru sticlă-duraluminu

Material	Greutate Kg	Rigiditate k N/m	D_e mm	D_i mm	Presiunea de contact MPa	μ_k	μ_{s_max}	$\mu_{s_inițial}$
Duraluminu	0.299	74	Ø39	Ø0	$2.45 \cdot 10^{-3}$	0.07	0.12	0.081

3.3.3. Testări sticlă – bronz laminat

La fel ca la testele din duraluminu, a fost realizat un cilindru din bronz laminat cu o greutate totală a ansamblului de 0.332 kg, cu rugozitatea de $3.07 \mu\text{m}$ (conform tab. 3.3).

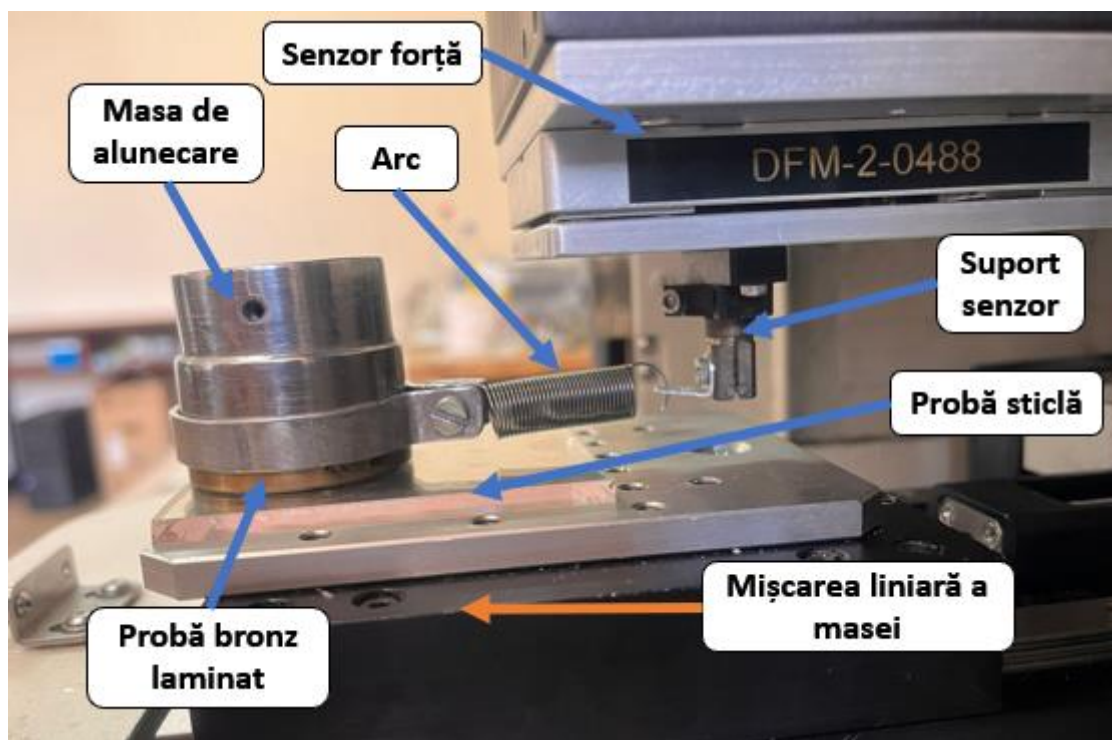


Fig. 3.21 – Sistemul oscilatorului sticlă-bronz laminat.

Putem observa că în cazul suprafeței din bronz este o creștere dublă a coeficientului de frecare în raport cu cilindrul din duraluminu. Coeficientul de frecare static atingând valori de 0.27.

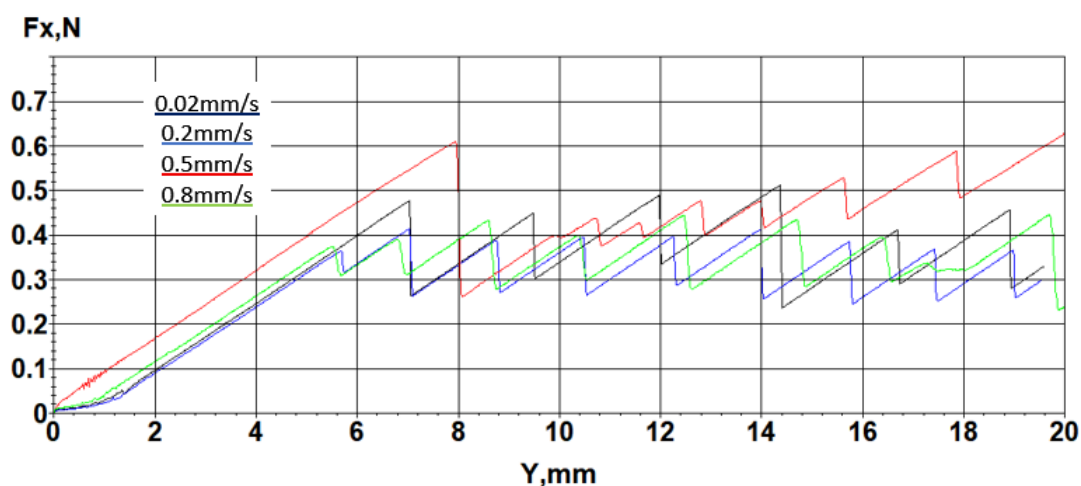


Fig. 3.22 – Variația forței F_x în raport cu distanța. Sticlă-bronz laminat la diferite viteze

Tab. 3.5 – Specificații ale testului efectuat pentru sticlă-bronz laminat

Material	Greutate Kg	Rigiditate k N/m	D _e mm	D _i mm	Presiunea de contact MPa	μ_{s_max}	$\mu_{s_inițial}$
Bronz laminat	0.332	77	Ø39	Ø13	$3.06 \cdot 10^{-3}$	0.27	0.15

3.4 Concluzii.

Viteza de deplasare și presiunea de contact sunt factori esențiali care influențează comportamentul de frecare dintre sticlă și diverse materiale.

Rigiditatea sistemului joacă un rol critic în determinarea coeficienților de frecare și în manifestarea fenomenului de stick-slip. Rigiditățile mari atenuează acest fenomen, permițând o tranziție mai lină între frecarea statică și cea dinamică.

Materialele moi, cum ar fi laveta din microfibră și bumbacul, prezintă fenomene de stick-slip mai pronunțate la viteze mici, iar coeficientul de frecare variază semnificativ în funcție de viteză.

Frecarea dintre deget și sticlă este influențată de condițiile de mediu, prezența unsorii reducând semnificativ coeficientul de frecare și facilitând alunecarea.

CAPITOLUL 4 – MODELAREA PROCESELOR DE FRECARĂ USCATĂ LA VITEZE MICI

4.1 Simularea fenomenului de aderență la alunecarea pe sticlă

Studiile frecării dintre un material moale care este dependent de timp și un material dur care demonstrează un comportament independent de timp, prezintă un interes destul de semnificativ în aplicațiile ingineresti. Acest comportament este influențat de diferiți factori precum, textura suprafeței, duritatea materialului, rigiditate sistemului, proprietățile chimice, scările de lungime ce variază de la nano la macro și scara de timp asociată cu viteza de alunecare. Comportamentul materialelor în timpul procesului de frecare a fost intens studiat de Bowden și Tabor, care au examinat impactul mai multor factori, inclusiv temperatura, sarcina, durata de încărcată, geometria și orientarea moleculară a celulelor unitare de polimer.

Pentru modelarea fenomenului s-a folosit modelul lui Zuleeg [Zuleeg ,2015] pentru coeficientul de frecare în cazul mișcărilor de alunecare cu schimbări de sens al mișcării. Zuleeg îl folosește pentru a evidenția mișcarea de stick-slip pe modelul clasic din Fig. 4.1.

Unde pe o bandă se deplasează cu viteză constantă V_2 iar pe bandă este așezată o greutate m (kg) legată de un suport fix printr-un element elastic cu rigiditate k (N/m).

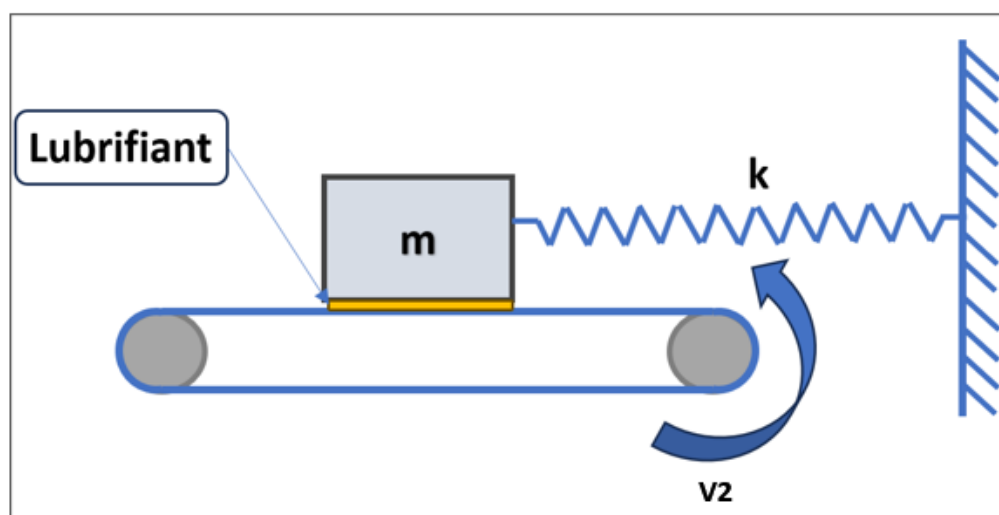


Fig. 4.1 – Modelul clasic de stick-slip

m – masa, k – rigiditatea arcului, V_2 - viteza benzii [prelucrare Zuleeg, 2015]

Modelul propus de Zuleeg utilizează pentru coeficientul de frecare dinamic (cinetic) dintre masă și bandă un model de tip Stribeck cu următoarea expresie:

$$\mu_k(v_a) = \text{sign}(v_a) \cdot \left[|v_a| \cdot a_1 + a_2 + a_3 \cdot e^{\frac{-|v_a|}{a_4}} \right] \quad (4.1)$$

unde:

$a_1[\frac{s}{m}]$, a_2 , a_3 , $a_4[\frac{m}{s}]$ – constante, a_2 și a_3 fiind adimensionale;

$v_a = V_2 - \dot{x}$ – viteza de alunecare dintre greutate și placa de sticlă;

V_2 este viteza de antrenare dată de masa liniară a tribometrului;

$\dot{x} = dy/dt$ fiind viteza de deplasare a greutății în procesele de alunecare.

Pentru $v_a = 0$ coeficientul de frecare static este $\mu_s = a_2 + a_3$, iar a_1, a_2, a_3 , și a_4 sunt parametri care depind de contactul dintre materiale, rigiditate arcului și viteza liniară a benzii.

Dacă frecarea este uscată creșterea are loc până la o valoare stabilă, mai mică decât cea corespunzătoare coeficientului de frecare static.

Modelul evidențiază faptul că modul de variație a coeficientului de frecare cinetic la viteze mici de alunecare este hotărâtor în dezvoltarea fenomenului de stick-slip.

Ecuția diferențială a sistemului elastic cu un singur grad de libertate pentru sistemul prezentat în figura 4.1 după modelul matematic propus de Zuleeg este:

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = F_r(V_2 - \dot{x}) \quad (4.2)$$

unde:

$\ddot{x}$ și $\dot{x}$ reprezintă accelerația și, respectiv, viteza masei **m**;

x reprezintă distanța pe care o parcurge masa **m** față de un reper fix stabilit la momentul inițial ($t = t_0$).

Conform legii lui Coulomb forța de frecare este notată cu F_r și se dezvoltă în interacțiunea dintre masa **m** și bandă și are următoarea expresie:

$$F_r(V_2 - \dot{x}) = \mu_k(V_2 - \dot{x}) \cdot m \cdot g \quad (4.3)$$

unde:

g – este accelerația gravitațională.

Utilizând parametrii $a_1 = 1s/m$; $a_2 = 0.1$; $a_3 = 0.3$; $a_4 = 0.1m/s$, se integrează ecuația diferențială (4.4) și se obține variația deplasării x și a vitezei masei, $\dot{x}$, în funcție de timp, cum se poate observa în figura 4.6, rezultând o mișcare tipică de stick-slip.

Prin înlocuirea lui $\dot{x}$ cu $\frac{dx}{dt}$, ecuația 4.1 devine:

$$\mu_k \left(V_2 - \frac{dx}{dt} \right) = \text{sign} \left(V_2 - \frac{dx}{dt} \right) \cdot \left[\left| V_2 - \frac{dx}{dt} \right| \cdot a_1 + a_2 + a_3 \cdot e^{\frac{-|V_2 - \frac{dx}{dt}|}{a_4}} \right] \quad (4.4)$$

Combinând ecuația (4.3) cu ecuația (4.4) rezultă următoarea ecuație diferențială:

$$m \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + k \cdot x = \text{sign} \left(V_2 - \frac{dx}{dt} \right) \cdot \left[\left| V_2 - \frac{dx}{dt} \right| \cdot a_1 + a_2 + a_3 \cdot e^{\frac{-|V_2 - \frac{dx}{dt}|}{a_4}} \right] \cdot m \cdot g \quad (4.5)$$

Se împarte prin masa **m** și rezultă:

$$\left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + \frac{k}{m} \cdot x = \text{sign} \left(V_2 - \frac{dx}{dt} \right) \cdot \left[\left| V_2 - \frac{dx}{dt} \right| \cdot a_1 + a_2 + a_3 \cdot e^{\frac{-|V_2 - \frac{dx}{dt}|}{a_4}} \right] \cdot g \quad (4.6)$$

Cei patru parametri incluși în modelul Zuleeg ai coeficientului de frecare cinetică (a_1, a_2, a_3 și a_4) au fost selectați pentru a obține o bună aproximare între rezultatele experimentale și rezultatele simulate.

4.1.1. Modelarea variației coeficienților de frecare cu viteza de alunecare.

Rezultatele teoretice realizate conform modelului lui Zuleeg se bazează pe experimentele efectuate între o laveta de șters ochelarii și suprafața de sticlă la o viteză de 0.4mm/s, respectiv 1mm/s.

A fost creat un cod în Matlab pentru simularea comportamentului acestui sistem mecanic, folosind modelul Zuleeg, încorporând frecarea cinetică caracterizată de curba Stribeck. Pașii cheie în simulare includ: setarea constantelor de integrare și a parametrilor sistemului, definirea curbei Stribeck pentru frecare cinetică și utilizarea integrării numerice pentru a rezolva ecuațiile diferențiale ale sistemului.

În figura 4.2 sunt prezentate atât variația experimentală cât și cea simulată a deplasării greutății x în funcție de timp, pentru o viteză a plăcii de sticlă de 0.4 mm/s.

Integrarea ecuației diferențiale (4.6) s-a realizat cu următoarele valori: $a_1=26.7$ s/m, $a_2=0.01$, $a_3=0.21$ și $a_4=0.008$ m/s. Alegerea constantelor a_2 și a_3 s-a făcut pornind de la premiza că la finalul fazei de aderență, viteza de alunecare este zero iar coeficientul de frecare statică $\mu_s = a_2 + a_3 = 0.22$ conform diagramei din Fig.4.3. [Chiriac et al., 2022]

De asemenea, în Fig. 4.2 se prezintă viteza de alunecare a greutății, cu valoare zero pe durata adeziunii și cu un salt la valoarea de -0.00043 m/s, opusă vitezei mesei tribometrului și cu valoare foarte apropiată de viteza de antrenare de 0.0004m/s, viteza ce se menține constantă sugerând alunecarea greutății pe sticlă. Tot în Fig. 4.2 este reprezentată și variația coeficientului de frecare cinetic în funcție de viteza de alunecare. Graficul arată o creștere continuă a coeficientului de frecare cinetică. Pentru viteza de alunecare de aprox. 0.0004 m/s coeficientul de frecare crește de la 0.22 până la 0.23, așa cum se poate vedea și în Fig. 4.3.

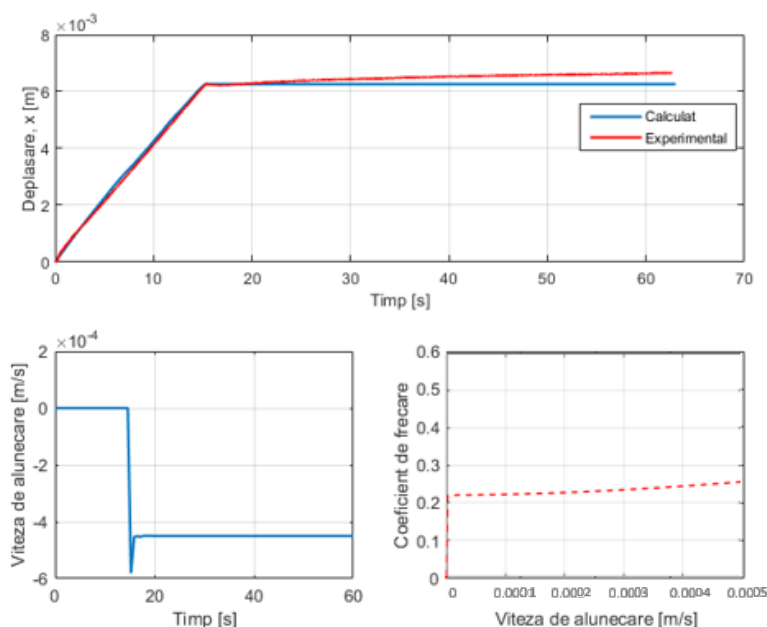


Fig. 4.2 – Suprapunerea graficelor experimentale și teoretice de variație a deplasării masei în timp, precum și reprezentarea vitezei cilindrului și a variației coeficientului de frecare cu viteza de alunecare, pentru viteza mesei tribometrului de 0.4 mm/s.

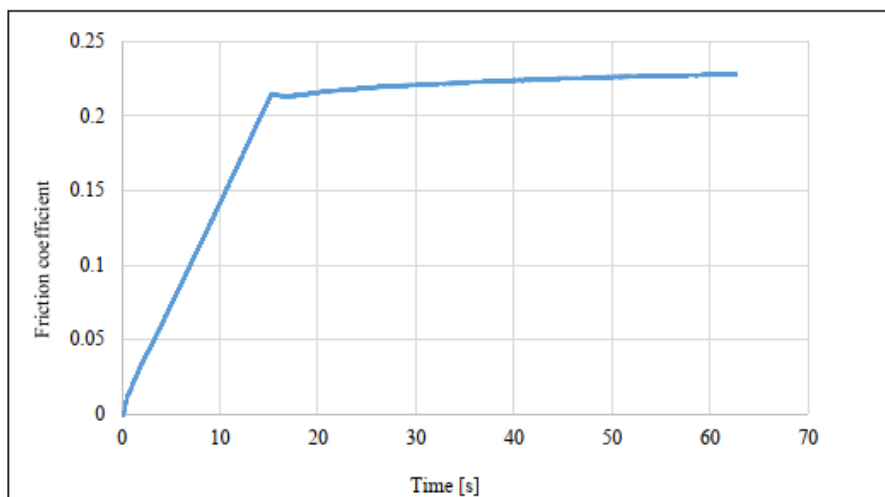


Fig. 4.3 – Coeficientul de frecare în funcție de timp, pentru viteza mesei tribometrului de 0.4 mm/s.

În figura 4.3 este prezentată trecerea de la coeficientul de frecare static la coeficientul de frecare cinetic obținută prin experiment. Se poate observa că coeficientul dinamic a variat între 0.22 și 0.23, similar cu valoarea menționată mai sus. De asemenea, ca o curiozitate, coeficientul dinamic pentru această viteză poate fi considerată o valoare constantă.

În figura 4.4 sunt prezentate atât variația experimentală cât și cea teoretică a deplasării greutății, x , în funcție de timp, pentru viteza a mesei tribometrului de 1 mm/s. Simularea a fost realizată cu următorii parametri $a_1=145\text{s/m}$, $a_2=0.13$, $a_3=0.001$ și $a_4=20\text{m/s}$. Când suprafețele de contact sunt în fază de aderență, viteza de alunecare = 0, $\mu_s = a_2 + a_3$, înseamnă că simularea a fost făcută pentru $\mu_s = 0.13$. [Chiriac et al., 2022]

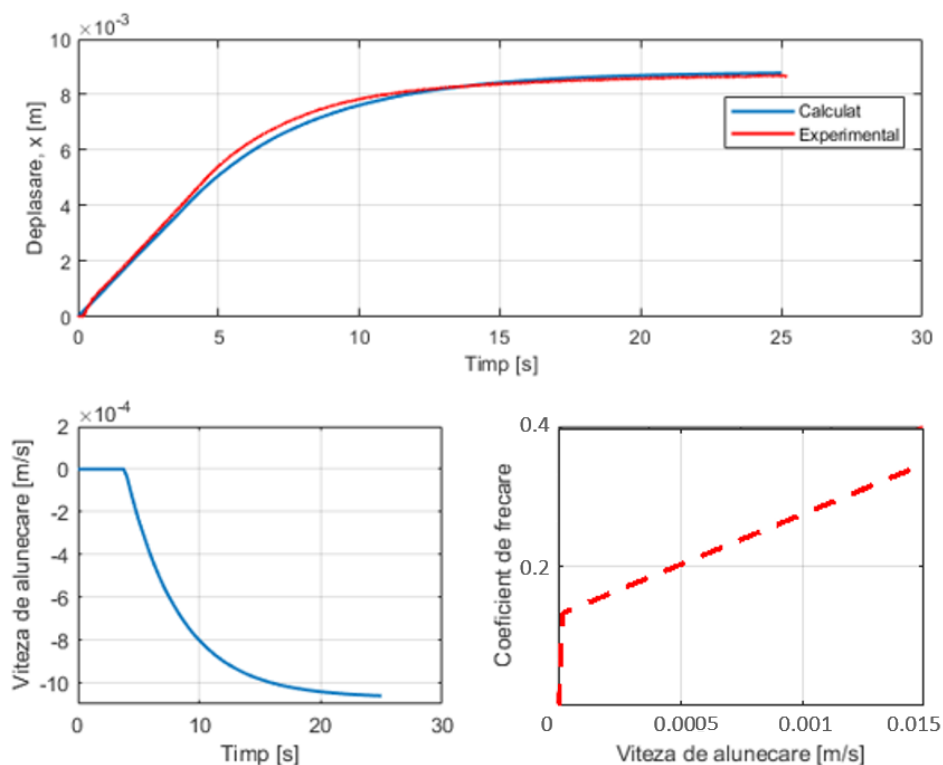


Fig. 4.4 – Suprapunerea graficelor experimentale și teoretice de variație a deplasării masei în timp, precum și reprezentarea vitezei cilindrului și a variației coeficientului de frecare cu viteza de alunecare, pentru viteza mesei tribometrului de 1 mm/s.

Analizând cele două modele de simulare a fenomenului de stick slip se poate constata ca modelul propus de Zuleeg prezintă o corelație bună între testele experimentale și cele calculate pentru vitezele de 0.4 mm/s și 1 mm/s, deși cei 4 parametri a_1 , a_2 , a_3 și a_4 sunt aleși destul de greu în special la viteze mici, chiar dacă fenomenul de stick slip este estompat de creșterea vitezei. În [Oprișan et al., 2022] sunt prezentate două simulări care prezintă fenomenul de stick slip, utilizând aceeași procedură dar cu valori diferite ale coeficienților a_1 - a_4 .

4.2. Modelarea alunecării utilizând relația lui Leine.

Pe baza testelor efectuate și exemplificate în capitolul 3, au fost modelate diferite cazuri pentru coeficienții de frecare statică și dinamică utilizând relațiile propuse de Leine. [Leine et al., 1989]

În Figura 4.5 sunt prezentate diagramele de variație a forței de frecare (aderență) F_x între lavetă și sticlă pentru deplasarea mesei de $Y = 25$ mm. Viteza de deplasare a mesei tribometrului a variat între 0.05 și 8 mm/s. Punctele de la A0.05 la A0.8 indică forțele maxime de aderență dintre lavetă și sticlă, pentru viteze de 0.05 până la 0.2 mm/s, respectiv. De asemenea, B4, B6 și B8 indică variația constantă a forței de frecare de alunecare pentru viteza mesei de 4, 6 și, respectiv, 8 mm/s.

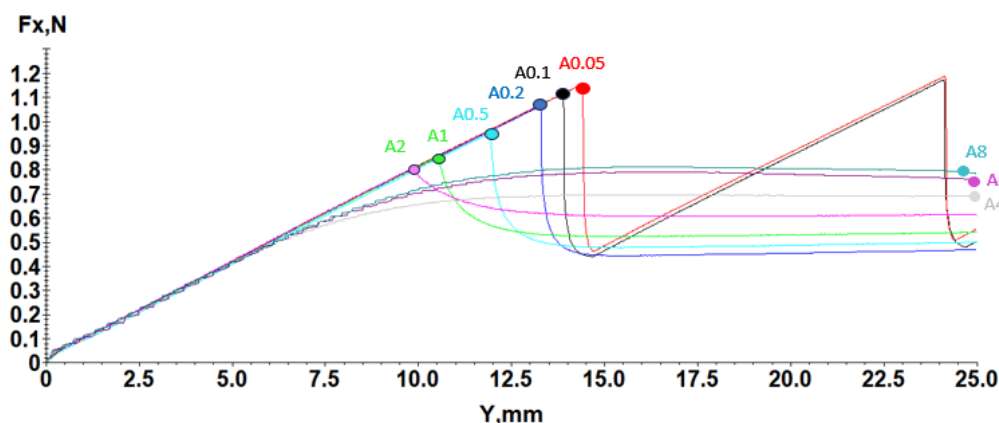


Fig. 4.5 – Variația forței F_x cu deplasarea mesei tribometrului Y

Din figura 4.5 pot fi observate trei procese distincte:

- (1) Pentru viteza de 0.05 se poate observa prezența procesului stick-slip.
- (2) Prin creșterea vitezei liniare de la 0.2 la 2 mm/s variația forței de frecare se caracterizează printr-un singur vârf urmat de o scădere importantă a forței de frecare. Dacă masa cilindrului este constantă, înseamnă o scădere importantă a coeficientului de frecare de la valorile statice (corespunzând punctelor de vârf A) la valorile cinetice (corespunzătoare forței de frecare constantă). Coeficientul de frecare statică și coeficientul de frecare cinetică, corespunzător zonei staționare, se determină ca raport între forța tangențială F_x și sarcina normală generată de cilindrul de alunecare G și transmisă suprafeței de sticlă prin materialul moale subțire.
- (3) Prin creșterea vitezei liniare peste 1 mm/s nu s-a evidențiat o scădere bruscă a forței de frecare, dimpotrivă, se observă o creștere continuă a forței de frecare până la o anumită limită (vezi B4, B6 și B8). Tranziția dintre procesul de aderență și cel de alunecare este caracterizată printr-o creștere continuă a coeficientului de frecare odată cu începerea alunecării dintre suprafețele de contact.

4.2.1 Analize ale coeficientului de frecare static

După cum se poate observa, coeficienții de frecare statică (corespunzător punctelor A) au o scădere odată cu creșterea vitezei de translație a mesei tribometrului, ceea ce înseamnă o dependență de timpul de aderență [Pitenis et al., 2014, Leine et al., 1998].

Conform rezultatelor prezentate în Fig. 4.5 au fost determinate valorile coeficienților de frecare statică pentru punctele A0.05 până la A0.8 și s-au obținut valorile între 0.48 și, respectiv, 0.33.

Coeficienții de frecare statică corespunzători celei de-a treia faze au fost determinați ca puncte de separație între deplasarea liniară a mesei tribometrului și variația curbei forței tangențiale F_x . Luând în considerare deplasarea liniară a mesei tribometrului și deplasarea cilindrului prin alunecare, s-a obținut timpul corespunzător punctului de separare dintre adeziune și începutul alunecării.

În Fig. 4.6 este prezentat punctul de separație pentru o viteză liniară de 8mm/s și s-a obținut un timp de 1,1 secunde de la începutul experimentului. În funcție de dependența dintre F_x și timp, s-au determinat valorile coeficientului de frecare static pentru viteza liniară de 4, 6 și 8 mm/s și s-au obținut următoarele valori: 0.32; 0.22 și respectiv 0.20.

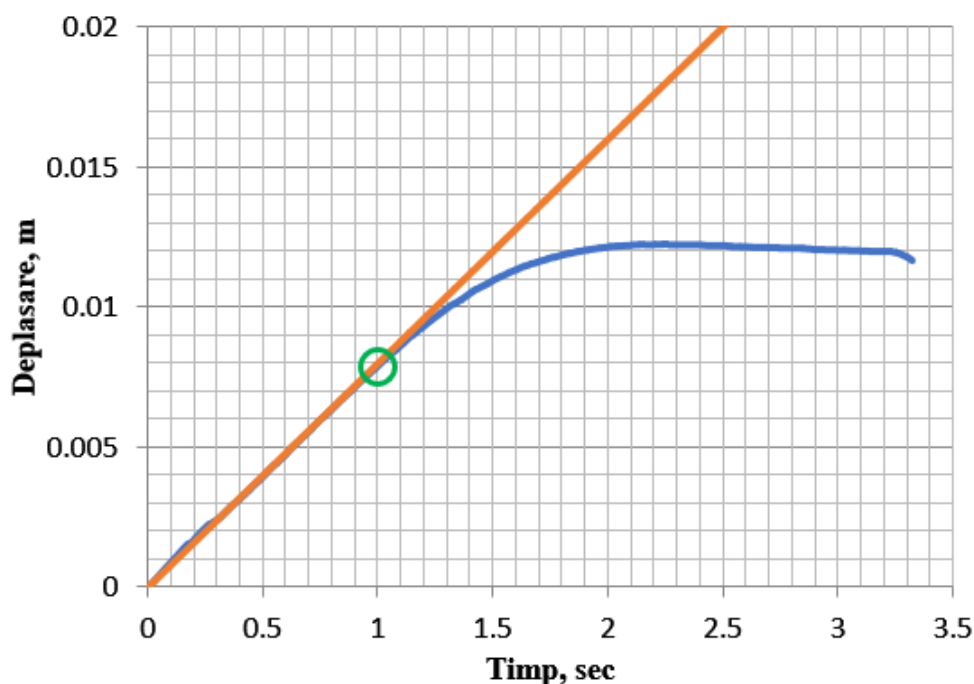


Fig. 4.6 – Punctul de pornire al alunecării cilindrului la viteza liniară a mesei tribometrului de 8 mm/s

Pentru variația coeficienților de frecare statică în funcție de timpul de staționare (de adeziune, în cazul de față), a fost propusă următoarea ecuație a lui Leine [Leine et al., 1998]:

$$\mu_s(t) = \mu_0(1 + (\beta - 1) \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot t})) \quad (4.7)$$

unde $\mu_{s,\infty}$ este coeficientul de frecare static pentru o viteză liniară de 0.05 mm/s, iar $\mu_{s,0}=0.20$ este coeficientul de frecare static pentru o viteză liniară de 8 mm/s la timpul de 1.1 secunde. S-a considerat $\mu_{s,\infty} = 0.48$ ca fiind coeficientul de frecare static pentru un timp de aderență de 288 secunde, obținut la viteza liniară minimă de 0.05 mm/s. Pentru exponentul α a fost obținută valoarea de 0.051, care aproximează cel mai bine valorile experimentale.

În fig. 4.7 sunt prezentate atât valorile experimentale pentru coeficienții de frecare statică, cât și valorile corespunzătoare relației (4.1) cu valorile parametrilor prezentați mai sus.

$$\mu_s(t) = 0.20 \cdot [1 + 0.24 \cdot (1 - e^{(-0.051 \cdot t)})] \quad (4.8)$$

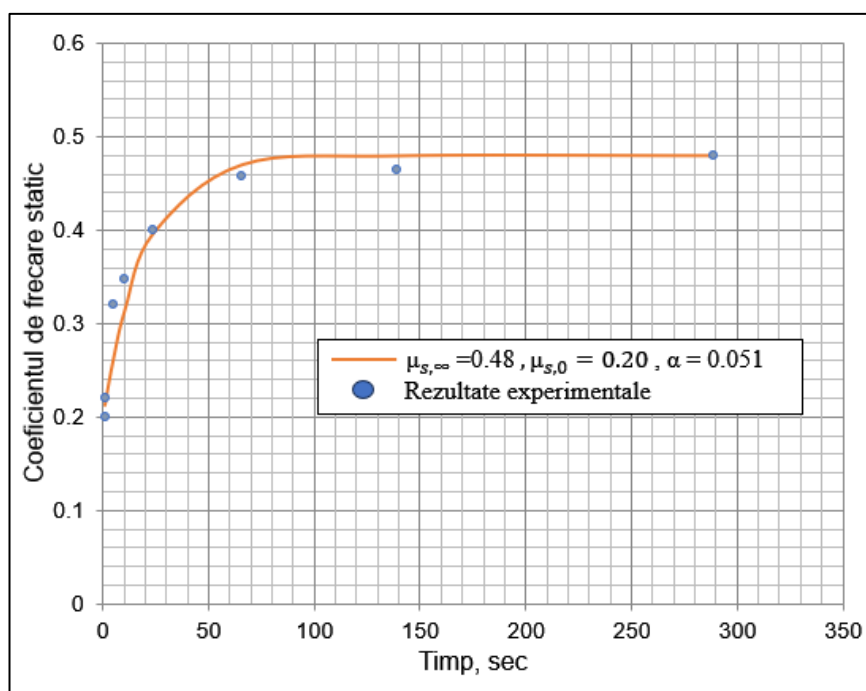


Fig. 4.7 – Variația coeficientului de frecare statică cu timpul staționar

Ca o primă concluzie se poate considera că valorile coeficientului de frecare static între laveta din microfibră și sticlă are o variație cu timpul de aderență, conform relației lui Leine [Leine et al.,1989]

4.2.2. Analize ale coeficientului de frecare cinetică

Cu excepția vitezelor în care se dezvoltă fenomenul de stick-slip, începând de la viteza liniară de 0.2 mm/s variația coeficientului de frecare cinetică are un comportament diferit față de cel obișnuit în ingineria mecanică, după cum se poate observa în Fig. 4.5. Prin urmare, așa cum a fost prezentat în paragraful 3, între 0.2 și 2 mm/s după scăderea bruscă a coeficientului de frecare de la static la cinetic, coeficienții de frecare cinetică au valori constante corespunzătoare unei alunecări totale dintre lavetă și sticlă.

La creșterea vitezei liniare a mesei tribometrului peste 4 mm/s se pot observa trei faze distincte:

- (i) o fază de adeziune între lavetă și sticlă;
- (ii) un început de creștere a alunecării între lavetă și sticlă cu creșterea uniformă a coeficientului de frecare cinetică;
- (iii) o fază de alunecare cu un coeficient de frecare cinetică constant.

Variația coeficientului de frecare cinetică constantă față de vitezele de alunecare ale mesei pentru vitezele 0.2mm/ până la 8 mm/s a fost prezentată în Fig. 4.8. Se poate observa o creștere a coeficientului de frecare cinetică prin creșterea vitezei liniare a mesei tribometrului.

Se propune pentru variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza liniară a mesei o relație similară ca și pentru coeficientul de frecare static, adică o relație de tip Leine:

$$\mu_k(v) = \mu_0(1 + (\beta_k - 1) \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot v})) \quad (4.9)$$

unde v este viteza mesei în mm/s, $\mu_{k,\infty}$ este coeficientul de frecare cinetică pentru o viteză liniară de 8 mm/s, $\mu_{k,0}$ este coeficientul de frecare cinetică pentru o viteză liniară de 0.2 mm/s, $\beta_k = \mu_{k,\infty}/\mu_{k,0}$ iar exponentul $\gamma = 0.4$.

În figura 4.8 se poate observa o corelație bună între valorile experimentale ale coeficienților de frecare cinetică și valorile obținute prin modelul propus.

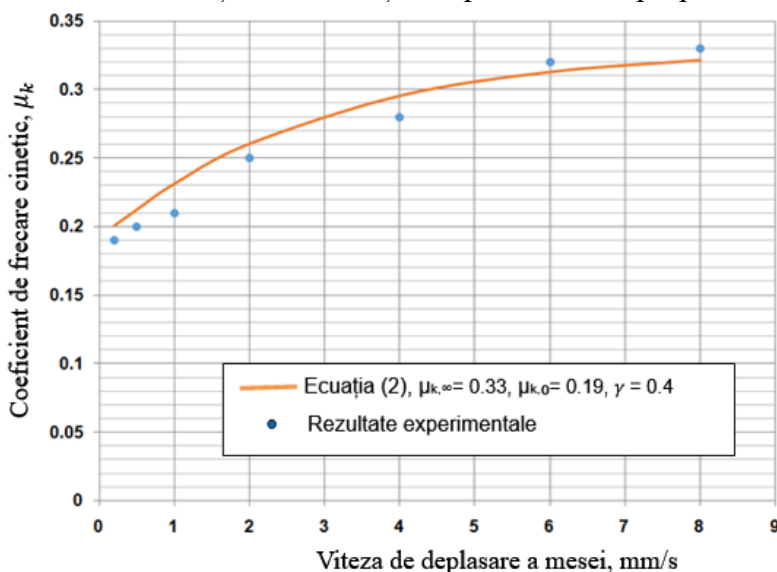


Fig. 4.8 – Variația coeficientului de frecare cinetică cu viteza mesei tribometrului în procesul de alunecare.

Pentru determinarea variației coeficientului de frecare cinetic ca funcție de viteză de alunecare pentru viteza mesei tribometrului între 4 și 8mm/s s-au parcurs următoarele etape:

În această secțiune este exemplificată metodologia adaptată la viteza liniară de 8mm/s.

- 1) Variația deplasării mesei cilindrului în perioada dintre punctul de pornire al alunecării (1,1 sec) până la timpul uniform de alunecare (3.3 sec) s-a obținut ca raport între forța tangențială F_x și rigiditatea sistemului elastic k . În figura 4.9 este prezentată variația deplasării cilindrului $y(t)$ în funcție de timp pentru viteza liniară de 8mm/s. Pentru valorile obținute s-a propus o variație similară relației lui Leine:

$$x(t) = x_o \cdot [1 + (\beta_y - 1) \cdot (1 - e^{-\alpha(t-1.1)})] \quad [m] \quad (4.10)$$

unde x_o este valoarea lui x la momentul desprinderii ($t = 1.1$ secunde), $\beta_y = x_{max}/x_o$ iar x_{max} este valoarea maximă a lui x (pentru $t = 3.3$ secunde).

Impunând valorile obținute experimental $x_o = 0.0086$ m și $x_{max} = 0.012$ m și alegând pentru exponentul $\alpha = 3.5$ s⁻¹ s-a obținut o funcție de aproximare a cărei grafic, colorat în roșu, se suprapune cu suficientă precizie peste curba determinată experimental, așa cum se vede în Fig.4.9.

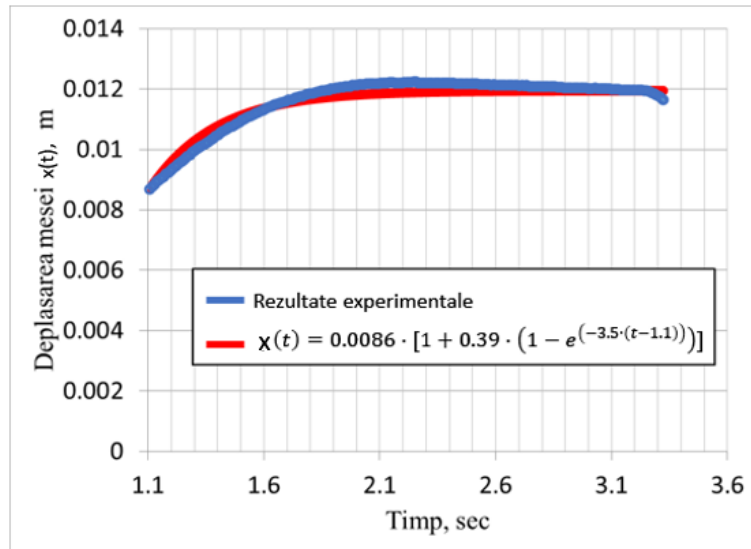


Fig. 4.9 – Deplasarea mesei de la începutul alunecării până la alunecarea completă la viteza mesei de 8 mm/s. Rezultate experimentale și ecuația de aproximare tip Leine

2. S-a calculat viteza de alunecare dintre cilindru și placa de sticlă utilizând relația $v_s = 0.008 - dx/dt$ [m/s]

S-a obținut următoarea relație:

$$v_s(t) = [0.008 - 0.01174 \cdot (e^{(-3.5 \cdot (t-3.85))})] \quad [\text{m/s}] \quad (4.11)$$

3. Determinarea accelerației cilindrului s-a obținut prin derivarea vitezei rezultând:

$$\ddot{x}(t) = 0.0411 \cdot (e^{(-3.5 \cdot (t-3.85))}) \quad [\text{m/s}^2] \quad (4.12)$$

În figura 4.10 sunt prezentate viteza de alunecare și accelerația cilindrului de la începutul alunecării până la terminarea testului.

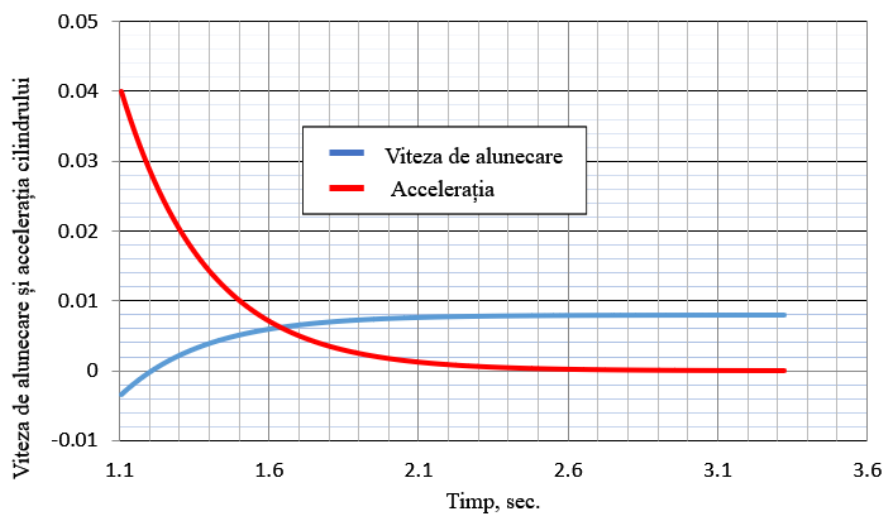


Fig. 4.10 – Variația vitezei de alunecare și a accelerației cilindrului, de la începutul alunecării până la alunecarea completă, la viteza mesei de 8mm/s.

Conform relațiilor (4.4) și (4.5) se poate observa că viteza de alunecare are o creștere de la 0.008m/s pe o perioadă de o secundă. Accelerația are o descreștere până la 0, ceea ce ne confirmă alunecarea uniformă a cilindrului pentru o viteză a mesei liniare de 8mm/s.

4. Determinarea variației coeficienților de frecare cinetică a fost realizată cu ajutorul ecuației (4.11) pentru timpul dintre 1.1 și 3.2 secunde. A fost obținută o creștere a coeficientului de frecare cinetic de la 0.24 la 0.35. În figura 4.11 este prezentată variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de timp, pentru viteza mesei liniare de 8mm/s.

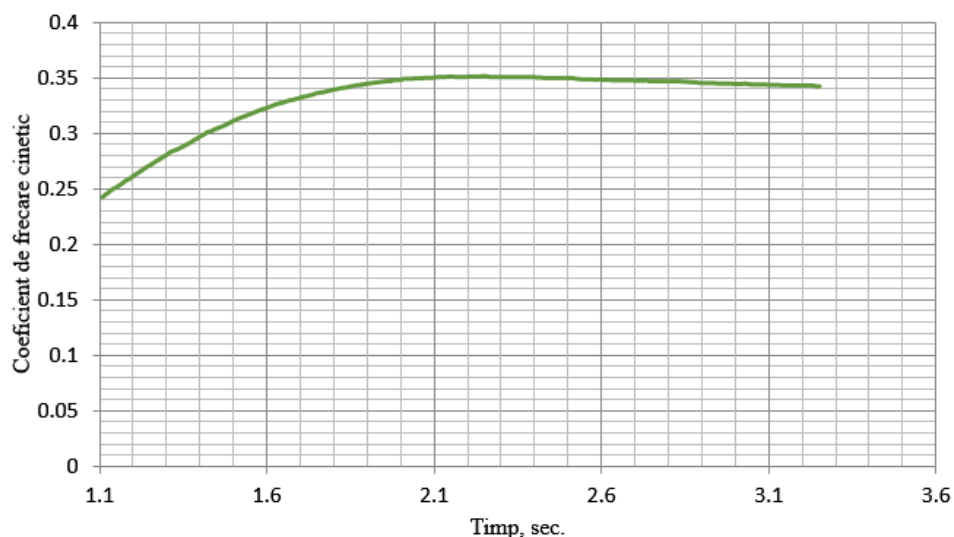


Fig. 4.11 – Variația coeficienților de frecare cinetică în funcție de timp pentru viteza de 8mm/s

Se poate observa o fază de creștere a coeficientului de frecare cinetică în prima perioadă de la 0.24 la 0.35 ultima valoare reprezintă o limită de alunecare completă până la finalul testului.

5. Pentru determinarea variației coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare, coeficienții de frecare cinetică prezentați în figura 4.12 au fost corelați, pentru fiecare timp de alunecare, cu viteza de alunecare. Rezultatele sunt prezentate în figura 4.12.

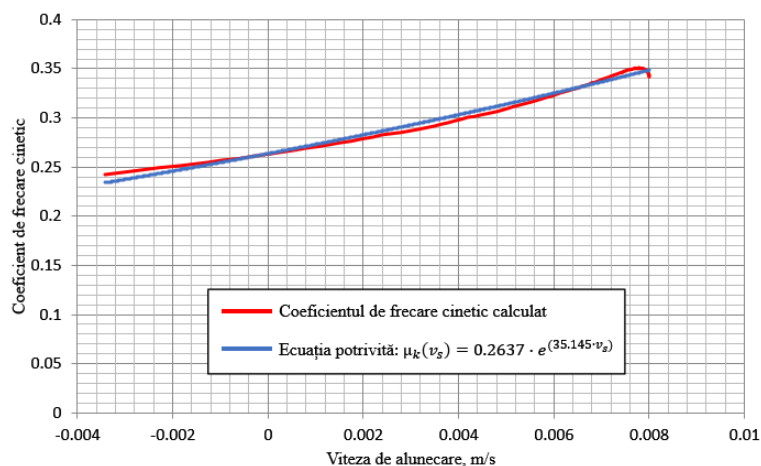


Fig. 4.12 – Variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare

Pentru variația coeficientului de frecare cu viteza de alunecare s-a găsit, prin interpolare, o funcție exponențială dată de relația:

$$\mu_k(v_s) = 0.2636 \cdot (e^{(35.145 \cdot v_s)}) \quad (4.13)$$

4.3 Concluzii

Frecarea dintre un material moale (lavetă pentru ștergerea sticlei) și o suprafață plană de sticlă, în condiții uscate, are comportamente multiple, în funcție de viteza liniară a suprafeței sticlei.

Astfel, în experimentele noastre au fost obținute trei faze: (i) o fază cu stick-slip la viteză foarte mică a mesei; (ii) o fază cu aderență urmată de o perioadă de alunecare bruscă până la o viteză de alunecare constantă continuă și (iii) o fază cu un tranzit lent de la aderență la alunecare cu o creștere continuă a coeficientului de frecare cinetică până la o alunecare totală pe suprafața sticlei .

Pentru coeficienții de frecare statică obținuți în toate cele trei faze s-au obținut variația în funcție de timpul de aderență conform modelului Leine.

De asemenea, coeficienții de frecare cinetică cresc la creșterea vitezei mesei. Și în acest caz s-a propus o funcție de tip Leine prin care se poate reprezenta variația coeficientului de frecare cinetic în funcție de viteza de deplasare a mesei tribometrului.

În final sa determinat variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare si s-a obținut o creștere exponențială. Astfel, s-a validat faptul că la creșterea coeficientului de frecare cinetic cu viteza de alunecare nu se dezvoltă fenomenul de stick-slip.

CAPITOLUL 5 – DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FRECAREA DINTRE CAUCIUC ȘI STICLĂ ÎN CONDIȚII USCATE ȘI ÎN PREZENTA UNOR FLUIDE.

5.1 Frecarea uscată a lamelor de cauciuc pe sticlă, pentru viteze și încărcări diferite;

În ultimii ani au fost aduse numeroase contribuții în domeniul studiului tribologic privind importanța frecării dintre sticlă și cauciuc.

Un volum semnificativ de literatură a apărut în ultimii ani, concentrându-se mai ales pe modelarea numerică a componentelor de frecare, cu accent deosebit pe aspectul histerezis al frecării.

Acest capitol se concentrează pe studierea suprafețelor din cauciuc și sticlă, materiale des întâlnite în contact în lumea ingineriei. Amintim ștergătorul de parbriz care alunecă pe parbrizul mașinii, frecarea dintre geamul mașinii și banda de cauciuc care împiedică pătrunderea apei în interiorul mașinii, micro alunecările dintre geamul clădirilor și banda de cauciuc. Toate aceste lucruri duc la uzarea materialelor, efectul sonor al acestor.

În concluzie, explorarea cuprinzătoare a dinamicii lamelor ștergătoare implică luarea în considerare a unghiurilor de atac, a caracteristicilor de frecare, a efectelor lubrifierii și a condițiilor de mediu. Analizele experimentale și numerice contribuie la o înțelegere mai profundă a interacțiunilor complexe dintre lamelele ștergătoare și parbrize, având ca scop îmbunătățirea performanței sistemului de ștergătoare și reducerea zgomotului și vibrațiilor pentru o experiență de conducere mai bună.

În fig. 5.1. se prezintă tribosistemul construit cu un suport special adaptat realizat pe o imprimantă 3d. Suportul a fost proiectat pentru a prinde lamela de cauciuc. Pinul folosit este unul cu lamele pentru amortizare, testele au fost realizate la diferite încărcări.

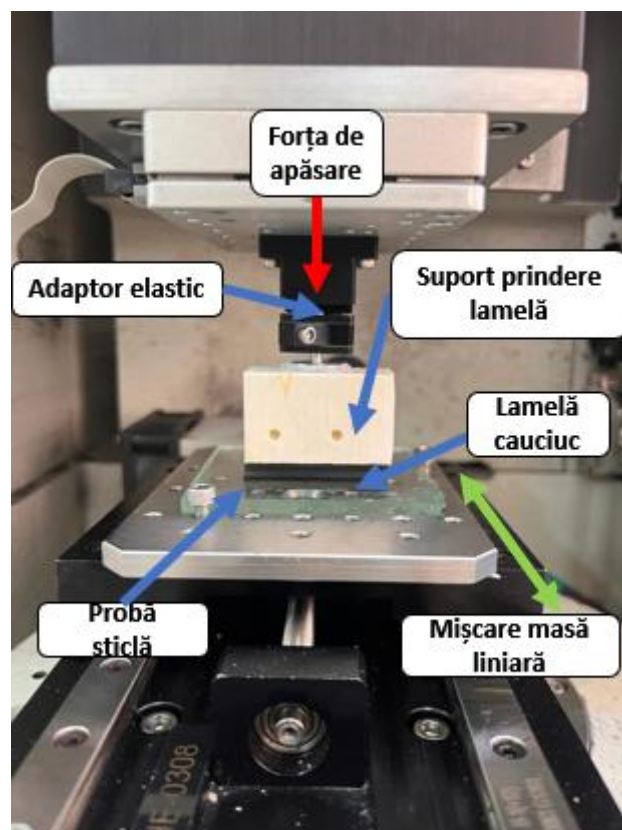


Fig. 5.1 – Tribosistem cu suport de sticlă și lamelă de cauciuc

Au fost realizate testări pe masa liniară, în care pinul are fixată în capăt o lamelă de cauciuc, iar pe masa liniară a tribometrului este fixată o placă de sticlă. Modificând înălțimea lamelei de cauciuc prin mărirea treptată a forței de apăsare, au fost măsurate forțele de frecare dintre lamelă și placa de sticlă. Analiza a inclus studierea influenței vitezei, a distanței de deplasare și a încărcării asupra coeficientului de frecare.

Pentru apăsări mai mari de 2 mm/z, lamela prezintă deformări mult prea mari pentru a valida testele. Astfel s-au stabilit ca testele să fie efectuate cu apăsare maximă de 1.5mm/z.

Rezultatele obținute au fost analizate în scopul înțelegerii modului în care prezența diferitelor lichide afectează coeficienții de frecare, rezistența la alunecare și alte aspecte ale comportamentului tribologic al cauciucului în contact cu sticla. Această abordare oferă informații valoroase cu privire la performanța și durabilitatea sistemelor de ștergere a parbrizului în condiții variate de utilizare și de mediu.

În figurile 5.2- 5.4 sunt prezentate diferite diagrame privind variația forțelor de frecare în funcție de diverse tipuri de lubrifianți și de viteza de deplasare a mesei tribometrului.

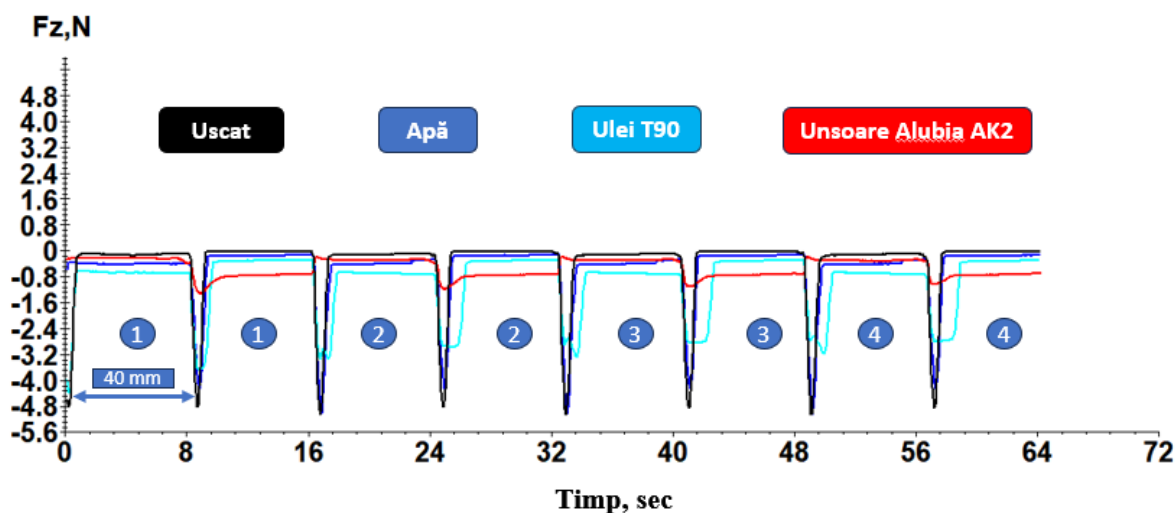


Fig. 5.2 – Variația forței F_z în funcție de timp și de tipul de lubrifiant. La viteza de 5 mm/s și cu o apăsare a lamei de 0.5mm/z.

Se poate observa că în prezenta unsoarii avem cea mai mică forță F_z de până la 0.5N. Când se schimbă direcția lamei, forța prezintă o ușoară creștere, de până la 0.8N, pe când în mediu uscat putem observa o creștere a forței de până la 4.8N.

În figura 5.3, a fost mărită viteza de deplasare a mesei la 10mm/s pentru a observa influența vitezei asupra forței F_z . În mediul uscat și în cel cu apă, se observă că nu sunt modificări majore, pe când la testul efectuat în ulei se observă o scădere a forței de până la 1 N, comparativ cu viteza de 5mm/s, când forța de frecare este de 3.2N.

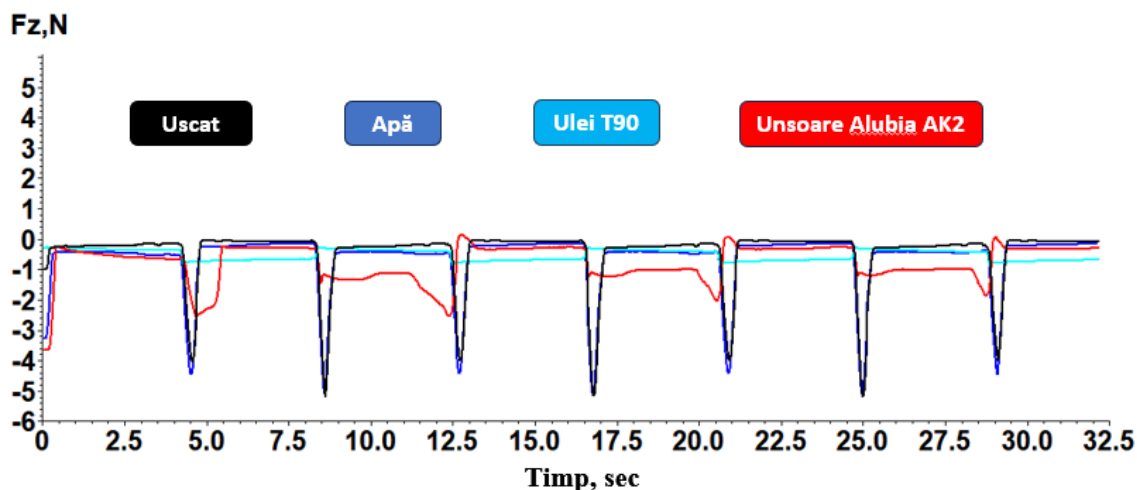


Fig. 5.3– Variația forței F_z în funcție de timp și de tipul de lubrifiant, la viteza de deplasare a mesei de 10 mm/s și cu o apăsare a lamei de 0.5mm/z.

În figura 5.4, se observă creșteri ale forței odată cu creșterea vitezei la 10mm/s, iar spre finalul testului apar paliere constante în cazul mediului cu apă.

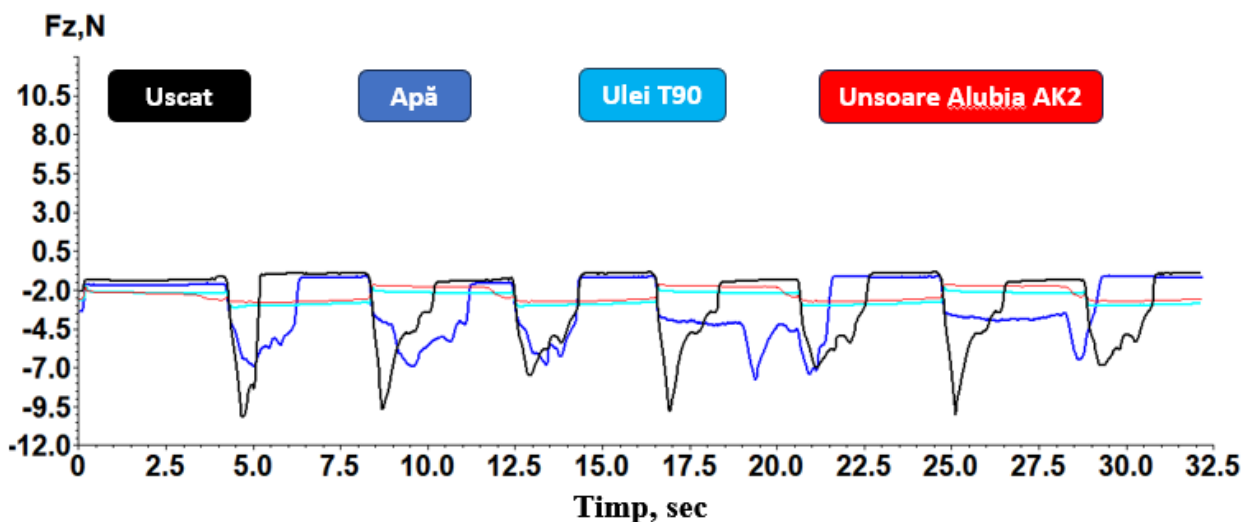


Fig. 5.4 – Variația forței F_z în funcție de distanță și tipul de lubrifiant, viteza de deplasare a mesei fiind de 10mm/s , iar apăsarea fiind de 1.5mm/z

5.2 Variația coeficientului de frecare

Coeficientul de frecare, pentru viteza de 5mm/s și pentru apăsarea de 0.5mm/z , prezintă o creștere de până la 9.4 în mediu uscat (fig. 5.5), în prezența apei scade la 0.6, iar cea mai importantă scădere apare în mediul cu ulei, cu valori maxime de 0.5.

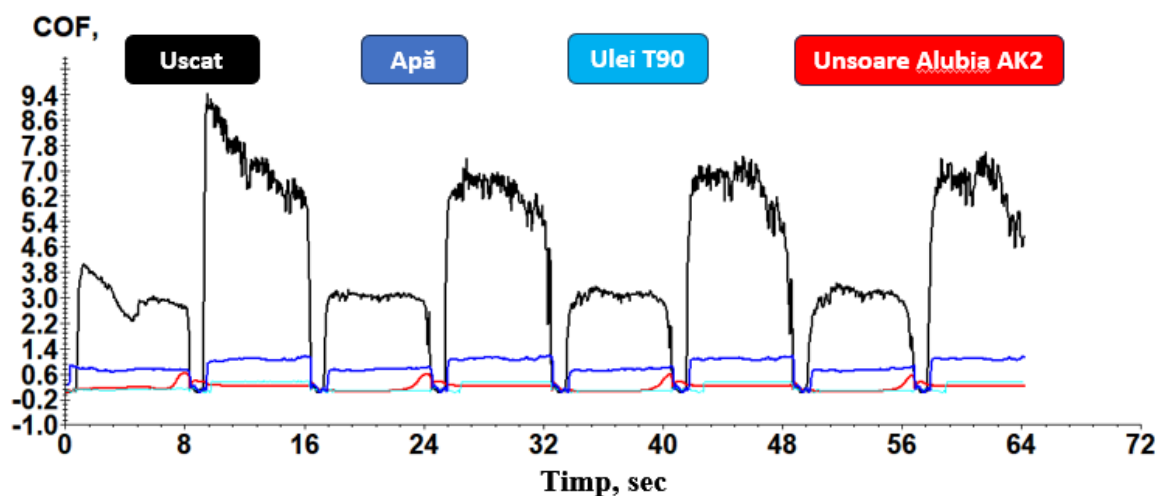


Fig. 5.5 – Variația coeficientului de frecare în funcție de distanță și tipul de lubrifiant. Pentru viteza de 5mm/s și încărcarea de 0.5mm/z .

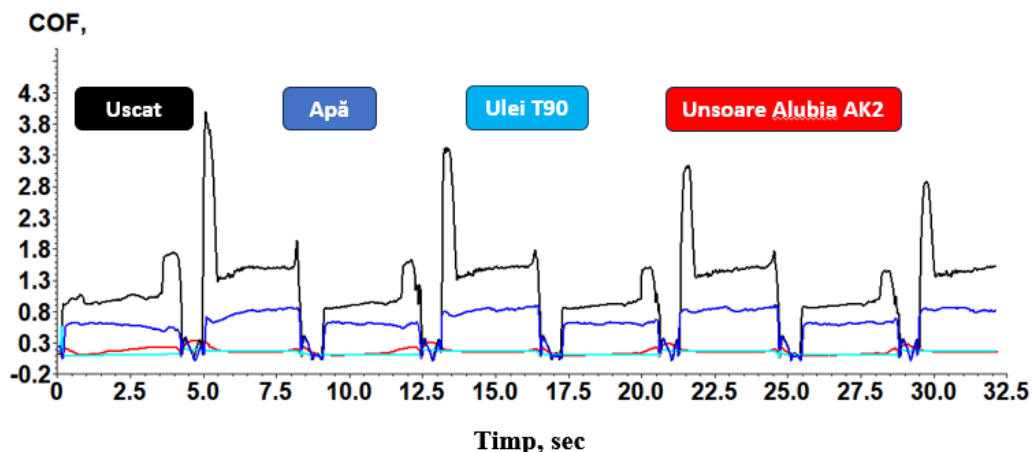


Fig. 5.6 – Variația coeficientului de frecare în funcție de distanța și tipul de lubrifiant. Pentru viteza de **10mm/s** și încărcarea de **0.5mm/z**.

La viteza de 10mm/s, coeficientul de frecare în mediul uscat are valori maxime de 1.8 și cu accentuări la schimbarea direcției. În mediu cu ulei și cu unsoare coeficienții sunt la valori constante iar trecerile sunt line cu valori mai mari decât la viteza de 5mm cauzate de frecarea vâscoasă, care crește odată cu creșterea vitezei.

5.4. Concluzii.

Pe baza rezultatelor obținute se pot desprinde următoarele concluzii:

1. Prezența diferiților lubrifianți în contactele dintre lamela de cauciuc și sticlă are un impact semnificativ asupra forței F_z și asupra coeficientului de frecare. Uleiul și unsoarea reduc considerabil aceste valori comparativ cu mediul uscat, contribuind la mișcări mai fluide și la reducerea uzurii și a zgomotului.
2. Atât viteza de deplasare pe orizontală cât și apăsarea lamelei influențează comportamentul tribologic. Astfel o creștere a vitezei și a apăsării conduc la creșteri ale forței F_z și ale coeficientului de frecare, însă lubrifianții pot atenua aceste efecte.
3. Fenomenul de stick-slip este evident în mediu cu apă la apăsări mari, ceea ce poate afecta performanța ștergătoarelor de parbriz. Lubrifianții ca unsoarea și ulei pot reduce acest fenomen, asigurând o funcționare mai constantă și eficientă.
4. Deși uleiul sau unsoarea nu pot fi utilizate în aplicațiile practice la ștergătoarele de parbriz din cauza scăderii vizibilității, cercetările efectuate au pus în evidență că prezența unui fluid incolor cu o vâscozitate mai mare puțin decât a apei și cu proprietăți de curățare, este soluția ideală pentru curățirea cu frecări minime a parbrizului la autovehicule.

CAPITOLUL 6 – DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND UZAREA STICLEI.

6.1. Uzarea sticlei de către materiale textile și fibre sintetice;

Sticla comercială cu o suprafață foarte netedă, caracterizată prin valori foarte mici ale rugozității care sunt de obicei de ordinul nanometrilor. Această rugozitate destul de mică se poate datora fie stării sale originale după procesul de formare, fie utilizării precise a unor tehnici delicate de lustruire. Pentru sticla plată sau sticla de geam, valorile rugozităților au fost cuantificate ca fiind cuprinse între 0.4 și 0.6 μm .

6.1.1 Uzarea sticlei de către materiale soft.

Pentru testele de uzură a fost folosită laveta din microfibră prinsă în suportul special pin - bilă, pentru creșterea presiunii de contact, conform Fig. 6.1-(a) Așa cum este ilustrat în figura 6.1, avem proba de sticlă, suportul cu amortizare pentru preluarea constantă a sarcinii aplicate, masa rotativă și o bila din oțel de 6.36 mm învelită cu lavetă, Fig. 6.1 (b)

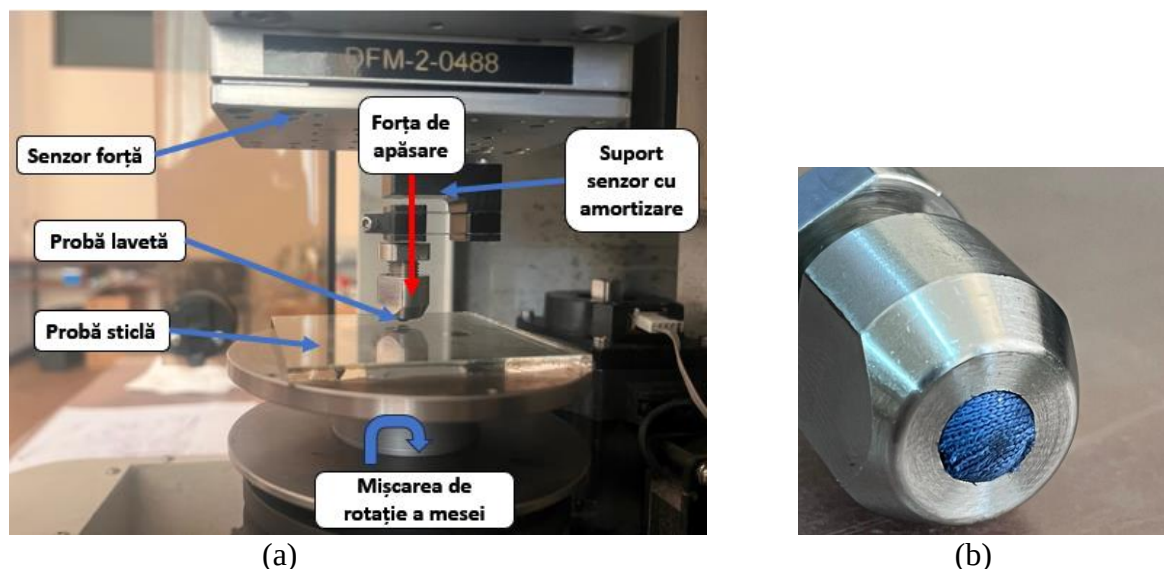


Fig. 6.1 – Tribosistemul realizat pentru uzarea sticlei cu lavetă, (a)- vedere generală,-(b) detaliu cu bila învelită în lavetă

Testele au fost realizate în condiții uscate la o turație de 60 rot/min, cu o forță de apăsare de 3N. Testele au durat 1h și 2h, interesul testelor este de a observa în timp comportamentul sticlei la uzare în contact cu laveta din microfibră la presiuni mari.

6.1.2. Rezultate experimentale obținute pe lavetă din microfibră.

În figura 6.2. se prezintă variația forței de frecare în raport cu timpul, cu culoarea roșie reprezintă testul cu durata de 1h iar cel cu albastru cu durata de 2h.

În ambele cazuri se constată o creștere a forței de frecare în raport cu timpul, pentru testul cu durata de 2h forța de frecare este mult mai mare, atingând valori de 1.3N.

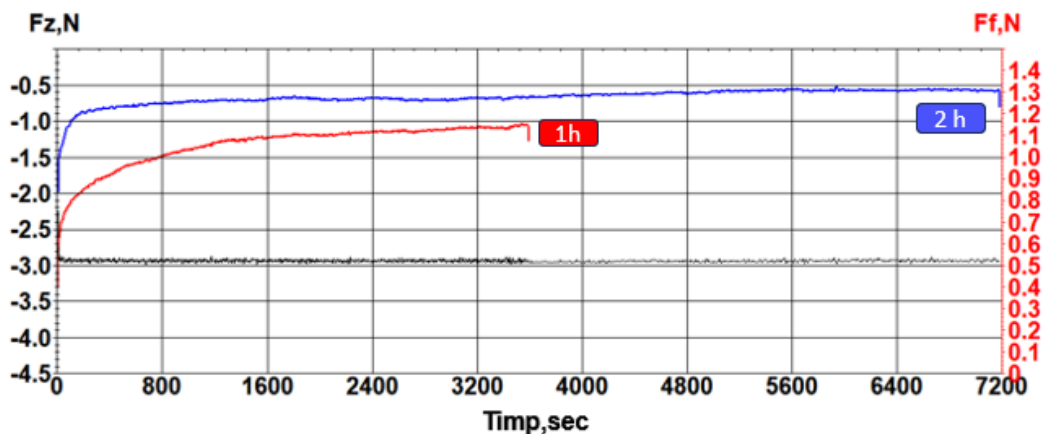


Fig. 6.2 – Variația forței de frecare în raport cu timpul pentru o apăsare de 3N.

Coeficientul de frecare crește în raport cu timpul, astfel, pentru o durată de 2h, coeficientul de frecare atinge valoarea maximă de 0.45, iar pentru testul de 1h rezultă 0.4.

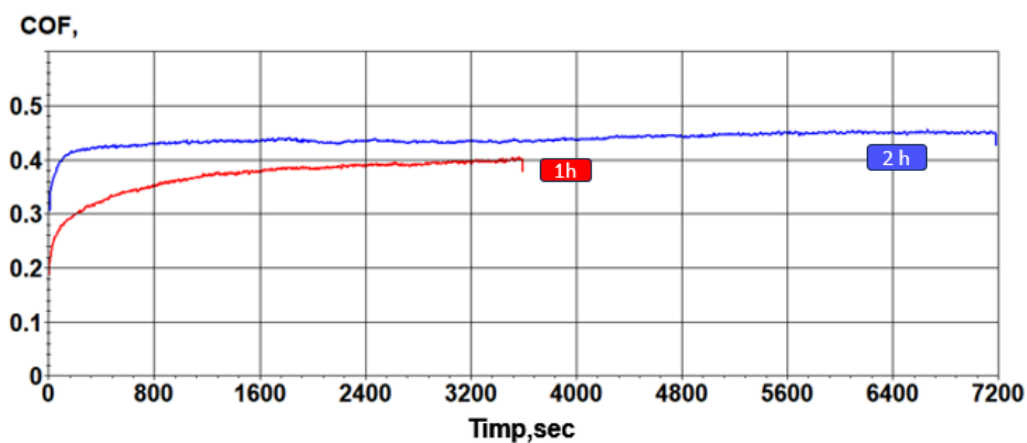


Fig. 6.3 – Variația coeficientului de frecare în raport cu timpul.

Urma de uzură pe sticlă pentru primul test de 1h cu laveta, se prezintă pe o lățime de aproximativ 2.3mm așa cum se poate observa în figura 6.4.

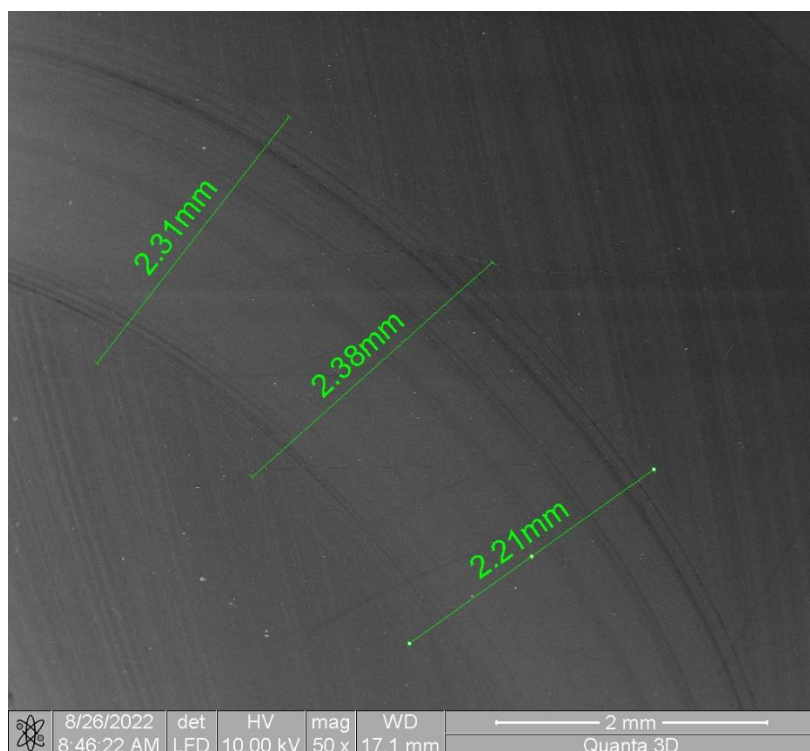


Fig. 6.4 – Urma de uzură pe sticlă pentru testul de 1h cu lavetă. (50x)

Depuneri rezultate în urma testului se regăsesc pe toată zona de testare, datorită presiunii foarte mari în zona centrală regăsim depuneri de până la $12.57\ \mu\text{m}$. (a se vedea figura 6.5.)

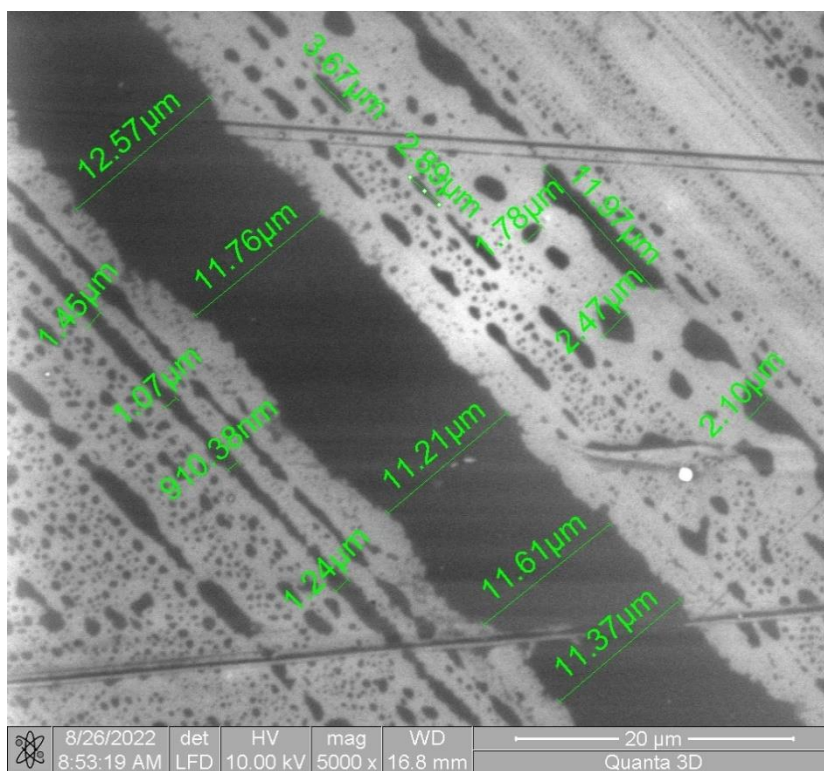


Fig. 6.5 – Depuneri ale lavetei pe suprafața din sticlă. Durată 1h. 5000x

În Fig. 6.6 se prezintă înregistrările făcute pe urme de uzură în condiții de încărcare normală de 3N, la turația de 60 rot/min, pe durată de o oră (zonele colorate cu albastru) și pe durată de 2 ore (zonele colorate cu roșu).

Se pot observa modificări ale formei suprafeței de sticlă, atât creșteri ce reprezintă depuneri ale microfibreii pe suprafața de sticlă, cât și zone de uzare.

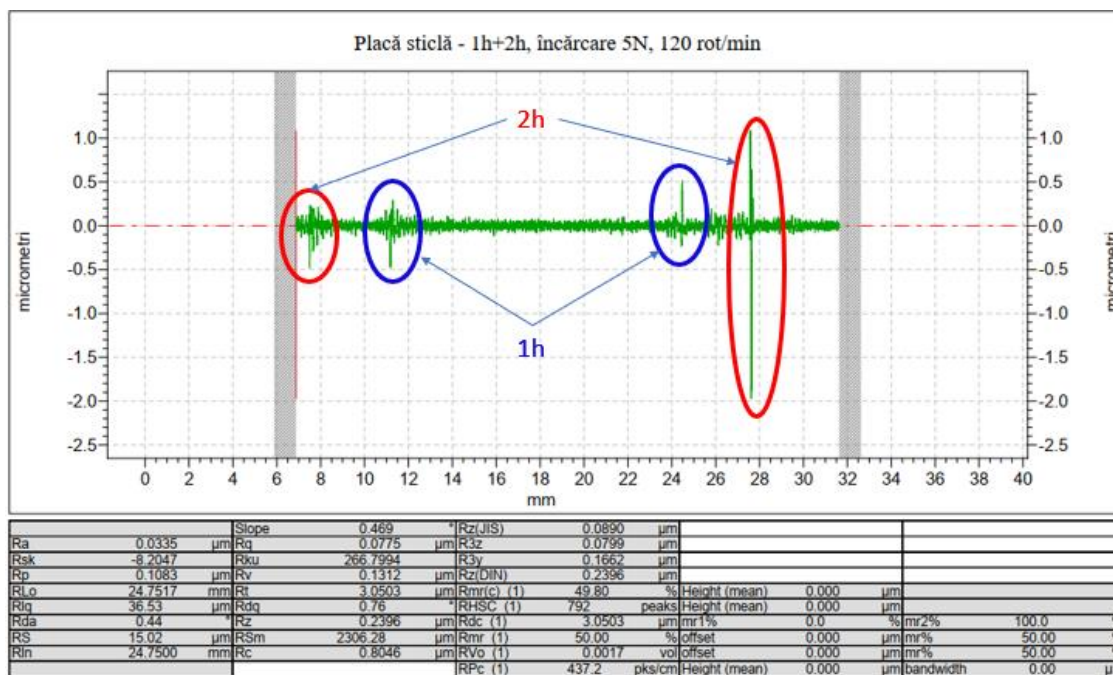


Fig. 6.6 – Evaluarea stării de uzare a suprafeței sticlei pe profilometru

În cazul cuplei de frecare dintre sticlă și bila acoperită cu lavetă, presiunea de contact și suprafața cercului de contact s-a calculat utilizând relațiile lui Hetz pentru un contact punctual bila- plan. Pentru sticlă s-a considerat un modul de elasticitate $E_s = 65 \text{ GPa}$ iar pentru oțel $E = 210 \text{ GPa}$. Pentru o forță de apăsare $F_z = 3 \text{ N}$, tensiunea maximă de contact a fost de 543 MPa iar diametrul teoretic al cercului de contact a fost de $0,1 \text{ mm}$ la nivelul bilei și mai mare din cauza stratului de material textil deformat.

6.1.3. Rezultate experimentale obținute cu hârtie:

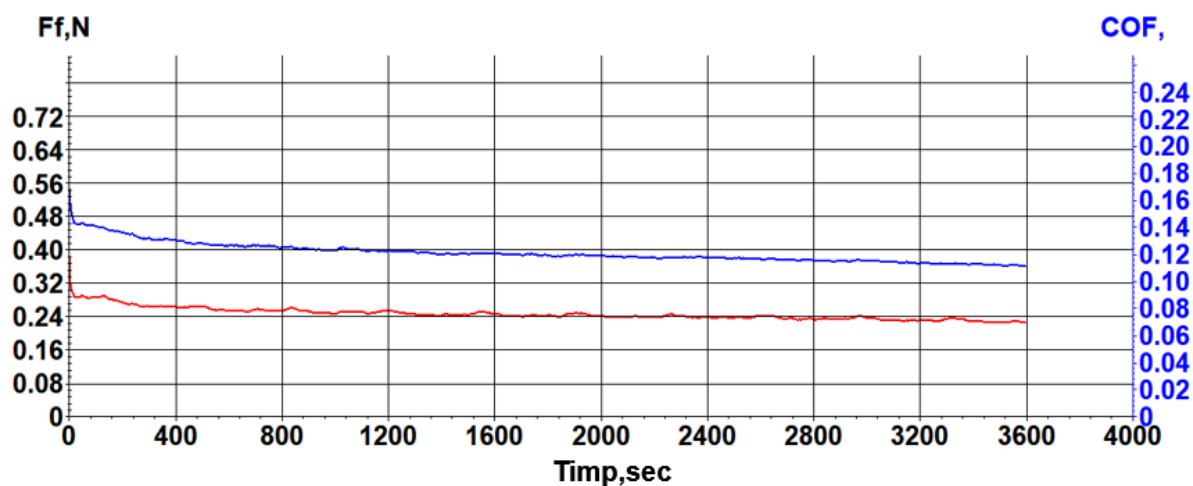


Fig. 6.7 – Variația forței de frecare și a coeficientului de frecare în raport cu timpul. 100 rot/min, forță de apăsare 2N

6.1.4 Rezultate experimentale obținute la frecarea cu material stratificat.

Variația forței de frecare pentru o forță de apăsare de 2N cu rezultate prezentate în fig. 6.8.

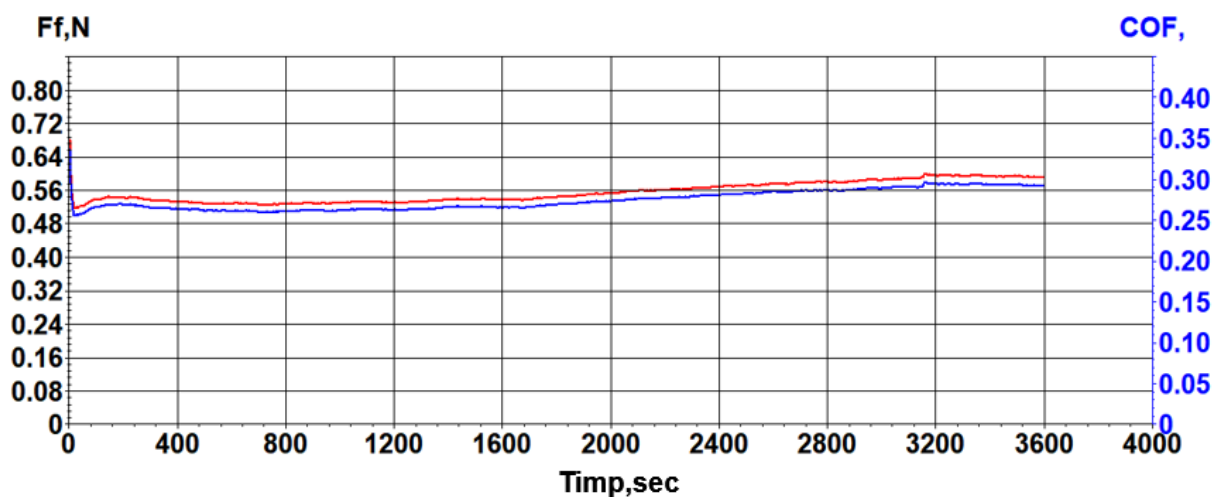


Fig. 6.8 – Variația forței de frecare F_f în raport cu timpul. Sticlă – material stratificat 100 rot/min. Forță de apăsare 2N

Valoarea coeficientului de frecare se menține constant pe toată durata testului, astfel că pe suprafața de sticlă nu au fost găsite urme de uzură.

6.2.1 Uzarea sticlei de către particule fine abrazive impregnate în materiale textile (sintetice)

În figura 6.9-(a) se prezintă un pin de formă circulară acoperit cu o lavetă impregnată cu argilă. În Fig. 6.9-(b) se prezintă o imagine mărită la microscop în care se pot vedea diverse

particule dure prinse în masa de argilă. Testele de uzură au fost efectuate cu pinul circular impregnat cu argilă și o placă de sticlă, cu o încărcare de 5N și o turație a mesei rotative de 150 rot/min.

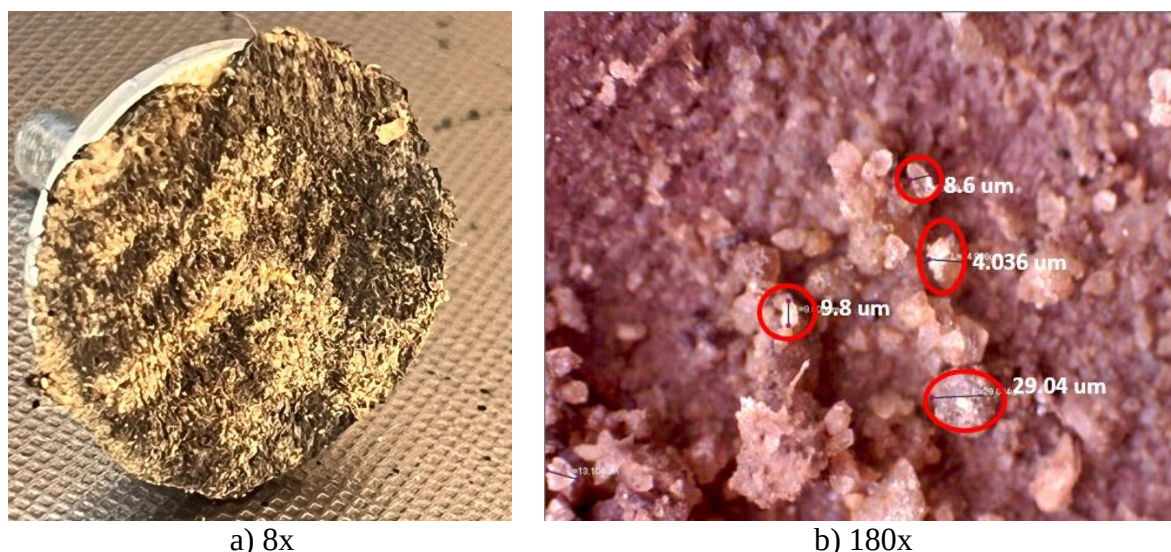


Fig. 6.9– a) este prezentată laveta impregnată cu argilă iar în figura b) particulele de argilă văzute la microscop.

În Fig. 6.10 sunt prezentate variațiile forțelor F_x și F_z pe o durată de funcționare de 3600 secunde. Se poate observa că după aproximativ 800 s, forța F_x se stabilizează în jurul valorii de 1,6 N până la finalul testului. Așa cum se poate observa și în figura 6.9 a lavetei la microscop de după test, în proporție de 90%, particulele nu mai sunt pe lavetă ceea ce ne conduce la concluzia că din cauza vitezei de rotație o mare parte din particule s-au desprins de pe lavetă.

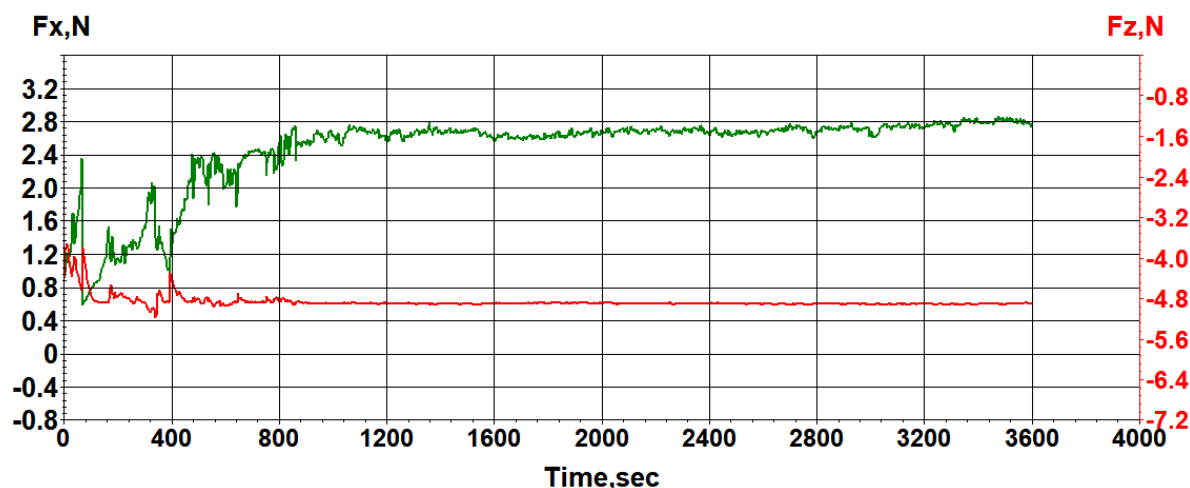


Fig. 6.10 – Variația forțelor F_x și F_z în raport cu timpul. Lavetă impregnată cu argilă. 120 rot/min , încărcare 5N

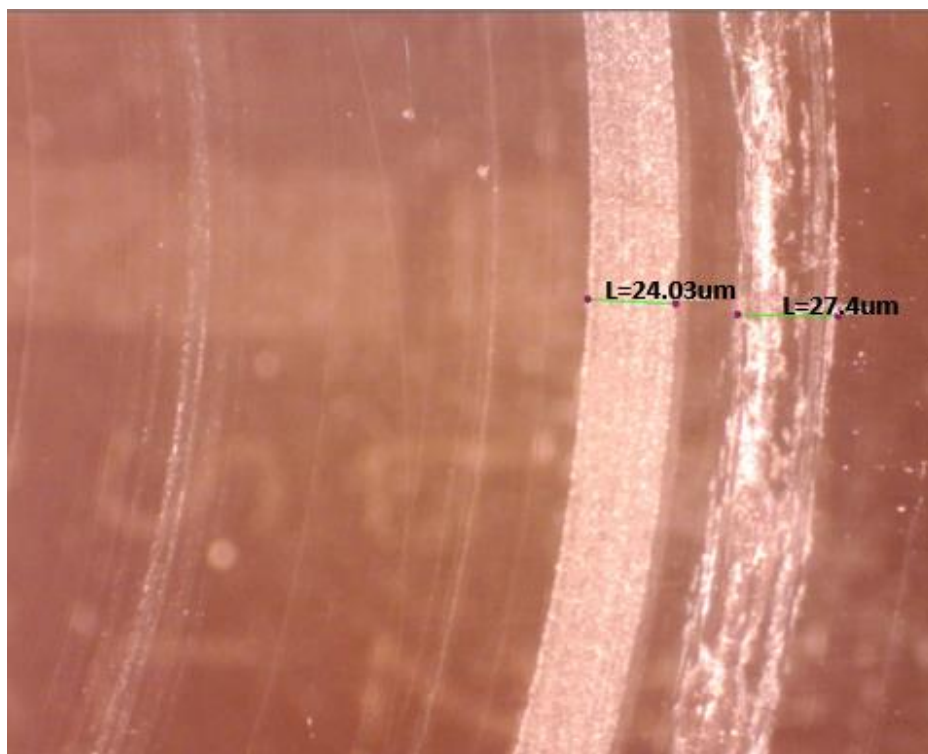


Fig. 6.11 – Uzarea sticlei cu laveta impregnată cu argilă. Durata – 1h, 120 rot/min , încărcare 5N.
180x

Coeficientul de frecare prezintă fluctuații mari la începerea testului plecând de la un coeficient de frecare de 0.32 și ajungând la 0.56 într-un timp de 800 de secunde, după acest timp valorile coeficientului rămân constante cu o ușoară creștere spre finalul testului, ceea ce înseamnă o uzare constantă a sticlei.

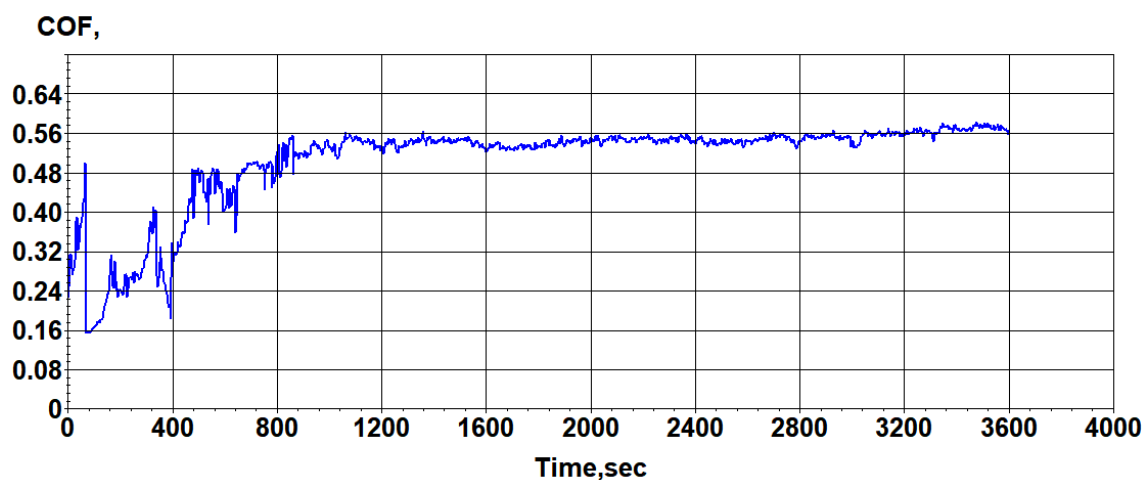


Fig. 6.12 – Variația coeficientului de frecare dintre sticlă și laveta-argilă.

6.2.2 Uzarea sticlei cu diferite pulberi (Eutalloy Tung Toc 10112, Nickel Chromium Alloy, ZrO₂CaO – Ceramic)

Scopul acestui studiu este de a observa influența pulberilor asupra procesului de uzare pe sticlă.

Trei tipuri de pulbere au fost alese pentru acest studiu așa cum se poate observa în figura 6.13, Eutalloy Tung toc, ZrO_2CaO 95-5 și Metco 82VF-NS Chormium Carbide.

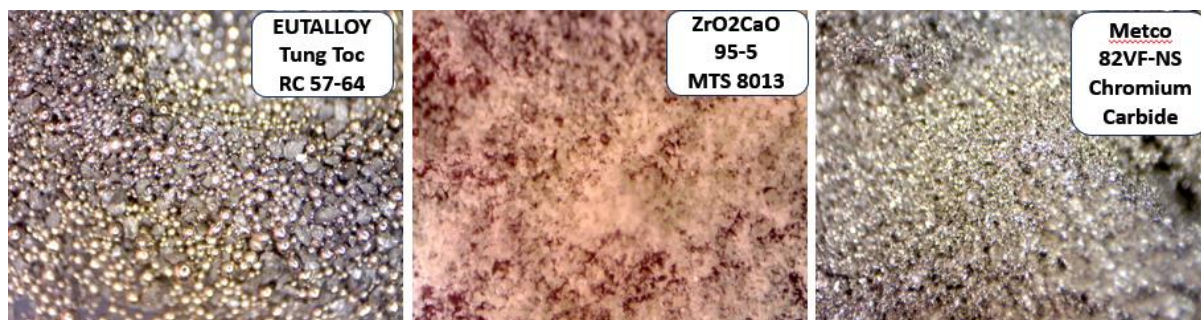


Fig. 6.13 – Tipurile de pulberi folosite pentru testele de uzare pe sticlă văzute la microscop. 180x

Laveta a fost impregnată cu pulberi și supusă sub anumite sarcini pe masa tribometrului la o viteză de rotație de 500 rot/min cu diferiți timpi, respectiv de 1h și 2h.

În figura 6.14 este prezentat laveta din microfibră impregnată în pulbere ceramică ZrO_2CaO . Pulberea se află atât pe lavetă cât și pe suprafața din sticlă, pentru a asigura un contact uniform la începerea testului.

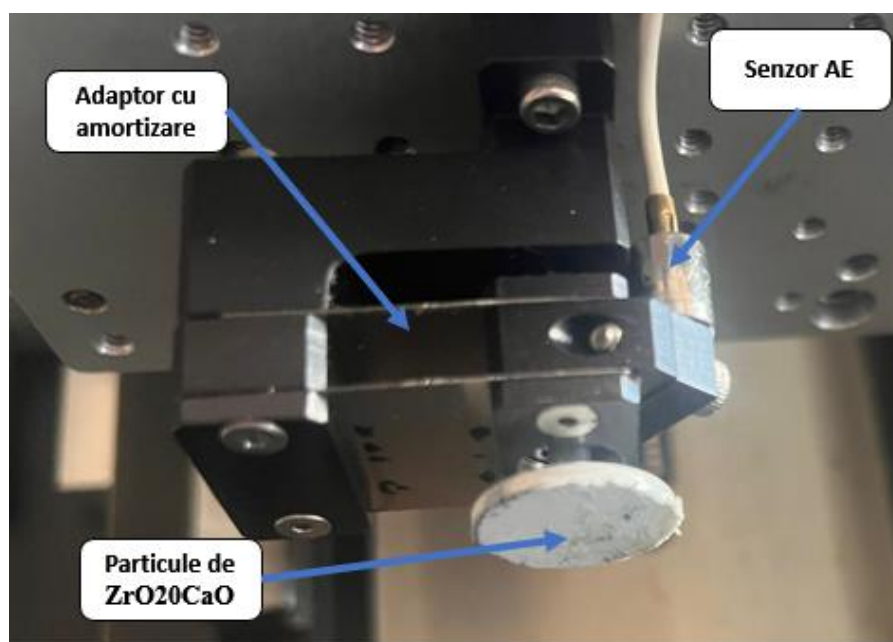


Fig. 6.14– Laveta impregnată cu ZrO_2CaO și senzorul AE

În figura 6.15 se observă comportamentul forței de frecare în funcție de timp pentru cele trei tipuri de pulberi. Analiza evidențiază diferențe semnificative în evoluția forței de frecare pentru fiecare tip de pulbere.

Pulberea Tung Toc prezintă un comportament similar cu cel al pulberii Metco 82 VF. Forța de frecare atinge un vârf de 0.41N la 500 de secunde, urmat de o descreștere până la 0.27N la 1000 de secunde. După această perioadă, forța de frecare se menține constantă în jurul valorii de 0.27N pentru restul duratei testului. Acest comportament indică o stabilizare rapidă a frecării și o uzură constantă, similar cu cea observată la MTS 8013, dar cu valori mai reduse ale forței de frecare.

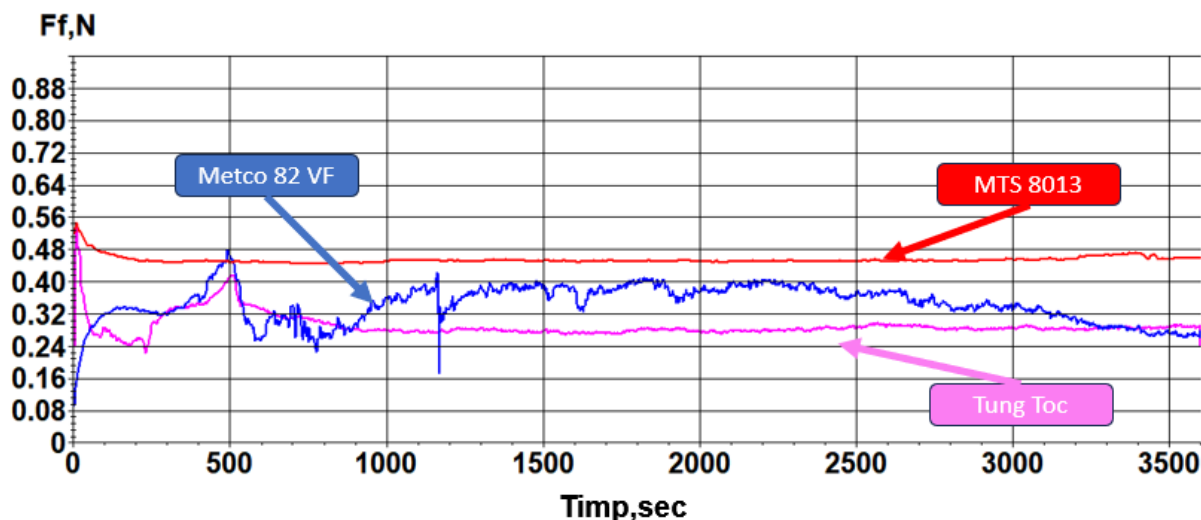


Fig. 6.15 – Variația forței de frecare F_f în funcție de timp

În cazul pulberii Metco 82 VF, în cazul pulberii Metco 82 VF, forța de frecare atinge valoarea maximă de 0.48 N la 500 de secunde. După acest punct, se observă o descreștere până la 0.32 N, urmată de fluctuații în jurul valorii de 0.4 N. După 2300 de secunde, forța de frecare scade treptat până la 0.25 N. Acest comportament sugerează o fază inițială de stabilizare, urmată de o perioadă de uzură variabilă, iar în cele din urmă, o reducere graduală a frecării.

Pulberea MTS 8013 prezintă o descreștere mică de la 0.56N pentru zona de început atingând valoarea de 0.48N și se menține constantă pe întreaga durată a testului ceea ce ne indică o lipsă a uzurii sticlei.

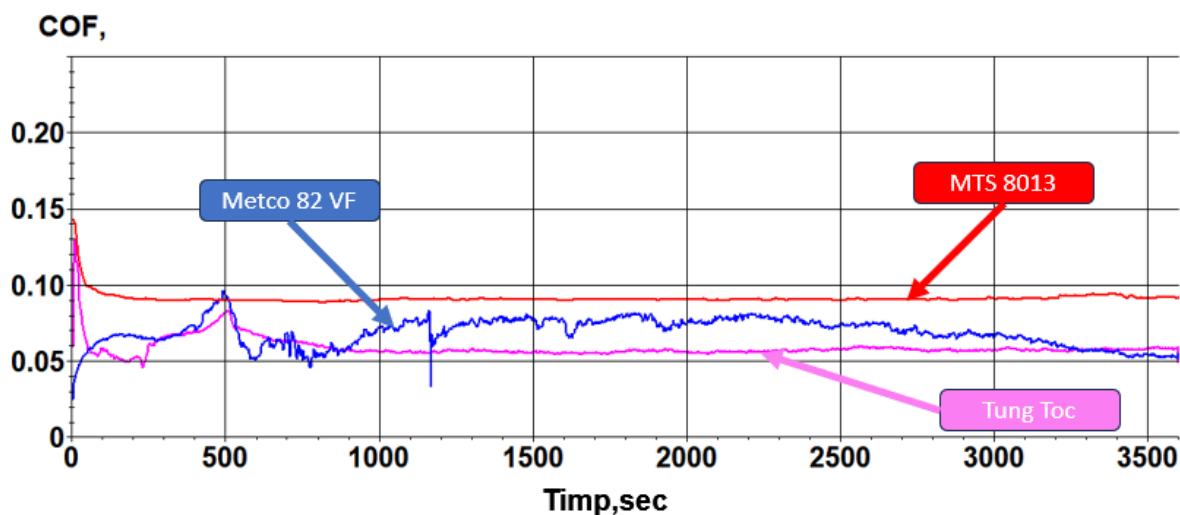


Fig. 6.16– Variația coeficientului de frecare în raport cu timpul pentru cele trei tipuri de pulbere

Pulberile Metco 82 VF și MTS 8013 prezintă fluctuații inițiale semnificative și o stabilizare ulterioară, dar cu valori ale forței și coeficientului de frecare mai mari comparativ cu pulberea Tung Toc. În mod particular, MTS 8013 arată o stabilizare rapidă la un nivel relativ scăzut al coeficientului de frecare, dar cu o forță de frecare constantă mai mare.

Analiza stării suprafeței sticlei după testele de uzare a fost realizată pe profilometru. Pentru proba unde laveta a fost împregnată cu Tung Tec, analiza a fost realizată pe întreaga

zonă de uzare unde se poate observa în figura 6.17 mai multe zone de uzură, spre exteriorul părții uzate se observă o zonă de uzare mai pronunțată, atât la profilometru, cât și la o analiză vizuală.

5.5.4.20

Taylor Hobson
PRECISION

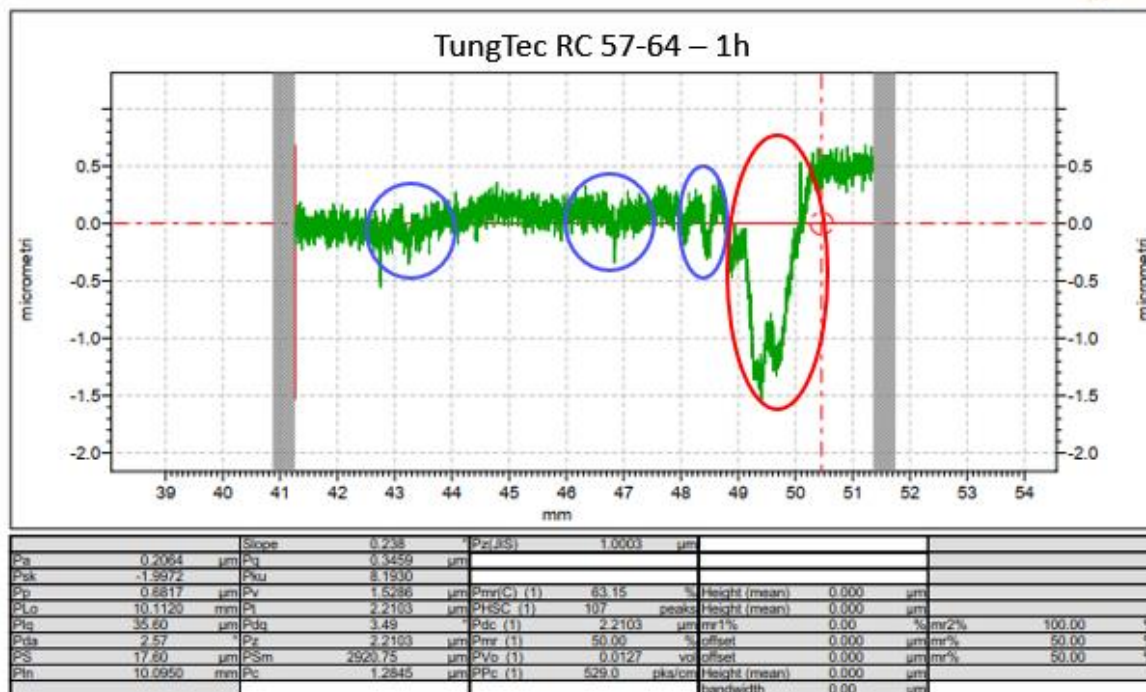


Fig. 6.17– Analiză la profilometru pentru pulberea TungTec pe sticlă

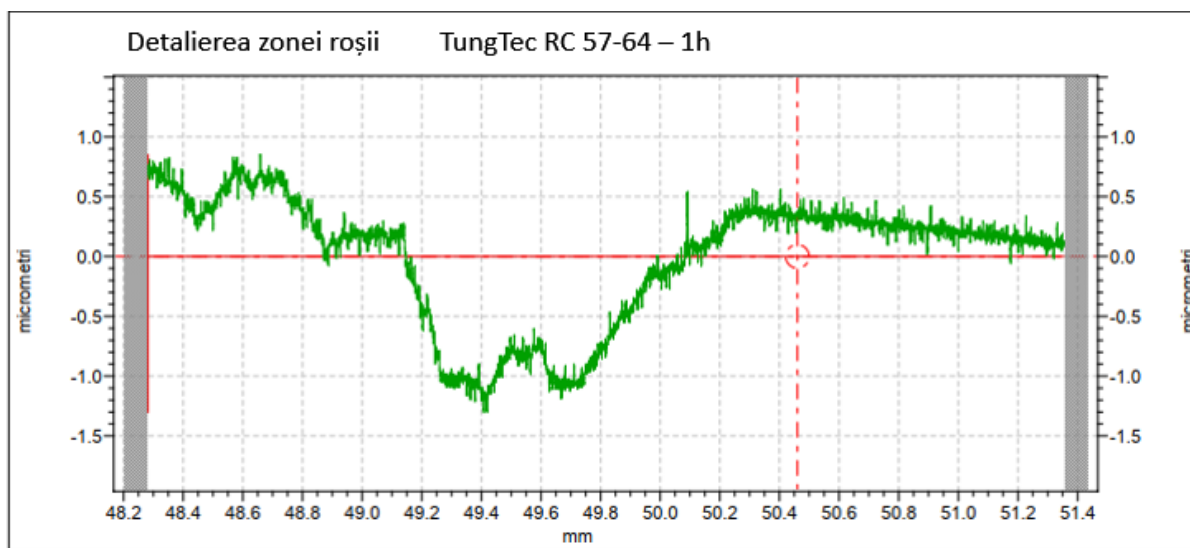


Fig. 6.18 – Detalierea zonei uzate pentru pulberea TungTec. Evidențiate cu roșu în figura 6.17

6.3. Concluzii

Studiul experimental asupra uzării sticlei prin frecare cu diverse materiale a oferit informații valoroase privind comportamentul sticlei în condiții de presiune și frecare cu viteze variabile. Experimentele au fost desfășurate folosind lavete din microfibră, hârtie, șervețele și materiale impregnate cu particule abrazive.

Rezultatele obținute evidențiază diferențe semnificative în ceea ce privește uzura și forța de frecare generate în diferite condiții de testare. Concluziile principale ale acestui studiu sunt următoarele:

A. Uzura cu lavete din microfibră:

Testele cu laveta din microfibră au arătat că forța de frecare crește în timp, atingând valori mai mari în cazul testelor de 2 ore comparativ cu cele de 1 oră.

Coeficientul de frecare a atins un maxim de 0.45 după 2 ore de testare, indicând o uzură crescută a sticlei sub presiuni mari.

Depunerile de material din lavetă pe sticlă au fost semnificative, în special în zona centrală, unde presiunea a fost cea mai mare.

B. Uzura cu hârtie și șervețel:

În cazul hârtiei, testele au indicat o uzură vizibilă pe sticlă și variații ale forței de frecare.

Testele cu șervețel nu au arătat urme de uzură pe sticlă, iar coeficientul de frecare a rămas constant pe durata testului.

C. Uzura cu particule abrazive impregnate în lavete:

Lavetele impregnate cu particule de argilă au generat o forță de frecare de aproximativ 1,6 N, iar particulele s-au desprins în mare parte de pe lavetă datorită vitezei mari de rotație.

Coeficientul de frecare a variat inițial, dar s-a stabilizat pe durata testului, sugerând o uzură constantă a sticlei.

D. Uzura cu pulberi abrazive (Eutalloy Tung Toc, Nickel Chromium Alloy, ZrO_2CaO – Ceramic):

Pulberea Eutalloy Tung Toc a prezentat cea mai constantă performanță în ceea ce privește forța de frecare și a generat cel mai scăzut nivel de zgomot, indicând o uzură uniformă și minimă asupra sticlei.

Pulberea Metco 82VF-NS a generat un zgomot mai mare și fluctuații ale forței de frecare, ceea ce sugerează o interacțiune mai agresivă cu suprafața sticlei.

Pulberea MTS 8013 a prezentat creșteri semnificative ale forței de frecare și uzurii, fiind mai puțin ideală pentru aplicații care necesită o uzură minimă.

E. Analiza stării suprafeței:

Profilometrul a evidențiat diferențele de uzură pentru fiecare tip de material abraziv, cu zone de uzură mai pronunțate spre exteriorul zonei de contact.

Depunerile de particule abrazive pe sticlă au variat în funcție de tipul de pulbere utilizată, influențând direct gradul de uzură al sticlei.

CAPITOLUL 7 – CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE.

7.1 Concluzii Finale

Concluziile principale ale cercetării, defalcate pe diversele direcții de cercetare pot fi sistematizate astfel:

A. La frecarea de alunecare dintre sticlă și suprafețe moi:

Cercetările experimentale au relevat că frecarea dintre sticlă și diverse materiale moi (laveta din microfibră, hârtie și bumbac) este influențată semnificativ de viteza de deplasare și presiunea de contact. În cazul materialelor moi a fost pus în evidență un comportament diferit de cel întâlnit în cazurile de alunecare cu materiale metalice.

Astfel, la viteze foarte mici, materialele moi testate, apăsate pe o suprafață de sticlă aflată în mișcare liniară generează fenomenul de stick-slip, cu fenomene periodice de aderență și alunecare.

La creșterea vitezei plăcii de sticlă trecerea de la faza de aderență la faza de alunecare se produce brusc, cu o scădere importantă a coeficientului de frecare cinetică față de coeficientul de frecare statică.

Crescând mai mult viteza de deplasare a plăcii de sticlă, trecerea de la faza de aderență la faza de alunecare se face într-un mod continuu, cu creșterea coeficientului de frecare cinetic în raport cu cel static.

Rigiditatea sistemului joacă un rol important în comportamentul de frecare. O rigiditate mai mare a arcului reduce efectul de stick-slip, permițând o tranziție mai lină între frecarea statică și cea cinetică.

În cazul testărilor cu laveta din microfibră, s-a observat că la viteza de 0.02mm/s, fenomenul de stick-slip este evident, iar la viteze de peste 1mm/s, frecarea devine mai stabilă și continuă.

La testările cu bumbac, coeficientul de frecare static a atins valoarea de 0.34 față de cel al lavetei din microfibră unde avem un coeficient de frecare static de 0.4, în aceleași condiții de testare.

În cazul hârtiei și a hârtiei compozite, fenomenele de stick - slip au fost pronunțate la viteze mici, iar coeficientul de frecare statică a scăzut la valoarea de 0.18 odată cu creșterea vitezei de deplasare. Materialul stratificat din celuloză moale a prezentat forțe de frecare de până la 1.34N, cu tranziții semnificative între aderență și alunecare.

B. La frecarea dintre sticlă și deget:

Cercetările experimentale au arătat că frecarea dintre degetul uman și suprafața de sticlă este influențată de mediul în care se desfășoară testul (uscat, umed, unsoare).

În condiții uscate, coeficientul de frecare atinge valoarea maximă de 1.24 la încărcarea de 1N, iar degetul prezintă deformații mai pronunțate pe suprafața de sticlă. În prezența apei,

coeficientul de frecare scade inițial, dar crește odată ce apa se evaporă și avem un coeficient maxim de 0.66 la încărcarea de 1N și 0.25 la încărcarea de 10N.

Mediul cu unsoare reduce semnificativ coeficientul de frecare, facilitând alunecarea degetului pe sticlă și minimizând deformările asociate. Cu o valoare de 0.3 a coeficientului de frecare pentru încărcare de 1N și scade o dată cu creșterea încărcării până la 0.09 la 10N.

C. Frecarea dintre sticlă și materiale metalice:

Testările au inclus aliaje comune precum duraluminiul, bronzul laminat și oțelul.

Rezultatele au arătat că rugozitatea materialului influențează coeficientul de frecare, cu valorile cele mai mari în cazul bronzului laminat și cele mai mici pentru sticlă.

Rigiditatea sistemului a avut un impact semnificativ asupra fenomenului de stick-slip, acesta fiind redus la rigidități mari.

În cazul duraluminiului, coeficientul de frecare static a fost relativ scăzut atingând valoarea maximă de 0.12, iar fenomenul de stick-slip s-a diminuat cu creșterea vitezei.

Pentru testările cu bronz laminat, coeficientul de frecare a fost dublu față de cel al duraluminiului cu un coeficient static maxim de 0.27.

D. Simularea fenomenului de stick-slip

Pentru simularea mișcării masei oscilante în contact cu sticla prin straturi de materiale moi s-a utilizat integrarea ecuației dinamice de mișcare folosind pentru coeficientul de frecare cinetică modelul complex propus de Zuleeg.

Folosirea modelului lui Zuleeg pentru variația coeficientului cinetic de frecare în funcție de viteza de alunecare, ecuația dinamică a forței care acționează asupra masei oscilante a fost integrată și s-a găsit o corelație bună între rezultatele experimentale și cele simulate la viteza mesei tribometrului de 0.4 mm/s și 1mm/s.

S-a demonstrat că modelul Zuleeg, deși este indicat pentru simularea fenomenului de stick-slip, poate acoperi o mare varietate a comportamentelor de frecare de alunecare în care nu se dezvoltă fenomenul de stick-slip.

Modelul Zuleeg are un singur dezavantaj, acela că alegerea constantelor a_1 , a_2 , a_3 și a_4 se face în mod empiric.

E. Modelarea fenomenului de aderență.

Întrucât coeficientul de frecare statică depinde de timpul de staționare, s-a luat în calcul, în premieră, timpul de staționare în fazele de aderență, când nu are loc alunecarea. S-a utilizat ecuația dezvoltată de Leine et al. și s-a obținut o ecuație de variație a coeficientului de frecare static în funcție de timpul de aderență în toate cele 8 cazuri specifice frecării lavetei.

Tot ca o premieră, s-a utilizat relația dezvoltată de Leine et al. și pentru variația coeficientului de frecare cinetică în raport cu viteza de alunecare, obținându-se o bună corelare cu datele experimentale.

În final s-a determinat variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare. Pe baza corelării coeficientului de frecare cinetic cu viteza de alunecare s-a stabilit

experimental pentru viteza de 8 mm/s o creștere a coeficientului de frecare cu creșterea vitezei de alunecare. S-a găsit și o funcție exponențială care aproximează foarte bine această creștere.

Astfel, s-a validat faptul că prin creșterea coeficientului de frecare cinetică cu viteza de alunecare nu se poate produce procesul de stick-slip.

F. Frecarea dintre sticlă și cauciuc.

Din analiza detaliată a experimentelor efectuate pe masa liniară în contact cu o lamela de cauciuc extrasă dintr-un ștergător de parbriz s-au desprins următoarele concluzii:

Influența mediului de lubrifiere:

Mediul uscat: A prezentat cele mai mari forțe de frecare și coeficienți de frecare, ceea ce indică o rezistență semnificativă la alunecare. Forțele F_z au ajuns până la 4.8 N, iar coeficientul de frecare a atins valori maxime de 9.4.

Mediul cu apă: S-a redus considerabil forțele de frecare și coeficienții de frecare comparativ cu mediul uscat. Forțele F_z au avut valori maxime de 6 N la apăsarea de 1.5 mm/z și o viteză de 10 mm/s, iar coeficientul de frecare a scăzut până la 0.6.

Mediul cu unsoare și ulei: A prezentat cele mai mici forțe de frecare și coeficienți de frecare. Forțele F_z au fost constante și mici, în jur de 0.5 N la viteze mici și au crescut până la 1 N la viteze mari. Coeficientul de frecare a fost cel mai scăzut în aceste medii, cu valori minime de 0.07 în cazul uleiului.

Influența adâncimii de apăsare:

Apăsările mai mari de 2 mm/z au dus la deformări excesive ale lamelei de cauciuc, invalidând testele. Testele valide au fost efectuate cu apăsări maxime de 1.5 mm/z.

Creșterea apăsării a dus la creșterea forțelor de frecare. La 1 mm/h, forța F_z a ajuns până la 10.5 N în mediu uscat, iar în mediul cu apă a scăzut ușor. În mediul cu unsoare și ulei, forțele au rămas mici chiar și la apăsări mai mari.

Influența vitezei de deplasare:

La viteza de 5 mm/s, forțele de frecare au fost mai mari în mediu uscat și mai mici în prezența lubrifianților.

La viteza de 10 mm/s, forțele de frecare au fost similare în mediul uscat și cu apă, dar au scăzut în mediul cu ulei și unsoare. La viteze mai mari, lubrifianțul utilizat (ulei T90) a oferit cea mai lină trecere și cele mai mici valori ale coeficientului de frecare.

Comportamentul elastic al lamelei de cauciuc:

Lamela de cauciuc a demonstrat elasticitate variabilă în funcție de forța de apăsare. Elasticitatea măsurată a fost de 12.5 N/mm pentru diferite apăsări, iar deformările mari au fost observate la apăsări mai mari de 2 mm/z.

Fenomenul de Stick-Slip:

În mediul cu apă, la apăsări de 1.5 mm/z, s-au observat fluctuații ale forței F_z și s-a dezvoltat fenomenul de stick-slip, indicând o aderență intermitentă combinată cu alunecare.

7.2 Concluzii privind uzarea sticlei

A. Uzarea sticlei de către materiale soft

Forța de frecare crește în raport cu timpul, indicând o uzură continuă a sticlei.

La durata testului de 2 ore, forța de frecare a fost mai mare (1.3 N) decât la testul de 1 oră (0.4 N).

Coeficientul de frecare a crescut de asemenea cu timpul, atingând valoarea maximă de 0.45 pentru testul de 2 ore și 0.4 pentru testul de 1 oră.

Urma de uzură pe sticlă după 1 oră a fost de 2.3 mm, cu depuneri de până la 12.57 μm .

Analiza microscopică a lavetelor a arătat fibre desprinse și un aspect topit în zonele marcate, indicând degradarea microfibreii.

Profilometrul a arătat atât depuneri de microfibră pe sticlă cât și zone de uzură.

Materialele stratificate nu au produs urme de uzură pe sticlă, iar coeficientul de frecare s-a menținut constant.

B. Uzarea sticlei de către particule fine abrazive

După aproximativ 800 s, forța de frecare (F_x) s-a stabilizat la 1.6 N.

Particulele abrazive s-au desprins în proporție de 90% de pe lavetă.

Uzura pe sticlă a atins o valoare maximă de 25 μm .

Coeficientul de frecare a variat semnificativ la începutul testului (de la 0.32 la 0.56), după care s-a stabilizat.

C. Uzarea sticlei de către particule fine abrazive

Pulberi Eutalloy Tung Toc, Nickel Chromium Alloy, ZrO_2CaO - Ceramic:

Comportamentul forței de frecare a variat în funcție de tipul pulberii:

Pulbrea Tung Toc a prezentat o forță de frecare stabilizată la 0.27 N după o creștere inițială.

Pulbrea Metco 82 VF a prezentat fluctuații mari inițial, dar s-a stabilizat ulterior.

Pulbrea MTS 8013 a avut o forță de frecare constantă, indicând o lipsă de uzură semnificativă.

Coeficientul de frecare pentru pulberi a variat semnificativ inițial, dar a avut tendința de stabilizare:

MTS 8013 a avut un coeficient de frecare inițial de 0.14, scăzând rapid la 0.09.

Metco 82 VF și Tung Toc au prezentat fluctuații inițiale, dar s-au stabilizat la valori scăzute.

Analiza zgomotului a arătat că testele cu Metco 82 VF au generat un zgomot mai pronunțat decât cele cu MTS 8013 și Tung Toc.

Profilometrul a indicat zone de uzură pronunțate pe sticlă, în special în cazul utilizării pulberii Tung Tec.

7.3 Contribuții Personale

În cadrul prezentei teze am contribuit la extinderea cunoștințelor în domeniul tribologiei, în special în ceea ce privește comportamentul la frecare și uzare dintre sticlă și diverse materiale în condiții variate.

Contribuțiile personale se pot sintetiza astfel:

Analiza detaliată a frecării între sticlă și materiale moi și dure, oferind date concrete despre coeficienții de frecare și uzura rezultantă.

Punerea în evidență, în premieră, a unui comportament deosebit al materialelor soft (textile, lavetă de curățat ochelari, hârtie stratificată) în contact cu sticla, odată cu creșterea vitezei de deplasare a sticlei, de la 0,5mm/s la 8mm/s.

Utilizarea unui program în Matlab pentru integrarea ecuației de mișcare a masei oscilante cu suport de material soft pe sticlă, utilizând modelul complex a lui Zuleeg pentru coeficientul de frecare cinetic.

Introducerea, în premieră a timpului de aderență ca timp de staționare și modelarea variației coeficientului de frecare static în funcție de timpul de aderență utilizând ecuația utilizată de Leine et al.

Introducerea, în premieră, a modelului dat de ecuația Leine et al. pentru variația coeficientului de frecare cinetic în funcție de viteza de deplasare a suportului de sticlă.

Demonstrarea pe baza experimentelor că fenomenul de stick-slip nu se poate produce atunci când coeficientul de frecare cinetic este mai mare ca cel static și crește odată cu creșterea vitezei de alunecare.

Studierea experimentală, într-un mod original, a frecării dintre pielea degetului uman și sticlă cu determinări ale coeficienților de frecare.

Evaluarea comportamentului în medii variate a frecării dintre cauciuc și sticlă, subliniind rolul lubrifiantului și al apei în reducerea frecării.

Investigarea uzurii produse pe sticlă de materiale soft (lavetă de microfibre sintetice, hârtie, bumbac).

Investigarea uzurii produse pe sticlă de materiale soft impregnate cu argilă (lavetă de microfibre sintetice)

Investigarea efectului pulberilor abrazive asupra uzurii sticlei, evidențiind impactul diferitelor materiale și condiții asupra durabilității suprafeței de sticlă.

Stabilirea unei baze de date experimentale utile pentru proiectanți și ingineri care lucrează cu componente din sticlă, facilitând selecția materialelor adecvate pentru minimizarea uzurii.

7.4 Direcții Ulterioare de Cercetare

Pentru a continua și a extinde rezultatele acestui studiu, se propun următoarele direcții ulterioare de cercetare:

Investigații suplimentare asupra altor materiale:

Extinderea studiului pentru a include frecarea sticlei cu alte materiale, precum polimerii sau compozitele, pentru a evalua comportamentul în diverse aplicații industriale.

Extinderea studiului pentru uzura sticlei cu diferite materiale dure, precum diamant, piatră, sticlă, nitrură de siliciu etc.

Analiza influenței condițiilor de temperatură:

Studierea efectului temperaturii asupra frecării și uzurii sticlei, în special în aplicații unde sticla este expusă la variații termice semnificative.

Dezvoltarea de noi lubrifianți:

Cercetarea și dezvoltarea unor lubrifianți specializați care pot reduce eficient uzura sticlei în diverse medii de operare.

Investigarea microstructurii sticlei:

Analiza microstructurală a sticlei uzate pentru a înțelege mecanismele la nivel microscopic care conduc la uzură, ceea ce poate ajuta la dezvoltarea de sticle cu rezistență îmbunătățită la uzură.

Simulări și modelări computaționale:

Utilizarea simulărilor numerice și a modelărilor computaționale pentru a prezice comportamentul de frecare și uzură, facilitând optimizarea designului și selecția materialelor în aplicații practice

Bibliografie

Al-Harbi, N., Al-Hadeethi, Y., & Bakry, A. S. (2021). Mechanical and radiation shielding features of bioactive glasses: SiO₂-Na₂O-CaO-P₂O₅-B₂O₃ for utilization in dental applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 552. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120489>

Awrejcewicz, J., & Sendkowski, D. (2005). Stick-slip chaos detection in coupled oscillators with friction. *International Journal of Solids and Structures*, 42(21–22), 5669–5682. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.03.018>

Barbi, S., Mugoni, C., Montorsi, M., Affatigato, M., Gatto, C., & Siligardi, C. (2018). Structural and optical properties of rare-earths doped barium bismuth borate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 481, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.10.043>

Bartosz W., Rafal C., Lukasz S., Marek T., „Design of thin DLC/TiO₂ film interference coatings on glass screen protector using a neon–argon-based gas injection magnetron sputtering technique”

Bhusan B., „Introduction to Tribology, John Wiley and Sons, Chichester, 2013.

Bindra S.P. and Gharamani H., “Water supply in remote small communities. ,” *International Conference and Exposition on Energy and Water Disalination.*, 2000.

Bindra S.P and Abosh W., “Recent developments in water desalination,” *Desalination*, vol. 136, no. 1–3, 2001, doi: 10.1016/S0011-9164(01)00164-3.

Bjorn M., Dirk J., Andreas H., Patrick S., Benjamin K., Andreas L., Andreas F. L., „Combined measurement and simulation of piston ring cylinder liner contacts with a reciprocating long-stroke tribometer” *Tribology International*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107146>.

Brow, R. K., & Schmitt, M. L. (2009). A survey of energy and environmental applications of glass. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(7), 1193–1201. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.08.011>

Cârlescu, V., C.M.Oprişan, **B. Chiriac**,G.Ianuş,D.N.Olaru, *Influence of Hand Sanitizers on the Friction Properties of the Finger Skin Amid the COVID-19 Pandemic*, Inovation in Mechanical Engineering, icieng, 2021, pp.420-428 https://doi.org/10.1007/978-3-030-79165-0_39

Cârlescu, V., Oprişan, C.M., Ianuş, G., Olaru, D.N.: Evaluation of friction behaviour on human finger skin considering precision grip task. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **997**, 012007 (2020)

Chengsong S., Shaohui Y., Shuai H., „Preparation and performance of Ti/Ti-DLC composite coatings for precision glass molding” *Ceramics International*, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.11.267>.

Chiriac B., A. Tufescu, D. Olaru, A. Lapusneanu, Exploring the environmental implications of static and kinetic friction coefficient: A study on the contact between glass and soft materials, International Conference ACME 2024, 6-7 June, Environmental Engineering and Management Journal, <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/>

Chiriac B., Oprisan C. M., Carlescu V., and Olaru D. N., „Friction coefficient between glass surfaces and soft materials” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1262, 2022, 10.1088/1757-899X/1262/1/012004

Chiriac B., Oprisan C. M., Carlescu V., and Olaru D. N: *Static and dynamic friction coefficient for glass surfaces*, Balkantrib 2020.

Chizhik P., Friedrichs M., Dietzel D. and Schirmeisen A., „Tribological Analysis of Contacts Between Glass and Tungsten Carbide Near the Glass Transition Temperature”, Tribology Letters, Volume 68, 127, 2020

Derler, S., Gerhardt, L. C., Lenz, A., Bertaux, E., & Hadad, M. (2009). Friction of human skin against smooth and rough glass as a function of the contact pressure. *Tribology International*, 42(11–12), 1565–1574. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.11.009>

Derler, S., Gerhardt, L.-C.: Tribology of skin: review and analysis of experimental results for the friction coefficient of human skin. *Tribol. Lett.* **45**, 1–27 (2012)

Dhifaoui B., Jabrallah Ben S., Belghith A., and J. P. Corriou, “Experimental study of the dynamic behaviour of a porous medium submitted to a wall heat flux in view of thermal energy storage by sensible heat,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, no. 10, 2007, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.014.

Dongqiang L., Zhifeng W., Jian J., Jianbin L., Zhijian W., „Experimental study of glass to metal seals for parabolic trough receivers” , *Renewable Energy*, Pages 85-91, 2012, doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.033

Edoardo G., Luigi M., Andrea M., Bin Z., „An early method for the technical diagnosis of pin-on-disk tribometers by reference friction measurements in EHL conditions”, *Measurement*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108169>.

Elmer, F.-J. (1997). Nonlinear dynamics of dry friction A phenomenological law for the friction force depends only on the. In *J. Phys. A: Math. Gen* (Vol. 30, Issue 97).

Erik H., Bettina F., Andrea C., „Sensitivity of the Stribeck curve to the pin geometry of a pin-on-disc tribometer”, *Tribology International*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106488>.

Fujita, N., Yamaguchi, H., Kinoshita, T., Iwao, M., & Nakanishi, Y. (2022). Friction behaviors of elastic materials sliding on textured glass surfaces. *Tribology International*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107539>

Gao J., Luedtke W. D., Gourdon D., Ruths M., Israelachvili J. N., and Landman U., “Frictional forces and Amontons’ law : From the molecular to the macroscopic scale, ,” *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, no. 11, pp. 3410–3425, Mar. 2004, doi: 10.1021/jp036362l.

Ian M. Hutchings, „Leonardo da Vinci’s studies of friction” *Wear*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.019>

Jia L., Qihong F., Liangchi Z., Youwen L., „The effect of rough surface on nanoscale high speed grinding by a molecular dynamics simulation” *Computational Materials Science*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.10.069>.

Johnson K. L., “One Hundred Years of Hertz Contact,” *P.I. Mech. Eng.*, vol. 196, p. 363-78, 1982.

Kholi D. K., Khardekr R. K., Singh R. and Gupta P. K., “Glass micro-container based hydrogen storage scheme,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 1, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.07.044.

Lee, S. J., Kim, G. M., & Kim, C. L. (2022). Friction and wear reduction effect of glass bubbles embedded in PDMS surface. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(4), 1997–2005. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0335-z>

Leine, R. I., Van Campen, D. H., De Kraker, A., & Van Den Steen, L. (1998). Stick-Slip Vibrations Induced by Alternate Friction Models. In *Nonlinear Dynamics* (Vol. 16).

Leo B., Kamel C., Valerie A., Vincet L., Sylvain C., „Adhesion theories: A didactic review about a century of progress” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103673>

Macfarlane A. and Martin G., “Glass: A World History,” *University of Chicago Press*, 2002.

Maegawa, S., & Nakano, K. (n.d.). *OCCURRENCE OF STICK-SLIP AND SCHALLAMACH WAVES IN SLIDING BETWEEN HARD AND SOFT SURFACES*. <https://www.researchgate.net/publication/268015854> 2008

Mahmoud M. M., Frictional Behavior of Different Glove Materials Sliding Against Glass Sheet. *Journal of Applied Sciences*, 16: 491-495, 2016. DOI: [10.3923/jas.2016.491.495](https://doi.org/10.3923/jas.2016.491.495)

Markus V., Reinhard G., Matthias M., Fabio T., Karl-Otto A., „Impact-abrasive wear resistance of high alumina ceramics and ZTA”, *Wear*, Volume 522, 2023, 204700, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204700>

Mens, J. W. M., & De Gee, A. W. J. (1991). Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water". In *Wear* (Vol. 149).

Meyer, J., Fuchs, R., Staedler, T., & Jiang, X. (2014). Effect of surface roughness on sliding friction of micron-sized glass beads. *Friction*, 2(3), 255–263. <https://doi.org/10.1007/s40544-014-0045-3>

Mohan, N., Mahesha, C. R., & Raja, R. (1970). Tribo-mechanical behaviour of SiC filled glass-epoxy composites at elevated temperatures. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 6(5), 44–56. <https://doi.org/10.4314/ijest.v6i5.5>

Nordhagen H., „Stick-slip Friction, MSc thesis”, Departament of Physics, University of Oslo, Oslo, 2003

Olaru D. N., „ Tribologie – Cursuri cu aplicatii”, 2020

Olawale O., Ajibola, Abdullahi O. Adebayo, Sunday G. Borisade., Adebayo F. Owa, Oladeji O. Ige, „Characterisation and tribological behaviour of zinc-aluminium (Zn-Al) alloy under dry sliding reciprocating ball on disk tribometer” *Materials Today: Proceedings*, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.135>

Oprîşan C. M., Chiriac B., Carlescu V., Olaru D.N.: *Influence of the stiffness and the speed on the stick-slip process*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 997, Paper 012016, 2020.

Persson B., Tada T., Kawasaki S., “Adhesion and friction between glass and rubber in the dry state and in water: Role of contact hydrophobicity” *Soft Matter*, 2018, doi: 10.1039/C8SM00847G

Persson B. N., “Contact Mechanics for Randomly Rough Surfaces.,” *Surf. Sci. Rep.* 61, vol. 201–27, p. 61, 2006.

Pitenis A., Dowson D., Sawyer W.G., „Leonardo da Vinci’s Friction Experiments: An Old Story Acknowledged and Repeated”, *Tribology Letters*, 56 (3), 2014, 509-515.

Popova E., Popov V. L., „ The Legacy of Coulomb and generalized laws of friction”, *The Authors Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2020, DOI: 10.1002/pamm.202000062

Půst, L., Yaroshevich, N., Pešek, L., & Radolfová, A. (2011). Various types of dry friction characteristics for vibration damping. In *Engineering MECHANICS* (Vol. 18, Issue 4). <https://www.researchgate.net/publication/265480079>

Qi, H., Hu, W., He, H., Zhang, Y., Song, C., & Yu, J. (2021). Quantitative analysis of the tribological properties of phosphate glass at the nano- and macro-scales. *Friction*, 9(5), 1138–1149. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0411-2>

Qiao, Q., Xiao, T., He, H., & Yu, J. (2021). Hydrogen ion induced mechanochemical wear of soda lime silica glass in acid solutions. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 552. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120440>

Rahul R., „ Numerical Modeling and simulation of friction models for mechanical systems: A brief review”, *Materials Today: Proceedings*, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.185>.

Rapoport, L., Shmukler, V., Moshkovich, A., & Verdyan, A. (2005). Static and kinetic friction of smooth glass surfaces rubbed with silicone oils. *Proceedings of the World Tribology Congress III - 2005*, 445–446. <https://doi.org/10.1115/wtc2005-63174>

Satoru M., Fumihiro I., Takashi N., „New insight into the mechanism of static friction: A theoretical

prediction of the effect of loading history on static friction force based on the static friction model proposed by Lorenz and Persson” *Tribology International*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.04.021>.

Sawamura, S., Limbach, R., Behrens, H., & Wondraczek, L. (2018). Lateral deformation and defect resistance of compacted silica glass: Quantification of the scratching hardness of brittle glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 481, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.11.035>

Stachowiak G. W. „*Engineering Tribology*”, 2014, ISBN 978-0-12-397047-3, <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07515-4>

Steiner L., Bouvier V., May U., Huber N., „ Simulation of friction and wear in DLC/steel contacts for different loading histories and geometries: Ball-on-plate configuration and piston-cylinder-contacts, *Tribology International*, 2010, doi:10.1016/j.triboint.2010.01.012.

Subhi, K. A., Tudor, A., Călin, A., Hussein, E., & Chisiu, G. (2019). Twist static friction and creep between UHMWPE and bovine skin for human exoprosthesis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 514(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/514/1/012016>

Suratwala T., „Glass Finishing (Grinding&Polishing) Glass Processing Course, International Materials Institute for New Functionality in Glass, Spring 2015.

Suresha, B., Chandramohan, G., Rao, S., Sampathkumaran, P., Seetharamu, S., & Venkateswarlu, V. (2006). Friction and slide wear characteristics of glass-epoxy and glass-epoxy filled with SiCp composites. In *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* (Vol. 13).

Swab, J. J. (2019). *Effect of Abrasion on the Properties of a Glass-Ceramic Effect of Abrasion on the Properties of a Glass-Ceramic Corrosion of Ceramics View project Fractography of Advanced Ceramics View project*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15544.49923>

Tasdemir, M., Babat, V., & Yerlesen, U. (2014). Effect of friction and wear parameters on acrylonitrile butadiene styrene/aluminum-boron carbide-glass spheres polymer composites. *Mechanika*, 20(4), 407–413. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.20.4.7883>

Toshiaki N., “High friction effect on water-lubricated floor by the addition of silicone rubber particles to diene rubber” *Tribology International*, Volume 176, 2022, doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107900

Tong L. and Mazur E., “Glass nanofibers for micro- and nano-scale photonic devices,” *J Non Cryst Solids*, vol. 354, no. 12–13, 2008, doi: 10.1016/j.jnoncrsol.2006.10.090.

Unesco, “Water a shared responsibility,” *The United Nations World Water Development Report 2*, vol. 21, no. 4. 2006.

Wu-Wen Yao, Xiao-Ping Zhou, Daniel Dias, Yun Jia, Ying-Jie Li, Frictional contact and stick-slip: Mechanism and numerical technology, *International Journal of Solids and Structures*, 2023

Xue Z., Yiyuan L., Yu T., Marc A. M., Yuanzhe L., Zhongmin J., „Friction and neuroimaging of active and passive tactile touch” 2023, doi: 10.1038/s41598-023-40326-y

Zhang, H., Zhang, J., Wang, W., Liu, R., & Zong, G. (2007). A series of pneumatic glass-wall cleaning robots for high-rise buildings. *Industrial Robot*, 34(2), 150–160. <https://doi.org/10.1108/01439910710727504>

Zuleeg J., „How to Measure, Prevent, and Eliminate Stick-Slip and Noise Generation with Lubricants SAE Technical Paper ,2015.

Zhao, Y., Liu, R., Yan, F., Zhang, D., & Liu, J. (2021). Windblown sand-induced degradation of glass panels in curtain walls. *Materials*, 14(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma14030607>

Zhonghuan Xiang, Yuanzhe Li, Xue Zhou, Pengpeng Bai, Yonggang Meng, Liran Ma, Yu Tian, Sliding direction dependence of stick-slip in finger friction, *Tribology International* 191 (2024) 109141

www.structuralglass.org/single-post/2016/11/26/Glass-Physical-Properties

LISTĂ LUCRĂRILOR PUBLICATE SAU ACCEPTATE PENTRU PUBLICARE

A. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN REVISTE ȘI VOLUME DE SPECIALITATE COTATE WOS:

V. Carlescu, C.M.Oprisan, **B. Chiriac**, G.Ianuș, D.N.Olaru, *Influence of Hand Sanitizers on the Friction Properties of the Finger Skin Amid the COVID-19 Pandemic*, *Innovation in Mechanical Engineering*, icieng, 2021, pp.420-428 https://doi.org/10.1007/978-3-030-79165-0_39

C.M. Oprisan, **B. Chiriac**, V. Carlescu and D N Olaru, Friction forces on human finger skin, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 724, International Conference on Tribology (ROTRIB'19) 19-21 Septembrie 2019, Cluj- Napoca, Romania, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/724/1/012059/meta>

B. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN REVISTE ȘI VOLUME INDEXATE BDI

B. Chiriac, C.M. Oprisan, V. Carlescu, D.N. Olaru, Friction coefficient between glass surfaces and soft materials, [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#), Volume 1262, [The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering \(ACME 2022\) 09/06/2022 - 10/06/2022 Online](#)

C M Oprisan, **B Chiriac**, V Cârlescu and D N Olaru, Influence of the stiffness and the speed on the stick-slip process, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 997 (2020) 012016 doi:10.1088/1757-899X/997/1/012016

C. M. Oprisan, **B. Chiriac**, A. Tufescu, D. N. Olaru, Static and dynamic friction coefficient in low loads and sliding speed conditions, [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](#), Volume 1262, [The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering \(ACME 2022\) 09/06/2022 - 10/06/2022 Online](#)

G. Achitei, A.I. Dontu, **B. Chiriac**, A. Popescu, State-of-the-Art and Future Trends of Thermoelectric Generation System in Automotive Industry, *ICIR EUROINVENT*, Springer Proceedings in Materials, volume 38, 2023.

D.N. Olaru, C. M. Oprisan, B. Chiriac, V. Carlescu, A. Tufescu, V.C. Stamate, Kinetic and Static friction coefficient in stick-slip motion, *MMT Symposium*, Portugal, 5 July 2024 <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4886251> (În curs de publicare)

B. Chiriac, A. Tufescu, D. Olaru, A. Lapusneanu, Exploring the environmental implications of static and kinetic friction coefficient: A study on the contact between glass and soft materials, *International Conference ACME 2024*, 6-7 June, *Environmental Engineering and Management Journal*, <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/> (acceptată pentru publicare)

B. Chiriac, C.M. Oprisan, V. Carlescu, D.N. Olaru, Static and Dynamic friction coefficient for glass surfaces, 10th International Conference on Tribology – Balkantrib 20, Serbia, May 20-22, 2021(Online).