

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" FACULTATEA DE MECANICĂ DIN IAȘI



Bld. Prof. Dr. Doc. Dimitrie Mangeron, 67, Iași, România

Cercetări privind modelarea proceselor de frecare în regimuri tranzitorii

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Mat. Inf. Cezara - Măriuca OPRIŞAN

Conducător de doctorat:

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

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI R E C T O R A T U L

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de **11.09.2024**, la **ora 11:00**, în **Sala de Conferințe "Cezar Oprișan" (M3)** din cadrul Facultății de Mecanică a Universității Tehnice "Gheorghe Asachi" din lași , va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

" Cercetări privind modelarea proceselor de frecare în regimuri tranzitorii"

elaborate de doamna mat.inf OPRIŞAN Cezara Măriuca, în vederea conferirii titlului ştiinţific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din: 1. Conf. univ. dr. ing. IANUŞ Gelu	președinte
Decan, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi Iasi	
2. Prof. em. univ. dr. ing. OLARU Dumitru	conducător de doctorat
Profesor, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași	
3. Prof. em. univ. dr. ing. TUDOR Andrei	referent oficial
Profesor, Universitatea Naționala de Știința și Tennologie POLITEHNICA din Bucuresti	
4 Prof univ dr habil ing Al ACI Stelian	referent oficial
Profesor, Universitatea "Ștefan cel Mare" din Suceava	
 5. Prof. univ. dr. habil. ing. BUJOREANU Carmen Profesor, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași 	referent oficial

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



Secretar universitate,

Ing.¢ristina NAGÎŢ

Mulțumesc conducătorului meu științific, Prof.Em.Dr.Ing.Dumitru Olaru, pentru îndrumarea, competența, sprijinul deosebit acordat în elaborarea acestei lucrări și în întreaga activitate științifică din domeniul Tribologiei si, de asemenea, pentru inițierea mea prin aceste etape ale dezvoltării profesionale și personale!

Mulțumesc referenților oficiali:Prof.Hab.Dr.Ing Carmen Bujoreanu – Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi"Iași, Prof.Em.Dr.Ing Andrei Tudor – Universitatea "Politehnica"București, Prof.Hab.Dr.Ing.Stelian Alaci – Universitatea "Ștefan cel Mare" Suceava, Conf.Dr.Ing.Gelu Ianuș - Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi"Iași, pentru timpul dedicat analizei acestei teze și pentru onoarea și efortul depus pentru a lua parte la susținerea publică a sa!

Mulțumesc membrilor comisiei de coordonare : Prof.Hab.Dr.Ing Carmen Bujoreanu, Prof..Dr.Ing.Gheorghe Prisăcaru și Prof.Dr.Ing.Viorel Paleu, pentru evaluarea lucrării, sfaturile și sugestiile oferite și toată susținerea acordată pe întreaga perioadă de desfașurare a studiilor doctorale!

Mulțumesc tuturor colegilor și, în mod special: Conf.Dr.Ing Ana Tufescu, Conf.Dr.Ing. Ciprian Stamate, Conf.Dr.Bioing. Vlad Carlescu, pentru suportul științific și tehnic, dar și pentru discuțiile purtate pe parcursul acestor ani de cercetare!

Mulțumesc tuturor persoanelor care au adus observații asupra conținutului și consistenței lucrării în scopul îmbunătățirii nivelului academic al tezei și tutuor celor care m-au încurajat și susținut, în mod deosebit, domnișoarei Mihaela Samoil!

Mulțumesc soțului meu, mamei mele și fratelui meu pentru că au fost lânga mine când mi-a fost cel mai greu și, nu in ultimul rând,

Mulțumesc tata!

CUPRINS

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE	3
CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND FRECAREA TRIBOSISTEME DE ALUNECARE	. ÎN 5
2.1. Frecarea uscată de alunecare	5
2.1.2. Coeficientul de frecare	6
Componenta de adeziune a coeficientului de frecare de alunecare	6
Componenta mecanică a coeficientului de frecare de alunecare	7
2.1.3. Coeficienții de frecare statică și cinetică	7
2.5. Concluzii	12
CAPITOLUL 3. MODELE MATEMATICE PENTRU FRECAREA LA ALUNECA ÎN MIȘCARI ALTERNATIVE	RE 13
3.1. Modele de frecare statică	13
3.2. Modele de frecare dinamice	16
3.3. Concluzii	16
CAPITOLUL 4. STUDIUL EXPERIMENTAL AL ALUNECĂRII CU INTERMITE CAUZATĂ DE FRECARE	NŢĂ 17
4.1. Echipamente utilizate	17
4.2. Prezentarea metodelor de testare "Stick–Slip"	21
4.2.1. Metoda oscilatorului unidirecțional	21
4.2.2. Utilizarea accelerometrului pentru studiul fenomenului de stick-slip în varianta oscilatorului unidirecțional	23
CAPITOLUL 5. REZULTATE EXPERIMENTALE	24
5.1. Rezultate obținute prin metoda oscilatorului unidirecțional	24
5.1.1. Rezultate obținute prin alunecare pe suprafețe plane, cu presiune de contact de 0 MPa).002 24
5.1.2. Testări de alunecare cu intermitență oțel-oțel în condiții uscate	25
5.1.2.1. Rezultate ale testărilor de alunecare cu intermitență oțel-oțel pe suprafețe pla	ane 28
5.1.2.2. Rezultate ale testărilor de alunecare cu presiune ridicată (trei bile) pe suprafe plane din oțel	ețe 30
CAPITOLUL 6. MODELAREA ȘI SIMULAREA MIȘCĂRII DE STICK-SLIP	33
6.1. Modelarea vitezelor și a accelerațiilor în procesele de alunecare	33
6.1.1. Variația vitezei și a accelerației în procesul de stick-slip	33
6.2. Stabilirea dependenței de timp a coeficienților de frecare statici în fazele de aderență	í41
6.3. Simularea fenomenului de stick-slip cu modelul Zuleeg	42

CAPITOLUL 7. MODELAREA FRECĂRII ÎN MIȘCARE DE ALUNECARE	
ALTERNATIVĂ	47
CAPITOLUL 8. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE	
8.1. Concluzii generale	50
8.2. Contribuții originale	52
BIBLIOGRAFIE – Selecție	54
ANEXA A.1	

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

Termenul "tranzitoriu" folosit pentru funcționarea unui sistem, în conformitate cu DEX, se definește ca fiind un termen ce caracterizează o funcționare a sistemului prin variația în timp a cel puțin unei mărimi [Dexonline.ro].

Dacă ne referim la un tribosistem de alunecare în care forța de frecare este mărimea care interesează în timpul funcționării, atunci pot exista, în general, două variante de funcționare: o funcționare în care forța de frecare se menține constanta pe o durată de timp impusă și o funcționare în care au loc procese tranzitorii, de modificare a forței de frecare pe durate de timp impuse. Spunem că în primul caz avem de-a face cu o funcționare uniformă, fără modificări ale forței de frecare, iar în al doilea caz, spunem ca avem un regim de funcționare tranzitoriu, în care forța de frecare variază pe durata timpului impus. Sunt numeroase cazurile practice în care frecarea într-un tribosistem de alunecare este tranzitorie, în majoritatea cazurilor au loc modificări ale sarcinilor normale, modificări ale vitezelor, prezența sau absența unui lubrifiant, variații ale temperaturii etc., modificări inerente funcționării majorității tribosistemelor.

Cu toate acestea, există și regimuri tranzitorii cu fluctuații importante ale forței de frecare, fără a se interveni din exterior, alunecarea realizându-se la viteze mici. În acest caz, pentru un tribosistem de alunecare, la care nu se intervine din exterior, poate să apară o succesiune de fenomene de aderență și de alunecare, forța de frecare variind între anumite limite, fenomen cunoscut sub denumirea de "Stick-slip" sau, în românește, alunecare sacadată. Prin urmare, parametrul important al frecării, adică forța de frecare, are variații în timp, deci fenomenul este de tip tranzitoriu.

Care este cauza care conduce la acest fenomen tranzitoriu? Răspunsul este legat de variațiile celor doi coeficienți de frecare: **coeficientul de frecare statică** și **coeficientul de frecare cinetică**. Fără a interveni din exterior, fenomenul de alunecare, înainte de a se produce, presupune o creștere a forței de tangențiale datorată aderenței suprafețelor în contact. Această forță de aderență raportată la forța normală reprezintă coeficientul de frecare statică iar, pentru un tribosistem dat, acest coeficient static crește odată cu creșterea timpului de aderență sau de staționare dintre suprafețele în contact. Această creștere are o limită care, depășită, duce la alunecarea bruscă a suprafețelor în contact. În momentul în care începe alunecarea, coeficientul de frecare devine coeficient de frecare cinetică (dinamic). Coeficientul de frecare cinetică scade odată cu creșterea vitezei de alunecare, iar această scădere are și ea o limită, când alunecarea se oprește și suprafețele în contact încep un nou proces de adeziune.

Ca urmare, pe un interval de timp stabilit fenomenul de stick-slip va continua cu variații mai mari sau mai mici ale fluctuațiilor forțelor tangențiale, evident funcție de starea suprafețelor în contact dar și de elasticitatea sistemului mecanic în care funcționează tribosistemul.

Fenomenul de stick-slip se manifestă în numeroase sisteme mecanice și se percepe prin zgomot și vibrații (frânarea bruscă a roților de la autovehicule sau trenuri, vibrațiile produse la tribosistemul roată – șosea, la opriri bruște sau la demarări rapide etc. Apoi, o ușă lăsată în bătaia vântului, va produce un scârțâit care este, de fapt un fenomen de stick-slip în tribosistemul de prindere a ușii. Eminescu în poezia "Sara pe deal" face o fermecătoare descriere a fenomenului de stick-slip: "**Scârție-n vânt** cumpăna de la fântână,/ Valea-i în fum, fluiere murmură-n stână".

Exemplele plăcute ale fenomenului sunt multiple atunci când ascultăm într-o sală de concerte o orchestră de vioare unde, banalul tribosistem de alunecare, realizat între corzile de la vioară și firele de la arcușul mânuit cu măiestrie de solist, ne încântă auzul.

Fenomenul de stick-slip poate fi uneori și un fenomen catastrofal, dacă ne referim la cutremure. Aici, plăcile tectonice pot aluneca brusc unele peste altele, după ce au fost menținute

în stare de aderență o anumită perioadă de timp și împinse ca urmare a fenomenelor dinamice din interiorul pământului.

Revenind la domeniul mecanic, fenomenul de stick-slip este necesar a fi evitat sau redus pe cât e posibil. În acest sens există numeroase studii și cercetări privind metode de a reduce fenomenul prin utilizarea unor combinații de materiale adecvate, prin utilizarea unor lubrifianți aditivați, prin creșterea rigidității sistemelor în care funcționează tribosistemele de alunecare cu risc de stick-slip, prin creșterea vitezelor de alunecare etc.

Prin prezenta teză noi ne-am propus să modelăm matematic atât fenomenul de stick-slip cât și coeficienții de frecare statică și cinetică pentru câteva tipuri de materiale componente ale tribosistemului de alunecare utilizat. Modelarea s-a făcut pe baza numeroaselor experimente realizate în Laboratorul de Tribologie din Departamentul IMMR al Facultății de Mecanică. Literatura prezintă diverse tribosisteme și echipamente utilizate pentru studiul fenomenului de stick-slip.

Noi am utilizat un tribosistem de alunecare simplu, format dintr-o greutate (numită și masă oscilantă) așezată pe o suprafață plană aflată în mișcare de translație cu viteze constante. Greutatea a fost cuplată la un senzor de forțe printr-un arc elicoidal de tracțiune. Sistemul conceput a fost atașat la Tribometrul CETR UMT-2 și am avut astfel posibilitatea să variem viteza de translație a mesei tribometrului în limite cuprinse între 0,02mm/s și 8mm/s, să culegem în timp real o serie de parametri: forța tangențială Fx, timpul, viteza, deplasarea. Totodată, cu ajutorul softului aferent Tribometrului, am reușit să obținem numeroase înregistrări ale variației forței tangențiale Fx, în funcție de timp, sau în funcție de distanța parcursa de masa liniară a Tribometrului. Deși, standul oferă posibilitatea să se utilizeze testări și cu o forță normală impusă, Fz, am preferat varianta cu greutate, aceasta oferind posibilitatea de a măsura și accelerația în fazele de alunecare bruscă, dar și menținerea constantă a forței normale.

În concordanță cu tematica tezei, după efectuarea diverselor teste pe tribometru, s-au realizat următoarele modelări care sunt prezentate, în detaliu, în Capitolul 6:

- Modelarea vitezei de alunecare în procesele de alunecare bruscă, a accelerațiilor și validarea accelerațiilor cu cele măsurate în funcționare;
- Modelarea variației coeficientului de frecare cinetică în fazele de alunecare pe baza echilibrului dinamic al masei oscilante și confirmarea scăderii acestuia la creșterea vitezei de alunecare;
- Modelarea variației coeficientului de frecare statică pentru fiecare zonă de aderență prin utilizarea modelului lui Leine, adecvat fiecărui caz în parte.
- Simularea fenomenului de stick-slip, cu obținerea unui grafic de variație a deplasărilor masei oscilante, plecând de la un model impus pentru coeficientul de frecare cinetică și compararea cu graficul obținut experimental.

O parte din elementele de modelare și simulare, echipamentele folosite, metodologia și rezultatele sunt diseminate în 9 lucrări publicate în volume ale unor conferințe internaționale.

CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND FRECAREA ÎN TRIBOSISTEME DE ALUNECARE

2.1. Frecarea uscată de alunecare

Primul tribolog care a studiat frecarea poate fi considerat Leonardo da Vinci (1452-1519), geniul creator în numeroase domenii ale artei, tehnicii, filozofiei sau astronomiei. Astfel, Leonardo da Vinci a făcut primele cercetări experimentale privind frecarea de alunecare, timp de peste 20 de ani, experimente care nu au fost publicate la acea vreme dar care se regăsesc în numeroasele schiţe și notații făcute în caietele lui [Pitenis, 2014]. În Fig. 2.1 este prezentată o schiţă a standului utilizat de Leonardo pentru studiul frecării, schiţă care se află în "Codex Arundel" de la Biblioteca Britanică, (f.40 V). El a înţeles importanţa pe care o joacă frecarea în funcționarea diverselor maşinării și modul cum frecarea limitează randamentul acestora. În 1493 Leonardo da Vinci a pus bazele primelor două legi ale frecării de alunecare:

- (i) Frecarea nu depinde de mărimea suprafeței de contact dintre cele două elemente care alunecă unul față de altul;
- (ii) Rezistența la frecare este direct proporțională cu forță de apăsare aplicată.



Fig. 2.1 Schema instalației experimentale realizate Leonardo da Vinci prelevată dintr-o fotografie de la Biblioteca Britanică din "Codex Arundel" de Leonardo da Vinci (datând între 1480 și 1518), (f. 40 V) [Pitenis, 2014]

În 1699, fizicianul francez Guillaume Amontons a redescoperit legile de frecare după ce a studiat alunecarea uscată între două suprafețe plane și a stabilit existența a două legi fundamentale [Bushan,2013]:

- (i) Forța de frecare este direct proporțională cu forța normală;
- (ii) Forța de frecare nu depinde de suprafața aparentă de contact.

Cele două legi au fost verificate mai târziu, în 1875, de fizicianul francez Charles-Augustin Coulomb care a adăugat și o a treia lege:

(iii) Forța de frecare este independentă de viteză, după ce a început mișcarea de alunecare.

Tot Coulomb a făcut o distincție clară între **frecarea statică** și frecarea **cinetică** [Bushan,2013]. Bowden și Tabor (1950) [Bushan,2013] au pus bazele teoriei dezvoltării și ruperii microsudurilor care se dezvoltă la nivelul vârfurilor rugozităților, unde presiunea de contact este mare (presiune reală de contact). O primă teorie unificatoare este propusă de Bowden și Tabor în 1964 [Bushan,2013] și propune ca forța de frecare ce se dezvoltă în alunecare (F_f) să fie cuantificată prin însumarea a două componente [Bushan,2013]:

 (F_a) – forța necesară forfecării microjoncțiunilor formate la nivelul vârfurilor rugozităților; (F_d) – forța dezvoltată în procesul deformațiilor elastice și plastice ale vârfurilor rugozităților.

$$F_f = F_a + F_d \tag{2.1}$$

Relația (2.1) poate fi extrapolată și la coeficienții de frecare, după cum urmează [Bushan,2013]:

$$\mu_f = \mu_a + \mu_d \tag{2.2}$$

unde μ_f este coeficientul global de frecare, μ_a este **componenta de adeziune** a coeficientului de frecare și μ_d este **componenta mecanică** a coeficientului de frecare cauzată de deformări elastice și plastice în zona contactului.

2.1.2. Coeficientul de frecare

Definit, de obicei, ca un raport dintre forța tangențială și forța normală dintre suprafețele tribosistemului de alunecare, coeficientul de frecare este o mărime adimensională, cu valor uzuale subunitare, dar care pot fi și mai mari și care depinde de un complex de factori de natură mecanică (rugozități, durități, modul de elasticitate), de natură metalurgică (natura materialelor în contact și energiile de adeziune specifice), de natură chimică (existența unor straturi de reacție la nivelul suprafețelor), de prezența unui strat de lubrifiant.

Dacă ne referim la două suprafețe uscate, aflate în contact direct și în mișcare relativă, uzual se consideră ca fiind importante în stabilirea valorii coeficientului de frecare, cele două componente stabilite de Bowden și țabor: **componenta de adeziune** și **componenta mecanică**.

Componenta de adeziune a coeficientului de frecare de alunecare

La nivelul unui tribosistem de alunecare, ca cel prezentat în figura 2.2 [Olaru, 2020] forța normală se distribuie pe vârfurile rugozităților generând presiunea reală (p_r) și, respectiv, aria reală (A_r) la nivelul contactului.



Fig. 2.2 Ariile reale elementare în zona de contact –(a)[Olaru,2020] și o secțiune cu evidențierea contactelor la nivelul vârfurilor de rugozități –(b) [Bushan,2013]

În conformitate cu teoria adeziunii a lui Bowden și Tabor din 1950 [Bushan,2013] forța de frecare generată de adeziune la nivelul suprafeței de contact și care se opune mișcării F_f reprezintă o însumare a forțelor elementare de forfecare a microjoncțiunilor dF_{fi} . Considerând, într-o primă aproximație, că tensiunile tangențiale la nivelul microjoncțiunilor sunt egale (τ_{fa}) se obține o relație simplificată a coeficientului de frecare de adeziune (μ_a) [Bushan,2013]:

$$\mu_a = \frac{\tau_{fa}}{p_r} \tag{2.3}$$

unde p_r reprezintă valoarea medie a presiunii reale din tribosistem.

În teză sunt prezentate o serie de relații bazate pe indicele de plasticitate ψ introdus de Greenwood & Williamson în 1966 [Olaru, 2023].

Ca o concluzie generală, **componenta de adeziune** μ_a depinde de mai mulți factori: natura și caracteristicile mecanice și fizice ale materialelor în contact, mărimea rugozităților, temperatura, timpul de realizare a contactului și mediul în care funcționează cupla de frecare.

Componenta mecanică a coeficientului de frecare de alunecare

Componenta mecanică a coeficientului de frecare μ_d reprezintă rezultatul energiei mecanice consumate prin deformarea elastică sau plastică a rugozităților, dar și prin zgârierea suprafeței cu duritate mai mică de rugozitățile suprafeței cu duritate mai mare, sau de diversele particule dure, intercalate între suprafețele de contact. Componenta mecanică crește odată cu creșterea rugozităților.

Și în acest caz, determinarea componentei mecanice are la baza o serie de relații complexe, bazate pe caracteristicile de rugozitate, pe presiunea reală, indicele de plasticitate, duritatea materialelor. În teză este prezentată metodologia de calcul a componentei mecanice bazată pe relațiile dezvoltate de Kragelsky și Alisin [Kragelshy, 1981]

În Fig. 2.3, se prezintă variația coeficientului de frecare global în funcție de abaterea medie pătratică a rugozităților pentru o cuplă de frecare cu alunecare, cu suprafețele de contact din Cu, la viteza de alunecare de 0,1mm/s și la o forță de apăsare de 10 N [Bushan,2013]. Se constată că, **la rugozități mici, componenta de adeziune** este dominantă și coeficientul de frecare global este mai mare, în timp ce, la rugozități mari, **componenta mecanică este dominantă**, ducând la creșterea coeficientului de frecare.

Există, pentru fiecare combinație de materiale în contact, o rugozitate optimă, cu un minim al coeficientului de frecare.



Fig. 2.3 Variația coeficientului de frecare în funcție de rugozitate pentru o cuplă de frecare cu alunecare din suprafețe de Cu [Bushan,2013]

2.1.3.Coeficienții de frecare statică și cinetică

Într-un tribosistem de alunecare, forța de frecare necesară pentru a iniția mișcarea este mai mare decât forța de frecare dezvoltată în procesul de alunecare. Fenomenul se explică prin dezvoltarea în timpul staționării, a unor procese de micro adeziune la nivelul vârfurilor rugozităților, forța necesară desfacerii acestor microadeziuni fiind, de fapt, forța de frecare statică. In consecință, coeficientul de frecare la inițierea mișcării, numit **coeficient de frecare statică** μ_s , este mai mare decât coeficientul de frecare din procesul de alunecare, **numit coeficient de frecare cinetică** μ_k . O prezentare tipică a celor două situații (aderența cu un coeficient de frecare statică și alunecarea uniformă cu un coeficient de frecare cinetică) este prezentată în Fig. 2.4 după Hakon Nordhagen [Nordhagen,2003].

Valoarea coeficientului de frecare statică depinde de natura materialelor în contact, de calitatea suprafețelor (mărimea rugozităților), de prezența unor straturi de produse de reacție în aer și de timpul de staționare în contact ale suprafețelor cuplei de frecare. Pentru dependența coeficientului de frecare statică în raportul cu timpul de staționare sunt prezentate în teză diverse relații. În cadrul tezei s-a utilizat relația stabilită de Leine et al. [Leine et al.,1998] cu următoarea formulă:

$$\mu_s(t) = \mu_{so}(1 + (\beta - 1)(1 - e^{-\alpha \cdot t_s}))$$
(2.4)

unde: $\beta = \mu_{s\infty} / \mu_{so}$,

- μ_{so} este coeficientul de frecare static la momentul inițial, pentru un timp de staționare $t_s = 0$;
- $\mu_{s\infty}$ este coeficientul de frecare static după o perioadă îndelungată de staționare a suprafețelor în contact;
- t_s este timpul de staționare a suprafețelor în contact exprimat în secunde;
- α este un exponent determinat astfel încât relația (2.4) să aproximeze cât mai fidel variațiile coeficientului de frecare statică obținute pe bază experimentală.



Fig. 2.4 Variația coeficientului de frecare la pornire (coeficientul de frecare statică μ s si coeficientul de frecare cinetică μ_K) [Nordhagen,2003]

Coeficientul de frecare cinetică este coeficientul de frecare ce caracterizează tribosistemul de alunecare în procesul de mișcare relativă a celor două suprafețe în contact. Dacă modelul Coulomb consideră că acest coeficient de frecare variază doar în funcție de natura materialelor în contact, realitatea și cercetările din ultima perioadă au arătat că, pe lângă natura materialelor, mai sunt și alți factori care influențează valoarea acestui coeficient, viteza de alunecare fiind un factor important, în special în zona vitezelor reduse.

Raportat la viteza de alunecare, în cazul vitezelor mici, coeficientul de frecare cinetică scade la creșterea vitezei de alunecare. Există o serie de relații care se bazează pe modelul Stribeck de scădere a coeficientului de frecare odată cu creșterea vitezei de alunecare dar până la o anumită limită, după care urmează o creștere a coeficientului de frecare cinetică.

Un model simplu, liniar este cel propus de Rao [Rao, 2011] cu următoarea relație:

$$\mu_k(v_a) = \mu_s - c \cdot v_a \tag{2.5}$$

relația fiind valabilă pentru $v_a < v_{lim}$, unde v_{lim} reprezintă o viteză limită până la care coeficientul de frecare scade, după această valoare, coeficientul de frecare cinetică crește, conform figurii 2.5.

În relația (2.5) μ_s este coeficientul de frecare statică, iar *c* este un parametru exprimat în (s/m), care depinde de natura materialelor în contact.



Fig. 2.5 Variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare după modelul Rao [Rao, 2011]

Un model complex, utilizat în teză, pentru variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare v_a , este modelul propus de Zuleeg [Zuleeg,2015] și care utilizează un model de tip Stribeck pentru mișcarea de alunecare, într-un sens și în sens opus, cu următoarea expresie:

$$\mu_k(v_a) = sign(v_a) \cdot \left[|v_a| \cdot a_1 + a_2 + a_3 \cdot e^{\frac{-|v_a|}{a_4}} \right]$$
(2.6)

unde: $a_1, a_2, a_3, si a_4$ sunt constante ce se determină pe baza determinărilor experimentale, va este viteza de alunecare la nivelul suprafețelor în contact.

Zuleeg [Zuleeg 2015] evidențiază faptul că modul de variație a coeficientului de frecare cinetic, la viteze mici de alunecare, este hotărâtor în dezvoltarea fenomenului de stick-slip.

Conform lui Zuleeg [Zuleeg 2015] în procesul de alunecare la viteze mici variația coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare este hotărâtoare în modul de manifestare a mișcării de alunecare. Astfel, o scădere a coeficientului de frecare cinetică la viteze mici conduce la o alunecare cu o accentuată prezență a fenomenului de stick-slip (fig. 2.6.a), în timp ce o menținere constantă a coeficientului de frecare cinetică la viteze mici, urmată de o creștere, conduce la o amortizare rapidă a fenomenului de stick-slip (fig. 2.6. b). Atunci când coeficientul de frecare cinetică crește odată cu creșterea vitezei, chiar în zona vitezelor mici, alunecarea este una continuă, fără manifestări de stick-slip (Fig.2.6.c).



Fig. 2.6. Trei modele de alunecare distincte în funcție de variația coeficientului de frecare cu viteza de alunecare [Zuleeg,2015], unde **µ** reprezintă coeficientul de frecare cinetică, **v** este viteza de alunecare, **s** este distanta pe care se deplasează o masa care alunecă iar **t** este timpul in care se desfășoară procesul de alunecare (cu stick – slip sau fără stick-slip)

2.2 Frecarea de alunecare cu intermitență. Fenomenul de Stick-Slip

În multe sisteme tribologice de alunecare, care funcționează în condiții uscate, forțele de frecare au un comportament neliniar ca urmare a proceselor alternative de aderență și de alunecare pe suprafața de contact. Diferențele dintre coeficienții de frecare statică și cinetică, corelate atât cu rigiditatea sistemului, cât și cu viteza de alunecare generează mișcarea de **stick-slip**. În general, în aplicațiile mecanice, mișcarea de stick-slip este generată în condiții de viteză redusă (ca în ghidajul de glisare pentru mașini-unelte). În alte sisteme tribologice (ca la viori) elasticitatea coardelor viorii este principala cauză pentru vibrațiile coardelor cauzate de procesele stick-slip. În multe aplicații mecanice, valorile coeficienților de frecare statică și cinetică sunt considerate valori constante în funcție de perechea de materiale în contact. Pentru a obține un model dinamic riguros în condiții de stick-slip nu se poate folosi coeficientul de frecare clasic al lui Coulomb. De asemenea, luarea în considerare a valorilor constante pentru coeficientul de frecare static și dinamic nu poate explica apariția proceselor de "stick-slip".

Literatura prezintă numeroase abordări ale fenomenului de alunecare cu intermitență sau cu "Stick – slip", pentru diverse sisteme mecanice cu alunecare pe o singură direcție sau pe două direcții.

Modelul clasic al fenomenului de **stick-slip** presupune un sistem de alunecare unidirecțional constând dintr-o masă, legată la un sistem fix printr-un element elastic și așezată pe o bandă aflată în mișcare de translație cu o viteză constantă, impusă. Modelarea unui asemenea sistem, cunoscut sub denumirea de *"single degree-of-freedom mass-spring system"* este prezentată de către Zuleeg [Zuleeg,2015]. În Fig. 2.7 este prezentat schematic modelul Zuleeg.



Fig. 2.7 Modelul fizic utilizat de Zuleeg [Zuleeg,2015]

Zuleeg propune pentru coeficientul de frecare modelul dat de relația (2.6) și integrează ecuația diferențială a mișcării mesei pe bandă:

$$\mathbf{n} \cdot \ddot{\mathbf{x}} + k \cdot \mathbf{x} - \mu_k (v_b - \dot{\mathbf{x}}) \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} = 0$$
(2.7)

în care:

m este masa așezata pe banda aflată în mișcare;

 v_b este viteza de deplasare a benzii;

k este rigiditatea arcului;

 \ddot{x} și \dot{x} sunt accelerația și, respectiv, viteza masei m;

n

Utilizând parametrii $a_1 = 1 m/s$; $a_2 = 0.2 m/s$; $a_3 = 0.3 m/s$ și $a_4 = 0.1 m/s$, Zuleeg [Zuleeg, 2015] integrează ecuația diferențială (2.7) și obține variația deplasării x și a vitezei masei \dot{x} , în funcție de timp, așa cum se poate vedea în Fig. 2.8, rezultând o mișcare tipică de stick-slip.



Fig. 2.8 Modelarea fenomenului de stick slip cu variația coeficientului de frecare model Stribeck dat de relația (2.24) [Zuleeg,2015]

Majdoub și colab. [Majdoub, 2015] au studiat răspunsurile dinamice ale unui sistem elastic cu un singur grad de libertate având contact de alunecare prin includerea unui coeficient de frecare dependent de viteză utilizând pentru coeficientul de frecare dinamic un model de frecare polinomial. Fenomenul de "stick-slip" în microsisteme a fost analizată de Liu și colab. [Liu, 2015] luând în considerare cinci modele de frecare: modelul Coulomb, modelul Stribeck, modelul Dahl, modelul LuGre și modelul de frecare elastoplastic. Experimentele realizate de autori au demonstrat că cel mai bun model de stick-slip în microsisteme este modelul LuGre. Alte modele complexe pentru evaluarea fenomenului de "stick-slip" au fost prezentate în [Papangelo, 2017] și [Farid, 2010]. Stoica și colaboratorii [Stoica, 2017] au studiat experimental procesele stick-slip în frâna auto cu disc, care operează în intervale de viteze mici și foarte mici.

Modelarea fenomenului de stick-slip, în corelație cu caracterul fractal al rugozităților din contactele rată- șină specifice căii ferate, a fost studiată experimental de către Laura Maria BABICI (Babici, 2023) în cadrul tezei de doctorat. Testele efectuate pe tribomodele de tip roată-

șină, în condițiile unor presiuni de contact cuprinse în intervalul (48 - 83) MPa și viteze de alunecare în intervalul (0,01 - 0,2)mm/s au au pus în evidență o strânsă corelație între fenomenul de stick-slip și amplitudinea AE (emisiei acustice).Totodată, Babici a stabilit valori ale coeficienților de frecare statică cuprinse în intervalul (0,31-0,58), valori mai mari corespunzând creșterii presiunii și valori ale coeficienților de frecare cinetici în intervalul (0,16 - 0,28), valori mai mari corespunzând presiunilor mai mici.

Modelarea fenomenului de stick-slip la nivelul pielii umane a fost studiată de Profesorul Andrei Tudor de la Politehnica din București cu aspecte interesante și modele originale. Astfel în teza de doctorat coordonată de profesorul A. Tudor, A. Călin [Călin, 2022] propune, pentru alunecarea unui vârf sferic pe suprafața degetelor umane, următoarele relații logaritmice pentru coeficienții de frecare statici și cinetici:

$$\mu_S = a_S + b_S \cdot \ln\left(\frac{\tau}{\tau_o}\right) \tag{2.8}$$

$$\mu_K = a_K - b_K \cdot \ln\left(\frac{v}{v_o}\right) \tag{2.9}$$

Unde a_s , b_s , a_k și b_k sunt coeficienți determinați experimental, $\frac{\tau}{\tau_o}$ reprezintă timpul de staționare sub formă adimensională, iar $\frac{v}{v_o}$ reprezintă viteza de alunecare adimensională. În condițiile unui comportament vâsco- elastic, Călin [Călin, 2022] pune în evidență prezența a doi parametri (parametrul de încărcare λ și parametrul de amortizare ζ), care controlează apariția fenomenului de stick-slip.

Punerea în evidență a fenomenului de stick-slip a fost realizată experimental și de Barnea [Barnea, 2013], la contactul dintre pielea degetelor umane și cilindri din diverse materiale în mișcare de alunecare pe suprafața degetelor, în direcție transversală.

2.5. Concluzii

După un sumar istoric al proceselor de frecare, începând practic cu cercetările lui Leonardo da Vinci și ajungând la stadiul actual al cercetărilor, prezentul capitol s-a axat pe următoarele aspecte considerate de noi ca fiind esențiale în modelarea frecării. Astfel, s-au pus în evidența cele două componente de bază ale frecării: **componenta de adeziune** și **componenta mecanică**, cu relațiile aferente pentru calculul coeficienților de frecare, dezvoltate de diverși cercetători.

Un al doilea aspect important abordat se referă la cele două componente ale coeficientului de frecare abordate din punct de vedere dinamic: **coeficientul de frecare static**ă și **coeficientul de frecare cinetică** sau, numit de unii cercetători, **coeficient de frecare dinamic**.

S-au prezentat diversele relații de variație ale coeficientului de frecare statică, în funcție de timpul de staționare în contact a elementelor ce formează un tribosistem de alunecare.

Pe de altă parte s-au prezentat relații de dependență a coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare. Cercetările prezentate arată că pentru a se produce o alunecare cu intermitență sau, în limbajul consacrat, cu stick-slip, coeficientul de frecare cinetică trebuie să scadă odată cu creșterea vitezei de alunecare. În acest sens s-au prezentat o serie de modele de variație a coeficientului de frecare cinetică în funcție de viteza de alunecare, reținându-ne atenția, în mod deosebit, modelul lui Zuleeg, model ce a si fost aplicat pentru câteva cazuri de alunecare cu stick-slip în Cap. 6.

În finalul acestui capitol s-au prezentat unele metode de reducere a fenomenului de stickslip, insistându-se pe rolul benefic al vibrațiilor.

CAPITOLUL 3. MODELE MATEMATICE PENTRU FRECAREA LA ALUNECARE ÎN MIȘCARI ALTERNATIVE

În general, cunoașterea regimului de frecare precum și a forțelor de frecare dezvoltate la tribosisteme este importantă în analiza cinetică și dinamică a sistemelor mecanice. Procesul de frecare se manifestă sub diverse forme: frecarea de alunecare uscată, frecarea la viteze mici cu dezvoltarea fenomenului de stick-slip, frecarea de alunecare în prezența lubrifiantului cu diversele regimuri (limită, mixt, cu film continuu de lubrifiant) evidențiate de curba Stribeck. În condițiile unei mișcări tranzitorii cu schimbare de sens a vitezei, apar probleme de întârzieri cauzate de frecare, de elasticitatea sistemelor mecanice, de vitezele de tranziție, de accelerație. Modelarea forțelor de frecare în aceste condiții, cu trecerea prin zero, ridică probleme complexe în utilizarea unor expresii matematice continue și derivabile.

Pennestrì și alții [Pennestrì,2016], Marques și alții. [Marques 2016,2019], clasifică modelele de frecare în **"modele de frecare statică"și "modele de frecare cinetică".**

3.1. Modele de frecare statică

Un model de frecare statică descrie relația dintre forța de frecare și viteza relativă dintre cele două corpuri, în condiții de echilibru, cu mișcare uniformă. Cel mai simplu și utilizat model static este clasicul **model Coulomb**, care definește forța de frecare ca o forță tangențială la suprafețele elementelor în contact, direct proporțională cu forța normală și având sensul opus vitezei de alunecare. Penestri et al. [Penestri et al., 2016] folosește următoarele relații:

$$F_{f} = -\mu_{k} \cdot F_{N} \cdot sign(v_{a}) \ pentru \ v_{a} \neq 0$$

$$F_{f} \leq \mu_{s} \cdot F_{N} \ pentru \ v_{a} = 0$$
(3.1)

unde μ_k este coeficientul de frecare cinetică, μ_s este coeficientul de frecare static, F_N este forța normală pe suprafața de contact, v_a este viteza de alunecare, iar $sign(v_a)$ este definit de relația:

$$sign(v_a) = \begin{cases} \frac{v_a}{\|v_a\|} dac\check{a} \|v_a\| \neq 0\\ 0 \quad dac\check{a} \|v_a\| = 0 \end{cases}$$
(3.2)

Într-un sistem de coordonate F și v_a , relațiile (3.1) se reprezintă grafic ca în Fig. 3.1-(a). Modelul este unul pur teoretic, întrucât trecerile prin zero a forțelor de frecare nu pot fi realizate instantaneu, iar relația (3.1) este una cu discontinuități la viteza de alunecare zero.

Dacă ne referim la corpul care este deplasat datorită forței de frecare, diagrama modelului Coulomb va avea configurația utilizată de Marques și alții [Marques 2016,2019] și prezentată în Fig. 3.1. (b), unde Fs este forța de frecare statică.



Fig.3.1 Modelul Coulomb clasic al forței de frecare (a) și modelul Coulomb cu frecare statică la viteză nulă (b)

Trecerea bruscă de la forța de frecare statică F_s la forța de frecare cinetică F_c (Fig. 3.1 b) nu se poate face fizic instantaneu. În realitate, pe măsură ce crește viteza de alunecare, apare o scădere a coeficientului de frecare și, implicit o reducere a forței de frecare la nivelul corespunzător relației lui Coulomb $F_c = \mu_k \cdot F_N$, unde F_N este forța normală pe contact.

Penestri [Panestri, 2016] propune, pentru trecerea de la frecarea statică la frecarea cinetică, modelul lui Benson, care are la bază curba Stribeck, model exprimat prin relația:

$$F_f = \left[\mu_k \cdot F_N + (\mu_s \cdot F_N - \mu_k \cdot F_N) \cdot e^{-c \cdot |v_a|}\right] sign(v_a)$$
(3.3)

unde c este o constantă care depinde de viteza de trecere de la coeficientul static la coeficientul cinetic.



Fig. 3.2 Modelul Benson cu variație de tip Stribeck [Panestri, 2016], [Marques 2016,2019]

Poziționarea în zona negativă sau pozitivă a forței de frecare în raport de sensul vitezei de alunecare depinde de corpul asupra căruia se exercită această forță. Astfel pentru două corpuri în contact, cu viteze tangențiale diferite, forța de frecare are sens invers vitezei de alunecare doar pentru corpul cu viteza mai mare. Pentru corpul conjugat, forța de frecare va fi egală cu forța de frecare ce acționează asupra primului corp dar va avea sensul invers, adică, va avea sensul vitezei de alunecare. În Fig.3.3 este prezentată schematic această situație. Astfel, dacă se consideră că

transmiterea mişcării de la corpul 1 la corpul 2 se face prin frecare și elementul 1 este cel conducător cu viteza tangențială mai mare, $v_1 > v_2$, atunci viteza de alunecare $v_a = v_1 - v_2$ va avea sensul vitezei v_1 iar forța de frecare ce se va dezvolta pe suprafața de contact dintre cele două corpuri și va acționa asupra corpului 1, $F_{f,1,2}$ va avea sensul invers forței de alunecare. Conform principiul acțiunii și reacțiunii, dacă nu intervin alte forțe tangențiale, asupra corpului 2 va acționa o forța de frecare $F_{f,2,1}$ care va fi egală cu forța $F_{f,1,2}$ dar va avea sensul vitezei de alunecare.



Fig. 3.3 Repartiția forțelor de frecare pe cele două corpuri în contact, în funcție de vitezele corpurilor

Ciornei și alții [Ciornei et al., 2020] propun următoarea variație a coeficientului de frecare uscată între două suprafețe de oțel, la schimbarea vitezei de alunecare:

$$\mu(v_a) = \frac{\mu_s}{v_{cr}}(v_a) \cdot H(v_{cr} - |v_a|) + \mu_k \cdot H(|v_a| - v_{cr}) \cdot sign(v_a)$$
(3.4)

unde:

- H(x) este funcția treaptă Heaviside, cu următoarea exprimare derivabilă:

$$H(x) = \frac{1}{1 + e^{-2 \cdot k \cdot x}}$$
(3.5)

- *vcr* este viteza critică de la care începe să se producă alunecarea (în sens pozitiv sau negativ);

- *k* este un exponent care evidențiază gradul de înclinare a curbei care trece prin zero și este în corelație cu viteza critică.

Sub acțiunea unei forțe normale F_N , forța de frecare $F_f(v_a) = \mu(v_a) \cdot F_N$ are o distribuție ce depinde de valoarea coeficientului de frecare statică, de valoarea coeficientului de frecare cinetică, de viteza critică și de coeficientul de pantă k. În Fig. 3.4 este prezentată o distribuție a forței de frecare pentru următoarele valori: $v_{cr} = 0.1 m/s$; $\mu_s = 0.4$; $\mu_k = 0.3$; $F_N = 10N$; k = 8 s/m



Fig. 3.7 Forța de frecare în funcție de viteza de alunecare [Ciornei et al.,2020]

Un model al forței de frecare, bazat pe curba Stribeck a fost dezvoltat și de Bo și Pavelescu [Bo&Pavelescu,1982] și utilizat de Marques și alții. [Marques 2016, 2019]. Există si alte modele de frecare statice cu diverse moduri de trecere prin zero precum: modelul Brown și McPhee, modelul Modelul Bengisu și Akay, modelul Threlfall, [Marques et al., 2016] și prezentată în teză.

3.2. Modele de frecare dinamice

Prezența rugozitătilor pe suprafețele cuplelor de frecare, a efectelor de inerție, a fenomenelor de adeziune asociate cu alunecarea, au determinat pe cercetători să dezvolte modele de frecare mai complexe, cunoscute sub denumirea de modele de frecare dinamice, care cuprind, alături de parametrii de stare utilizați în modelele statice și parametri suplimentari. Marques et al. [Marques, 2016] prezintă o selecție a celor mai importante modele de frecare cinetice, cu relațiile aferente. Astfel sunt prezentate modelele **Dahl**, **Reset Integrator**, **LuGre**, **Elasto - Plastic**, **Gonthier**, **Liang**. Pentru toate aceste modele sunt prezentate relațiile specifice care includ, de la caz, la caz, efecte de deformații elastice și elasto-plastice ale vârfurilor de rugozitate, fenomene de adeziune, efectul Stribeck, fenomene vâscoase, întreruperea frecării

3.3. Concluzii

Capitolul abordează diversele modele matematice, utilizate în fazele de tranziție prin schimbarea sensului vitezei. Trecerea de la sensul pozitiv la sensul negativ, întâlnită în multe tribosisteme de alunecare cu mișcare alternativă, este abordată sub diverse forme.

Astfel, pornind de la modelul clasic Coulumbian, când trecerea presupune un salt prin zero a forței de frecare, sunt prezentate numeroase modele în care trecerea de la o viteză negativă la una pozitivă se face cu luarea în considerare a forței de frecare statică și a forței de frecare cinetică, cu diferențe mai mari sau mai mici, cu includerea efectului Stribeck, cu înclinări diferite a curbei de variație a forței de frecare.

CAPITOLUL 4. STUDIUL EXPERIMENTAL AL ALUNECĂRII CU INTERMITENȚĂ CAUZATĂ DE FRECARE

4.1. Echipamente utilizate

Pentru testările privind fenomenul de "stick - slip", s-au utilizat două tipuri de încercări aplicate pe Tribometrul CETR UMT-2 din Laboratorul de Tribologie a Departamentului IMMR din cadrul Facultății de Mecanică din Iași:

- (A) Echipamente pentru determinarea fenomenului de stick-slip prin metoda oscilatorului liniar cu un singur grad de libertate;
- (B) Echipamente pentru determinarea fenomenului de stick-slip prin metoda similară standardului VDA 230-206, utilizată și de Gavrilă [G.Gavrila, 2015].

O schemă generală a Tribometrului CETR UMT-2 este prezentată în Fig. 4.1.



Fig. 4.1 Tribometrul CETR UMT-2

Tribometrul include un suport vertical prin care se face încărcarea axială (forța Fz), poz.1, un senzor pentru determinarea forței tangențiale Fx, poz.2, o masă cu deplasare liniară, cu viteze cuprinse în intervalul (0,01 - 10)mm/s, poz.3, calculator cu soft specializat, poz.4, ecran pentru vizualizarea rezultatelor, poz.5.

Suportul vertical poate executa deplasări pe direcția axei Z (direcția verticală de încărcare) și pe direcția axei transversale, axa X, în timp ce masa liniară execută mișcări într-un sens și în sens opus pe direcția axei Y.

Tribometrul este echipat cu trei senzori de forțe cu gama de măsurări de la 10μ N până la 20N, funcție de mărimea forțelor care se studiază. Senzorii de forțe se atașează la capătul frontal al suportului vertical. Pe suprafața inferioară a senzorului se fixează prin șuruburi un suport, poz.6, prevăzut cu lamele elastice pentru amortizarea forței de apăsare, iar în suport se fixează un pin, poz.7. Forțele Fz, Fx, deplasările Z și Y, timpul, vitezele de deplasare a mesei V_T si a suportului

transversal V_x , precum si coeficientul de frecare COF, sunt înregistrate si redate sub forma unor diagrame, cu posibilități de schimbare a diverșilor parametri.

A. Metoda oscilatorului cu un singur grad de libertate

Pentru testarea fenomenului de stick-slip prin metoda **oscilatorului liniar unidirecțional**, se prezintă un detaliu în Fig.4.2. Astfel, pe masa liniară se fixează o placă din oțel, poz.6, iar pe placă se așează un cilindru cu o masă cunoscută, **m**, poz.5. Cilindrul este legat de pin printr-un arc de tracțiune având rigiditatea **k**, poz.4. Forța de adeziune, sau de frecare la alunecarea cilindrului pe placa metalică se transmite prin arc la pin, poz. 3 și, mai departe, printr-un suport, poz.2, la senzorul de forțe, poz.1; astfel încât forța tangențială de contact dintre cilindru și placă, **Fx**, este monitorizată în timpul funcționării de către senzor și trimisă la softul Microtribometrului.



Senzor de forță; 2) Suport rigid; 3) Pin; 4) Arc de tracțiune;
 Cilindru de masă, m; 6) Placă din oțel.

Fig. 4.2 Testare la alunecare sacadată cu cilindru așezat pe o placă din oțel și legat de pin prin intermediul unui arc de tracțiune.

Testările au fost efectuate în următoarele condiții:

- 1. S-au utilizat trei plăci din oțel cu rugozități diferite, variind între $Ra = 0.08 \ \mu m$ și $Ra = 3.2 \ \mu m$. Lungimea de deplasare a cilindrului pe plăcile din oțel a fost de (25-50)mm. Profilul de rugozitate, curba de portanță și densitatea de distribuție a rugozităților pe direcția de alunecare sunt prezentate în Cap.5. Pentru comparație s-a utilizat și o placă de sticlă cu grosimea de 4mm și rugozitate $Ra = 0.03 \ \mu m$.
- 2. Cilindrul este din oțel cu suprafața frontală rectificată la rugozitatea $Ra = 0.6 \ \mu m$. Masa cilindrului a fost de 242 grame iar diametrul suprafeței aflate în contact cu placa metalică a fost de 38.5 mm. În aceste condiții, presiunea de contact între cele două suprafețe aflate în mișcare relativă a fost de 0,002MPa.
- 3. S-au utilizat și trei discuri cu diametrul cilindrului, unul din aluminiu si două din bronz. Profilul de rugozitate, curba de portanță și densitatea de distribuție a rugozităților pentru cele trei discuri sunt prezentate în capitolul 5. Prin atașarea la cilindrul inițial a discurilor, masa sistemului oscilator (cilindru plus disc) are valori diferite, funcție de tipul discului atașat.
- 4. Pentru a se urmări influența presiunii de contact asupra fenomenului de stick- slip, s-au făcut determinări experimentale cu cilindru fixat pe masă prin trei bile din oțel, cu diametrele de 6,36mm. Pentru montarea bilelor s-au practicat pe suprafața frontală a cilindrului trei găuri la aceeaşi rază și distanțate simetric la 120°, în conformitate cu figura 4.3. În acest caz, presiunea de contact maximă dintre fiecare bilă și placa de oțel a fost de 600 MPa;



Fig. 4.3 Contactul pe suprafața plană cu presiunea nominală de contact de 0,002 MPa(a), contactul pe 3 bile cu presiunea nominală de contact de 386 MPa(b), vedere frontală a cilindrului cu 3 bile(c)

- 5. Arcul de tracțiune are o rigiditate inițială de 40 N/m iar prin blocarea unui anumit număr de spire, s-au obținut rigidități diferite de până la 442 N/m;
- 6. S-a utilizat senzorul pentru forțe normale și tangențiale, cod DFM-2-0488, cu forța maximă permisă de 20N și precizie de $10\mu N$;
- 7. Testările au fost efectuate în majoritatea cazurilor în condiții uscate, suprafețele în contact fiind degresate cu un dizolvant, la începutul fiecărei testări;
- 8. Fiecare testare a fost codificată și prelucrată ulterior, sub formă de diagrame F_x în funcție de timp și distanța Y, iar pentru simularea fenomenului s-a făcut o prelucrare suplimentară a informațiilor transmise de senzor la softul specific. Astfel, toate datele din timpul unei testări (F_x , viteza, timp, distanța parcursă Y) au fost transferate într-un program Excel din care s-a obținut variația deplasării y(t) a cilindrului în raport cu timpul. Pe baza acestor diagrame s-au folosit diverse modele pentru variația coeficientului de frecare cinetic în raport cu viteza de alunecare (modele prezentate în Cap. 2) găsindu-se variantele care aproximează cel mai bine fenomenul de alunecare cu intermitență (stick-slip), pentru fiecare test executat.

B. Metoda similară standardului VDA 230 - 206

Testările făcute prin metoda similară standardului VDA 230-206 s-au realizat cu ajutorul unui dispozitiv special conceput, similar celui utilizat de Gavrilă [Gavrilă, 2014]. Schematic dispozitivul este prezentat în Fig. 4.4, iar în Fig. 4.6 se prezintă o imagine cu dispozitivul montat pe stand.



Fig. 4.4 Schema de principiu a dispozitivului similar standardului VDA 230-206

Conform schemei din Fig. 4.4, cupla de frecare este constituită dintr-o bilă de oțel și placa metalică atașată mesei standului. Elementul elastic este realizat de către o lamelă confecționată din oțel de arc și are o lățime de 10mm și o grosime de 0.8 mm. La 10mm de dispozitivul de fixare al bilei de test a fost montat un accelerometru, capătul superior al dispozitivului fiind montat în senzorul de forțe, la capătul inferior având montată o bila din oțel cu diametrul de 6,35 mm. Pentru a aduce informații suplimentare privind mișcarea de stick-slip, s-a folosit un dispozitiv conceput in mod special pentru culegerea datelor.

Sistemul de măsurare a accelerației are o structură pe două niveluri, așa cum se prezintă în Fig. 4.5. Placa de dezvoltare Arduino NANO 33 BLE este la nivelul superior împreună cu cablul de alimentare și transfer de date de tip "Mini USB", iar accelerometrul MMA8451Q este poziționat la cel de-al doilea nivel. Sistemul are un design modular care facilitează modernizarea și programarea acestuia.



Fig.4.5 Structura echipamentului pentru măsurătorile experimentale

Motivele pentru alegerea accelerometrului MMA8451Q de tip capacitiv, pe trei axe, au fost: arhitectura sa pe 14 biți, prezența interfețelor necesare, disponibilitatea soluției structurale foarte compacte (3mm x 3mm x 1mm), posibilitatea de a procesa semnale digitale și analogice și consumul redus de energie.

Achiziția datelor de la accelerometru s-a făcut cu ajutorul unei plăci de dezvoltare Arduino Nano 33 BLE conectată la calculator printr-un cablu de alimentare și de transfer de date tip Mini USB. Arduino Nano 33 BLE este o placă de dezvoltare electronică mică, bazată pe platforma Arduino. Este o evoluție a plăcii Arduino Nano tradiționale, dar are un procesor mult mai puternic, nRF52840 de la Nordic Semiconductors, un CPU ARM® Cortex®-M4 pe 32 de biți care rulează la 64 MHz. Placa are, de asemenea, o unitate de măsurare inerțială de 9 axe (IMU), ceea ce înseamnă că include un accelerometru, un giroscop și un magnetometru cu rezoluție de 3 axe fiecare. Acest lucru face ca Arduino Nano 33 BLE să fie potrivit pentru proiectele portabile, cum ar fi brățările inteligente sau senzorii de mișcare.Procesorul este capabil să ruleze cod scris intr-un limbaj de programare ce este foarte similar cu limbajul de programare C++.

Codul elaborat și scris pentru această aplicație inițiază accelerometrul și afișează valorile accelerației în unitați $g(m/s^2)$, calculate în direcțiile X, Y și Z.

Bila este apăsată cu o forță Fz, iar forța tangențială (de adeziune și de alunecare dintre bilă și placă) Fx a fost monitorizată prin senzor de către softul Tribometrului. Modul de fixare a sistemului lamelă elastică- accelerometru – placă Arduino Nano 33 BLE este prezentat în Fig. 4.6 a, b.



1) Suport elastic; 2) Lamelă din oțel de arc 0,8 mm; 3) Accelerometru MMA8451Q; 4) Pin cu bilă de test

a) b) Fig. 4.6 Imaginea Tribometrului cu dispozitivul similar standardului VDA 230-206

4.2. Prezentarea metodelor de testare "Stick-Slip"

4.2.1. Metoda oscilatorului unidirecțional

Studiul experimental al fenomenului de "stick - slip" s-a făcut utilizând schema prezentată în Fig. 4.2. Astfel, pe masa Microtribometrului s-a fixat o placă din oțel prelucrată cu o anumită rugozitate. Un cilindru din oțel cu o masă cunoscută, **m**, și cu suprafața frontală rectificată având o rugozitate de $Ra = 0, 1 \mu m$, este așezat pe placa de oțel și este fixat de pinul Microtribometrului printr-un arc elastic de tracțiune. Pinul este fixat într-un suport care, la rândul lui, este fixat pe senzorul de forțe. Se realizează astfel un oscilator unidirecțional, prezentat schematic în Fig. 4.7.



Fig. 4.7. Schema de principiu a oscilatorului unidirecțional [Oprișan et al., 2020]

Pentru a se obține fenomenul de "stick - slip", se programează o viteză mică de deplasare a mesei microtribometrului (se pleacă de la viteza de 0,02mm/s). Deplasarea mesei se face în sensul indicat de săgeată astfel încât, într-o primă fază,cilindrul rămâne lipit de placa de oțel, în timp ce arcul se întinde. Arcul are o anumită rigiditate k, astfel că, atunci când se ajunge la echilibrul dintre forța de aderență la nivelul suprafeței de contact a cilindrului cu placa, Fx, și forța elastică obținută prin tensionarea arcului, $Fx = k \cdot Y$ unde Y este distanța parcursă de masă se produce alunecarea bruscă a cilindrului în sensul opus deplasării mesei. Urmează o nouă fază de adeziune, cu întinderea arcului și repetarea alunecării. Fenomenul se repetă atât timp cât masa Tribometrului se deplasează.

Întrucât arcul este legat direct la senzorul de forțe, acesta va indica variația forței transmisă de arc și implicit, variația forței de frecare generată la interacțiunea dintre cilindru și placă. O diagramă tipică a fenomenului de "stick - slip" se prezintă în Fig.4.8 [Oprișan et al., 2020].



Fig. 4.8. Variația forței Fx în procesul de alunecare sacadată –"stick - slip" [Oprișan, 2020]

Din Fig. 4.8 se pot observa cele două fenomene distincte: **aderența dintre cilindru și placă** (porțiunea OA1, B1A2, B2A3...) și **alunecările dintre cilindru și placă** (A1B1, A2B2...). Punctele A1, A2, A3... corespund valorilor maxime ale coeficienților de frecare statică, ce se obțin făcând raportul dintre forțele Fx corespunzătoare acestor vârfuri (F_{A1} , F_{A2} ,...) și greutatea cilindrului, G. Întrucât din punctele A1, A2, A3... începe alunecarea bruscă a cilindrului în sens invers deplasării mesei, valorile maxime ale coeficienților de frecare statică devin valori maxime pentru coeficienții de frecare cinetică. Forțele Fx corespunzătoare punctelor B1, B2,..., raportate la greutate, vor indica valorile minime ale coeficienților de frecare cinetică, corespunzătoare alunecării dintre cilindru și placa metalică. Întrucât, în punctele B1, B2,....începe din nou fenomene de adeziune, considerăm că în aceste puncte, avem valori minime ale coeficienților de frecare vor avea variații în limitele obținute prin experiment.

4.2.2. Utilizarea accelerometrului pentru studiul fenomenului de stick-slip în varianta oscilatorului unidirecțional

În conformitate cu schema prezentată în Fig. 4.9, pe suprafața cilindrului s-a montat accelerometrul MMA8451Q cu achiziția de date similar celei prezentate în Fig. 4.5.



1) Suport rigid și pin; 2) Arc de tracțiune; 3) Placă din oțel; 4) Cilindru de masă, m; 5) Accelerometru

Fig. 4.17 Determinarea accelerației cilindrului cu ajutorul accelerometrului

Prezența senzorului de accelerație permite determinarea experimentală a accelerațiilor în momentele de "slip" urmând a fi corelate cu simulările prezentate în Cap. 6.

CAPITOLUL 5. REZULTATE EXPERIMENTALE

5.1. Rezultate obținute prin metoda oscilatorului unidirecțional

În Cap. 4, paragraful 4.2.1 este prezentată metodologia de investigare, a alunecării, cu frecare uscată, prin metoda clasică, a oscilatorului unidirecțional. Un prim scop a fost acela de a surprinde experimental comportamentul la alunecarea cu intermitență în cazul unor presiuni de contact reduse, dar și ridicate, precum și influența unor parametrii asupra fenomenului de stick-slip.

Pe baza datelor obținute, s-a elaborat o serie de metodologii pentru modelarea variației coeficientului de frecare cinetic cu viteza de alunecare, a coeficientului de frecare static, în funcție de timpul de staționare (aderență), precum și un program complex, de simulare a fenomenului de stick-slip. Detaliile de modelare si simulare fac obiectul Cap. 6 și au la bază rezultatele experimentale, prezentate în acest capitol.

Testările au fost făcute în mai multe situații:

- alunecarea cilindrului pe o suprafață plană, din sticlă, cu rugozitate foarte mică (Ra=0.03µm);
- alunecarea cilindrului pe trei suprafețe din oțel, cu rugozităti diferite;
- alunecarea cilindrului cu trei bile montate pe suprafața frontală, cu presiune de contact ridicată;

5.1.1. Rezultate obținute prin alunecare pe suprafețe plane, cu presiune de contact de 0.002 MPa

Practic, cilindrul împreună cu suportul de prindere a elementului elastic, cu masa de 250 grame, a fost așezat cu suprafața frontala, plană, pe plăci din oțel, cu diverse rugozități. Plăcile au fost fixate pe masa liniară a tribometrului, aceasta deplasându-se cu viteze cuprinse între 0,02 mm/s și 8 mm/s. Deplasarea s-a efectuat pe distanțe cuprinse în intervalul 20 - 50 mm. Prin intermediul arcului elicoidal de tracțiune, forța tangențială, dezvoltată la contactul dintre placă și cilindru, s-a transmis la senzorul de forțe al tribometrului, obținându-se astfel, variația forței tangențiale dezvoltate la contactul dintre cilindru și placă pe toată distanța parcursă de masă.

Cu ajutorul softului specific tribometrului, s-au obtinut pentru fiecare testare, diagrame privind variația forței tangențiale de contact în funcție de deplasarea mesei și în funcție de timp. Totodata, s-au verificat și uniformitatea mișcării mesei prin diagrame ale vitezei mesei în funcție de timp.

Precizăm că prin această metodologie, valorile maxime și minime ale coeficientul de frecare static rezultă din raportul forței tangențiale Fx, indicată de Tribometru, și greutatea cilindrului plus sistemul de prindere G, cu relația clasică: $\mu = G/Fx$. Coeficientul de frecare cinetica s-a manifestat numai în fazele de slip (alunecare) și variația acestui coeficient s-a stabilit prin rezolvarea ecuației de mișcare a cilindrului, în intervalul de câteva zecimi de secundă cât durează saltul. Determinarea coeficientului de frecare static s-a prezentat în Cap.6.

Rugozitățile suprafețelor în contact (suprafața frontală a cilindrului) și suprafețele de alunecare a plăcilor, au fost măsurate cu ajutorul Profilometrul Form Talysurf Intra cod M112/3344-02. Profilograma 2D pentru fiecare suprafață, precum și curba Abott și curba

distribuției densității probabilității rugozităților pe direcția de alunecare, sunt prezentate pentru fiecare caz în parte.

Pentru a reduce la maximum influența rugozităților asupra fenomenului de stick-slip, s-au făcut primele seturi de testări pe suprafețe plane de sticlă.

5.1.2. Testări de alunecare cu intermitență oțel-oțel în condiții uscate

Pentru a stabili limitele dezvoltării fenomenului de stick-slip și modul de influență a rugozităților suprafețelor, s-au realizat, cu oscilatorul unidirecțional prezentat în Cap. 4, o serie de testări de alunecare, folosind ca suprafață de alunecare trei plăci din oțel, prelucrate cu rugozități diferite.

Rugozitățile celor trei plăci precum și distribuția rugozităților,pe direcția de alunecare, împreună cu curbă Abott, au fost obținute cu ajutorul Profilometrului **Form Talysurf Intra**.

În Fig. 5.1 -5.3, sunt prezentate profilogramele cu parametrii de rugozitate, curba Abott și curba distribuției densității probabilității rugozităților.



```
Taylor Hobson
```







Fig. 5.1 Profilograma, distribuția densității rugozităților și curba Abott pentru placa nr.1







	Upper Cursor			Band			Lower Cursor	
Level	0.43	μm	Band/Htp	0.86	j µm	Level	-0.43	μm
mr1%	10.4	%	Delta mr%	74.5	%	mr2%	84.9	%
HSC	5	peaks	Peak Count	4	pks/cm	HSC	4	peaks

Fig. 5.2 Profilograma, distribuția densității rugozităților și curba Abott pentru placa nr.2



```
placa_Ra3.3_otel directia 1 - R/7x2.5mm/G/30/LS Line 10/02/2023 11:57:45
Surface 15 - 20.1mm/Admin/Intra /U 10/02/2023 11:56:55
Material Ratio -
Amplitude Curve -
```



Fig. 5.3 Profilograma, distribuția densității rugozităților și curba Abott pentru placa nr.3

S-au utilizat două tipuri de testări:

55420

above mean (µm)

6

Material Ratio

- a) Testări de alunecare cu suprafața plană a cilindrului pe cele trei plăci și presiune nominală de contact de 0,002MPa;
- b) Testări cu trei bile din oțel în alunecare pe suprafețele celor trei plăci. În cazul testărilor cu trei bile, presiunea maxima de contact dintre fiecare bilă și placa de oțel a fost de *386MPa*. Toate aceste teste au fost realizate în condiții uscate.

5.1.2.1. Rezultate ale testărilor de alunecare cu intermitență oțel-oțel pe suprafețe plane

Prezența rugozităților pe ambele suprafețe de contact, a condus la obținerea unor înregistrări cu variații diferite ale oscilațiilor, pentru diverse viteze, rigidități ale arcului și rugozități diferite pe suprafețele plăcilor.

În Anexa 5.3, sunt prezentate numeroase diagrame privind variația forțelor tangențiale Fx în funcție de distanța parcursă, dar și în funcție de timp.

Prezentarea mai multor variații ale frecării pe aceeași diagramă s-a făcut doar prin menținerea distanței constante, timpul fiecărei înregistrări fiind dependent de viteza de deplasare a mesei Tribometrului.

În Fig. 5.4 este prezentată o diagramă obținută cu placa nr. 1, cu rugozitatea $Ra=0,08 \ \mu m$, la o viteză a mesei Tribometrului de 0,05mm/s, pe o distanță de 50 mm, și cu o rigiditate a arcului k=77N/m.



Fig. 5.4 Variația forței Fx în condițiile alunecării cilindrului pe placa de oțel nr. 1, cu viteza de 0,05mm/s și cu o rigiditate a arcului de 77N/m

Utilizând placa nr. 2 cu o rugozitare $Ra = 0, 3\mu m$ și menținând rigiditatea arcului la valoarea k = 77N/m, s-au observat creșteri semnificative ale valorilor oscilațiilor. În Fig. 5.5 se prezintă două diagrame de variație a forței Fx pentru două viteze a mesei: 0,02 și 0,05 mm/s.



Fig. 5.5 Variații ale forței Fx în condițiile alunecării cilindrului pe placa de oțel nr. 2, cu viteze diferite de alunecare și cu o rigiditate a arcului de 77N/m

Din Fig. 5.5 se pot observa zone cu aderența mult mai mare si, în consecința, cu salturi mari ale forței Fx, fenomen mai accentuat la viteza de 0,02mm/s.

Chiar și la viteze mai mari, de 0,5-0,6mm/s s-au observat fluctuații mari ale forțelor tangențiale, așa cum se poate vedea în Fig.5.6.



Fig. 5.6 Variații ale forței Fx în condițiile alunecării cilindrului pe placa de oțel nr. 2, cu viteze de alunecare de 0.2; 0,5 și 0,6mm/s cu o rigiditate a arcului de 77N/m

Făcând testări și pe placa nr. 3 cu rugozitatea $Ra=2,7\mu m$, fluctuațiile forței Fx sunt mult mai mari, așa cum se poate vedea în Fig. 5.7.



Fig. 5.7 Variația forței Fx în condițiile alunecării cilindrului pe placa de oțel nr. 3, cu viteze de 0,2mm/s (diagrama albastră), cu 0,6mm/s (diagrama roșie) și cu 0,8 mm/s (diagrama maro), cu o rigiditate a arcului de 77N/m

Diagramele din Fig. 5.7 ne sugerează faptul că în cazul rugozităților mari, fenomenul de stick-slip poate chiar să fie mai pronunțat la viteze mai mari decât la viteze mai mici. Astfel, în cazul de fața, când presiunea de contact este redusă, aderențele la nivelul suprafețelor pot fi atât de puternice încât alunecările pot duce până la detensionarea completă a arcului când Fx = 0. Punem aceste fenomene pe seama componentei mecanice a coeficientului de frecare, componentă ce domină alunecarea cu intermitență.

O sinteză a distribuției coeficienților de frecare statică pentru două din cele trei plăci din oțel cu rugozități diferite și cu presiune de contact nominală de *0,002MPa*, este prezentată în Fig.5.8.





5.1.2.2. Rezultate ale testărilor de alunecare cu presiune ridicată (trei bile) pe suprafețe plane din oțel

În Fig. 5.5 este prezentată schema de testare pentru cazul în care pe suprafața frontală a cilindrului s-au fixat trei bile cu diametrul de 6,36 mm. Din condiții de simetrie, s-a considerat o distribuție uniformă a greutății cilindrului pe cele trei bile, rezultând o presiune maxima de contact pe fiecare bilă de $\sigma_o = 386.5MPa$ pe o suprafață de contact de $\pi a^2 = 0,0021mm^2$ pentru fiecare bilă.

În Fig.5.9 -5.11 sunt prezentate înregistrări ale variației forței Fx pentru alunecările cilindrului rezemat pe trei bile pe cele trei plăci metalice utilizate pentru testare, în condiții uscate.



Fig. 5.9 Variația forței tangențiale Fx pentru presiunea maximă de contact hertziană de 596.5 *MPa*, rugozitatea plăcii nr. 1 $Ra=0.08\mu m$ și k=77N/m



Fig. 5.10 Variația forței tangențiale Fx pentru presiunea maximă de contact hertziană de 596.5 MPa, rugozitatea plăcii nr. 2 $Ra=0,34\mu m$ și k=77N/m



Fig. 5.11 Variația forței tangențiale Fx pentru presiunea maximă de contact hertziană de 596.5 MPa, rugozitatea plăcii nr. 3 $Ra=2,69 \mu m$ și k=77N/m

(Albastru - 0,02mm/s, Rosu-0,05mm/s, Verde - 0,2mm/s, Negru-0,4mm/s, Roz-0,6mm/s)

Ca o caracteristică esențială, presiunea de contact ridicată la nivelul celor trei bile conduce la creșteri importante ale distanțelor pe care se produce aderența și, prin urmare, se obțin forțe tangențiale mult mai mari care, raportate la greutatea cilindrului conduc la valori ale coeficienților de frecare statică cuprinse în intervalul $\mu_s = (0, 2 - 0, 36)$.

O sinteză a distribuției coeficienților de frecare statică pentru placa 2 din oțel, cu presiune de contact nominală de *396,5 MPa* este prezentată în Fig. 5.12.



Fig.5.12 Distribuția coeficienților de frecare statică cu presiune de contact maximă de *396,5 MPa*

CAPITOLUL 6. MODELAREA ȘI SIMULAREA MIȘCĂRII DE STICK-SLIP

Prezentul capitol abordează, în prima parte, modelarea alunecării cilindrului în faza de slip cu determinarea vitezei, a accelerației și a variației coeficientului de frecare în funcție de viteza de alunecare. În prezentul capitol se prezintă metodologia și un exemplu pentru primul salt dintr-un tribosistem de alunecare oțel pe oțel. În continuare, pentru același tribosistem se modelează variațiile coeficientului de frecare static în funcție de timp, pentru fiecare fază de adeziune.

În a doua parte se prezintă relațiile și metodologia de simulare cu ajutorul softului MATLAB a unei diagrame cu procese clare de stick-slip și validarea simulării prin comparație cu un test real.

6.1. Modelarea vitezelor și a accelerațiilor în procesele de alunecare

Pornind de la diagramele ce evidențiază fenomenul de stick-slip, s-a elaborat o metodologie care permite determinarea distribuției vitezei, a accelerației și a coeficientului de frecare cinetic la fiecare zonă de alunecare din cadrul unei diagrame. În plus, utilizând dispozitivul de determinare a accelerației s-a putut valida prin experiment variația de accelerație în fiecare salt.

6.1.1. Variația vitezei și a accelerației în procesul de stick-slip

Metodologia propusă urmărește mai multe etape:

- 1. Stabilirea variației vitezei și a accelerației cilindrului în funcție de timp, în procesul de alunecare rapidă (perioada de slip);
- 2. Determinarea variației coeficientului de frecare în faza de slip, pe durata de timp a alunecării;
- 3. Stabilirea legăturii dintre coeficientul de frecare cinetic și viteza de alunecare, în perioadele scurte de slip.

Etapa 1.

În cele ce urmează se prezintă succesiunea operațiilor folosite pentru obținerea variației vitezei și a accelerației în funcție de timp pentru cazul practic 2.2 (detalii privind caracteristicile de rugozitate, materialele, viteza mesei și constanta arcului sunt prezentate în capitolul 4).

Etapa 1.1. Realizarea testării și înregistrarea variației forței tangențiale Fx în funcție de timp.

In Fig. 6.1 se prezintă graficul variației forței Fx în funcție de timp, așa cum este obținut din softul TribometruluiCETR-UMT 2.



Fig. 6.1 Variația forței tangențiale Fx în funcție de timp pentru testul 2.2

Etapa 1.2. Achiziția de date

Toate datele obținute de senzorul de forțe și de masa liniară transmise softului Tribometrului, sunt transferate într-un program Excel, separat de Tribometru. În Tabelul 6.1 se prezintă partea de început a acestui tabel în Excel.

20	A	n	D	F	1	- 4	R.	1.
14 1	Data Cout-8/	07/2023						
15								
16	Fx	¥.	V3	T		T.	y(t)+Fx/k	
17	N	m	mm/sec	sec		50C	m	
18								
19	0.001	0	0	0		0	1.35135E-05	
20	0.001	0	0	0.0103		0.0103	1,35135E-05	
21	0.001	0	0	0.02		0.02	1.35135E-05	
22	0.001	0	0	0.0303		0.0303	1.151356-05	
28	0	0	0	0.041		0.041	0	
24	0.001	0	0	0.0513		0.0513	1.35135E-05	
25	0.001	0	0	0.061		0.061	1.35135E-05	
26	0.001	0	0	0.0713		0.0713	1.35135E-05	
27	0.001	0	0	0.0815		0.0815	1.35135E-05	
28	0	0	0.001	0.0923		0.0923	0	
29	0.001	0	0,002	0.1021		0,1021	1.35135E-05	
30	0.001	0	0.002	0.1123		0.1123	1,35135E-05	
33.	0.001	0	0.002	0.1221		0.1221	1.35135E-05	
32	0.001	0	0.002	0.1323		0.1323	1.35135E-05	
33	0.001	0.002	0.011	0.1431		0.1433	1.35135E-05	
34	0.001	0.002	0.014	0.1533		0.1533	1.35135E-05	
35	0.001	0.002	0.014	0.1631		0.1631	1.35135E-05	
36	0.002	0.002	0.014	0.1733		0.1733	2,7027E-05	
37	0.002	0.002	0.015	0,1831		0.1831	2.7027E-05	
38	0.002	0.007	0.046	0.1934		9.1934	2.7027E-05	
39	0.002	0.009	0.054	0,2041		0.2041	2.7027E-05	
40	0.003	0.009	0.058	0.2144		0.2144	4.054056-05	
41	0.002	0.009	0.054	0.2241		0.2241	2.7027E-05	
42	0.003	0.009	0.061	0.2344		0.2344	4.05405E-05	
43	0.003	0.016	0.092	0.2441		0.2443	4.05405E-05	

Tabelul 6.1. Date culese din programul Tribometrului

În Tabelul 6.1 sunt prezentate următoarele date: forța tangențială Fx (N), distanța parcursă de masa liniară Y(m), viteza de deplasare a mesei V3(mm/s) și secvențele de timp în care se fac înregistrările T (secunde). Variația distanței parcurse de cilindru pe suprafața mesei este notată cu y(t) și este calculată ca un raport dintre forța Fx și constanta elastică a arcului k.

Valorile trecute cu culoarea roșie ajută la întocmirea graficului de variație a distanței pe care o parcurge greutatea pe masa aflată în mișcare. Pentru cazul 2.2, variația distanțelor parcurse de greutate pe durata de 75 secunde este prezentată în Fig. 6.2.



Fig.6.2 Variația deplasării greutății pe masa standului pe durata testării

Etapa 1.3. Determinarea vitezelor și a accelerațiilor în zonele de salturi

În etapa următoare, pentru fiecare din cele 5 salturi s-au determinat variațiile vitezelor și a accelerațiilor. Întrucât timpul de realizare a alunecării (perioada de slip) durează câteva zecimi de secundă, s-a considerat punct de zero, timpul la care greutatea începe să execute mișcarea de alunecare rapidă, scăzând de la distanța maximă la cea minimă. În Fig. 6.3 este reprezentată deplasarea greutății pentru primul salt.



Fig. 6.3 Variația deplasării greutății la primul salt, în funcție de timp, y(t)

S-a aplicat derivarea numerică pe intervalul de timp în care are loc saltul, utilizând relația $v_1(t) = \frac{\Delta y(t)}{\Delta t}$, unde $\Delta y(t)$ reprezintă distanța dintre două măsurători succesive, iar Δt este timpul dintre două măsurători succesive. În Fig. 6.4, punctele marcate cu albastru reprezintă valorile vitezei cilindrului la fiecare interval de timp, iar curba de culoare roșie, continuă, reprezintă funcția polinomială de interpolare.



Fig.6.4 Variația vitezei cilindrului la primul salt, în funcție de timp

Interpolarea s-a realizat cu o funcție polinomială de gradul 5, cu o abatere $R^2 = 0.985$,

Prin derivarea relației vitezei s-a obținut distribuția accelerației cilindrului, reprezentată în Fig.6.5.



Fig. 6.5 Variația accelerației greutății la primul salt, în funcție de timp

Curba de variație a accelerațiilor din Fig. 6.5 trece prin valoarea zero la timpul de 0,13 secunde de momentul începerii alunecării, corespunzător punctului de maxim al vitezei v(t).

Urmând aceeași metodologie s-au determinat vitezele și accelerațiile pentru următoarele patru salturi, în acord cu diagrama din Fig. 6.2, care sunt prezentate în ANEXA 6.2.

Etapa 1.4. Corelarea accelerațiilor obținute pe cale analitică cu valorile măsurate

În conformitate cu metodologia de măsurare a accelerațiilor obținute în procesele de alunecare rapidă a cilindrului, se prezintă în Fig.6.6 variațiile de accelerații, determinate pe toată perioada testului 2.2.



Fig. 6.6 Variația accelerației greutății determinate experimental, în funcție de timp, pe durata testului 2.2

În Fig. 6.6 se observă cinci variații ale accelerației, cu limite cuprinse în intervalul (0,2-0,6) m/s², cu valori negative și pozitive. Se face precizarea că valorile accelerațiilor date în diagrama din Fig.6.6 sunt exprimate în raport cu accelerația gravitațională, prin urmare, valorile absolute se obțin prin înmulțire cu g (9,81 m/s²). Pe diagrama din Fig. 6.6 se observă și un zgomot de fond cauzat de vibrațiile produse de ventilatorul tribometrului.

Pentru primul salt, care se produce după 38,33 secunde de la începerea testului, variațiile de accelerație măsurate pe durata saltului sunt prezentate în Fig. 6.7, sub forma unor puncte discrete de culoare albastră. Interpolarea printr-un polinom de ordinul 4 este prezentată prin curba continuă de culoare albastră iar prin liniile de culoare roșie sunt prezentate valorile medii ale accelerațiilor, calculate între două puncte succesive. Valorile accelerațiilor sunt date direct in m/s².



Fig. 6.7 Variația accelerațiilor măsurate la primul salt, curba de interpolare și valorile medii ale accelerațiilor

Câteva concluzii importante pot fi formulate:

- a) Salturile se manifestă pe durate foarte scurte, de 0,15-0,3 secunde, cu o creştere a vitezei cilindrului până la o valoare maximă urmată de o frânare, generată de frecarea dintre cilindru și placa de oțel;
- b) Fluctuațiile accelerațiilor la nivelul greutății care execută alunecarea rapidă prezintă variații similare în modelarea cu funcții polinomiale cu cele obținute experimental. Valorile medii, atât cele pozitive cât și cele negative sunt foarte apropiate.

Etapa 2. Stabilirea unei corelații dintre coeficientul de frecare cinetic care apare în procesul de alunecare rapidă și viteza de alunecare

În acest sens s-au parcurs următoarele faze:

- a) Ținând cont de expresia analitică a funcției de interpolare a accelerațiilor determinate experimental, s-au calculat, în programul Excel,valorile accelerațiilor pentru fiecare interval de timp caracteristic procesului de alunecare. Pentru primul salt la testul 2.2, valorile medii ale accelerațiilor, în funcție de intervalele de timp eşantionate de Tribometru, sunt prezentate în Fig.6.8.
- b) Cunoscând valorile medii ale accelerațiilor pe intervalele de timp eșantionate, se utilizează ecuația dinamică a mișcării cilindrului în timpul primul salt:

$$m \cdot \ddot{y} + Fx - \mu_k(\dot{y}) \cdot m \cdot g = 0 \tag{6.2}$$

Cunoscând accelerația, \ddot{y} și forța tangențială Fx pentru fiecare interval de timp, din relația (6.2) rezultă relația de calcul a coeficientului de frecare cinetic, pentru fiecare interval de timp, în faza de alunecare:

$$\mu_k(\dot{y}) = \frac{\ddot{y}}{g} + \frac{Fx}{m \cdot g} \tag{6.3}$$



Fig. 6.8 Variația valorilor medii ale accelerațiilor corespunzătoare primului salt din testul 2.2

În Fig. 6.9 sunt prezentate valorile coeficientului de frecare cinetic, în faza de alunecare, corespunzătoare primului salt. Pentru verificarea corectitudinii, la momentele de început și de sfârșit a alunecării, accelerația fiind teoretic zero, valorile coeficienților cinetici trebuie să corespundă cu valorile coeficienților de frecare statici. Astfel, în momentul de începere a alunecării, $\mu_k = \mu_s = 0,23$ iar la oprirea alunecării $\mu_k = \mu_s = 0,16$. Un alt moment în care accelerația devine zero, la intervalul de timp de 0,13 secunde, $\mu_k = 0,19$, rezultând direct din forța Fx. Deși saltul durează în jur de 0,23 secunde, se constată o variație neliniară a coeficientului de frecare cinetic, evident datorat fluctuațiilor de accelerație.





Viteza de alunecare dintre placa ce se deplasează în direcție pozitivă cu viteză constantă de 0,2mm/s și cilindru, pe durata primului salt se determină cu relația:

$$va(t) = v_T - \dot{y}(t) \tag{6.4}$$

unde V_T este viteza de deplasare a mesei.

Distribuția vitezei de alunecare la nivelul contactului dintre cilindru și placă rezultă din relația (6.4) și este prezentată în Fig. 6.10.



Fig. 6.10 Variația valorilor vitezei de alunecare pe durata primului salt din testul 2.2

Dacă se corelează diagrama de variație a vitezei de alunecare în funcție de timp cu variația coeficientului de frecare în funcție de timp, se obține variația coeficientului de frecare cinetic în funcție de viteza de alunecare, așa cum se prezintă în Fig. 6.11. Se constată că în prima fază, de la timpul t=0 până la timpul când viteza ajunge la valoarea maximă,t=0,13 secunde, coeficientul de frecare cinetic are o scădere de la valoarea de 0,23 până la valoarea de 0,19. Deși viteza de alunecare începe să scadă spre zero, conform fig. 6.10, coeficientul de frecare cinetic continuă să scadă datorită inerției, până la valoarea de aprox. 0,16 când alunecarea se oprește, cilindrul aderă la suprafață plăcii și continuă mișcarea uniformă cu viteza plăcii. În acest moment, coeficientul de frecare cinetic devine coeficient de frecare static. Coeficientul de frecare static crește atâta timp cât se menține aderența până la următorul punct de desprindere (punctul 2 din Fig. 6.2).



Fig. 6.11 Variația valorilor coeficienților de frecare cinetici în funcție de viteza de alunecare la primul salt din testul 2.2

În fig. 6.12 se prezintă două modele logaritmice pentru interpolarea variației coeficientului de frecare cinetic, în faza de creștere a vitezei de alunecare și în faza de scădere a vitezei de alunecare.



Fig. 6.12 Funcțiile de interpolare a valorilor coeficienților de frecare cinetică și corelarea cu valorile calculate

Dacă se consideră doar timpul în care viteza de alunecare crește (de la zero la 0,13 secunde) atunci se observă o scădere a coeficientului de frecare odată cu creșterea vitezei de alunecare. Pentru această variație am propus următoarea funcție logaritmică:

$$\mu_k(v_a) = -0.009 \cdot \ln(v_a) + 0.16 \tag{6.5}$$

Scăderea vitezei de alunecare de la secunda 0,13 la secunda 0,23 conduce la o scădere în continuare a coeficientului de frecare, funcția propusă pentru simulare fiind una tot logaritmică, având expresia:

$$\mu_k(v_a) = -0.007 \cdot \ln(4 \cdot v_a) + 0.21 \tag{6.6}$$

6.2. Stabilirea dependenței de timp a coeficienților de frecare statici în fazele de aderență

În conformitate cu înregistrarea forțelor tangențiale prezentate în Fig. 6.1, după realizarea primului salt, cilindrul aderă la placă și se deplasează cu viteza constantă a mesei de 0,2 mm/s, pe porțiunea B1A2. În această perioadă coeficientul de frecare static crește de la valoarea de 0,153 până la valoarea 0,22, valoare ce corespunde punctului A2 din Fig. 6.1.

Întrucât viteza de deplasare este uniformă, accelerația este zero, cilindrul nu alunecă pe suprafața plăcii, astfel încât variația coeficientului de frecare static pe acest interval rezultă direct din raportul $\frac{Fx}{G}$.

În Fig. 6.13 se prezintă variația coeficientului de frecare static în timpul aderenței dintre greutate și placă, de la valoarea de 0,153 până la valoarea de 0,22 corespunzătoare saltului următor (saltul 2 din Fig. 6.2).



Fig. 6.13 Variația valorilor coeficientului de frecare static pe durata aderenței dintre punctele B1A2

La prima vedere, coeficientul de frecare static are o variație liniară. O variație liniară, în schimb, ar conduce la ideea că prin creșterea timpului ar exista o creștere continuă a coeficientului de frecare static, ceea ce, din Fig. 1.6 nu se confirmă. Ținând cont de diversele modele prezentate în capitolul 2, s-a ales modelul propus de Leine et. al [Leine,1998]:

$$\mu_{s}(t) = \mu_{s,0} \cdot (1 + (\beta - 1) \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot t)))$$
(6.7)

unde:

- $\mu_{s,0}$ este valoarea coeficientului de frecare static în momentul când se oprește alunecarea și începe aderența ($\mu_{s,0} = 0.153$), iar $\mu_{s,inf}$ are valori cuprinde în intervalul (0.24-0.25) pentru intervale de aderență de (100-200 secunde), pe baza testelor efectuate cu un arc având $k = 40 \frac{N}{m}$; - $\beta = \mu_{s,inf} / \mu_{s,0}$ și rezultă, pentru $\mu_{s,inf} = 0.25$ valoarea $\beta = 0.64$; - α este un exponent cu valoarea determinată prin încercăride 0.09, astfel încât să aproximeze cu eroare minimă valorile experimentale;

- t este timpul de aderență până la punctul A2 din graficul de la Fig. 6.2 (t = 11,38 secunde). Astfel ecuația (6.7) devine:

$$\mu_{\rm s}(t) = 0.153 \cdot \left[1 + 0.64 \cdot \left(1 - e^{(-0.09 \cdot t)} \right) \right] \tag{6.8}$$

Pentru fazele de aderență B2A3, B3A4 și B4A5, utilizând aceeași relație a lui Leine et al.cu valori diferite pentru $\mu_{s,0}$ rezultate din experiment, s-au obținut modelări similare prezentate în teză.

6.3. Simularea fenomenului de stick-slip cu modelul Zuleeg

Pe baza modelului complex de variație a coeficientului de frecare cinetic propus de Zuleeg [Zuleeg, 2008] în funcție de viteza de alunecare s-a dezvoltat un program în MATLAB cu ajutorul căruia se poate simula variația deplasărilor și a vitezelor cilindrului în procesul de stick- slip.

Simularea presupune o serie de pași, după cum urmează:

- 1. Obținerea prin testare directă a unei diagrame de variație a forței tangențiale Fx în funcție de timpul de parcurgere a unei distanțe impuse, cu o viteză redusă care să permită realizarea fenomenului de stick-slip;
- 2. Transferarea datelor din softul Tribometrului într-un program Excel pentru a se obține o diagramă de variație a distanței parcurse de cilindru în timpul fazelor de alunecare și aderență, în raport cu timpul cât a durat experimentul;
- 3. Stabilirea valorilor pentru coeficienții a₁, a₂, a₃ și a₄ din modelul coeficientului de frecare cinetică propus de Zuleeg:

$$\mu_k(v_T - \dot{y}) = sign(v_T - \dot{y}) \cdot \left[|v_T - \dot{y}| \cdot a_1 + a_2 + a_3 \cdot e^{-\frac{|v_T - \dot{y}|}{a_4}} \right]$$
(6.9)

4. Rezolvarea ecuației dinamice a mișcării cilindrului pe suprafața în mișcare a plăcii:

$$m \cdot \ddot{y} + k \cdot y = F_R(v_T - \dot{y}) \tag{6.10}$$

Unde *m*, este masa cilindrului în kg, *k* este rigiditatea arcului în N/m, *y* este deplasarea cilindrului prin alunecare și prin adeziune în raport cu placa, v_T este viteza de deplasare constantă a mesei Tribometrului, *ÿ* și *ý*sunt accelerația și viteza de deplasare a cilinrului.

Forța de rezistență F_R este forța tangențială din contactul suprafețelor cilindrului și a plăcii ce poate fi de alunecare sau de adeziune:

$$F_R = \mu_k(\dot{y}) \cdot m \cdot g \tag{6.11}$$

Ecuația diferențială (6.10) a fost rezolvată cu funcția ode23 din librăria programului MATLAB: aceasta rezolvă ecuațiile diferențiale neliniare (metoda de ordin inferior, o implementare a metodei explicite Runge-Kutta).

În figura 6.14 este prezentată variația deplasării cilindrului pe o perioadă de 40 secunde la o viteză a mesei de $v_T = 0.6$ mm/s. Cilindrul este în contact cu placa de oțel cu rugozitatea $R_a = 2.5$ µm la o presiune de contact de 0.002 MPa.

În figura 6.15este prezentată simularea deplasării cilindrului și a vitezei cilindrului utilizând programul dezvoltat pentru viteza mesei de 0.6 mm/s și pentru următoarele valori ale parametrilor $a_1...a_4$: $a_1 = 0.17$ s/m, $a_2 = 0.01$, $a_3 = 0.152$, $a_4 = 0.05$ m/s.

Simularea realizată nu se suprapune identic peste diagrama obținută prin experiment, dar oferă o serie de limite în care se încadrează experimentul: timpul de la care începe să apară salturile de alunecare rapidă, numărul acestor salturi precum și limitele medii în care se încadrează. Este clar ca prezența rugozităților nu este inclusă în acest program. Cu toate acestea se obțin informații

utile privind limitele vitezelor de alunecare a cilindrului la fazele de slip (valori cuprinse între 10 și 12 mm/s).



Fig.6.14 Variația deplasării cilindrului pe o perioadă de 40 secunde la o viteză a mesei de $v_T = 0.6 \text{ mm/s}.$





Înlocuind valorile $a_1 = 0.17$ s/m, $a_2 = 0.01$, $a_3 = 0.152$, $a_4 = 0.05$ m/s variația coeficientului de frecare în funcție de viteza de alunecare arată o scădere a coeficientului de frecare cinetic de la valoarea maximă de 0,163 până la valoarea de 0,13 pentru viteza maximă de alunecare de

0,015m/s. Modelul Zuleeg este unul de tip Stribeck și este prezentat în fig. 6.16 (a), cu secvența de limitare a vitezei până la 0,02 m/s în Fig. 6.16 (b).



Fig. 6.16 Variația coeficientului de frecare cinetic în funcție de viteza de alunecare pentru un caz general (a) și pentru cazul particular când viteza de alunecare nu depășeste 0,015 m/s (b)

În figura 6.17 se prezintă diagrama de variație a deplasării cilindrului montat pe trei bile, în contact cu aceeași placă de oțel, pentru o viteză de deplasare a mesei de 0,6mm/s.



Fig.6.17 Variația deplasării cilindrului rezemat pe trei bile, pe o durată de 42 secunde la viteza mesei de $v_T = 0.6$ mm/s.

Simularea cu modelul Zuleeg, impunând valorile $a_1 = 0.18$ s/m, $a_2 = 0.02$, $a_3 = 0.2$, $a_4=0.062$ m/s este prezentată în Fig. 6.18 (a) și (b).



Fig. 6.18 Simularea deplasării cilindrului rezemat pe trei bile,(a) și a vitezei de alunecare (b) pe o durată de 42 secunde la viteza mesei de $v_T = 0.6$ mm/s.



Fig. 6.19Variația coeficientului de frecare cinetic în funcție de viteza de alunecare, pentru o viteza mai mare (a) și pentru viteza rezultată în cazul studiat (b)

Comentarii

În subcapitolul 6.3 s-a plecat de la înregistrarea variației fluctuațiilor forțelor tangențiale cauzate de fenomenul de stick-slip și, utilizând relația lui Zuleeg pentru coeficientul de frecare, sa obținut un model de alunecare cu stick-slip, mai mult sau mai puțin apropiat de variația reală a fenomenului de stick-slip, obținută experimental. Totodată s-a obținut variația vitezei de alunecare în zonele de slip.

Așa cum s-a arătat, modelul are avantajul că prezintă o diagramă acoperitoare în raport cu diagrama obținută în urma experimentului. Dezavantajul modelului este că prezintă o diagramă cu limite maxime și minime uniformă, efectul prezenței rugozităților neputând fi introdus în model. Un alt dezavantaj îl constituie efortul de a găsi valorile parametrilor $a_1...a_4$ care să permită o simulare cât mai apropiată de diagrama reală.

CAPITOLUL 7. MODELAREA FRECĂRII ÎN MIȘCARE DE ALUNECARE ALTERNATIVĂ

În Cap 2 s-au prezentat diverse modele ale tranziției forței de frecare la schimbarea sensului de mișcare. Modelele prezentate au valoarea forței de frecare zero doar în punctul de schimbare a vitezei, în rest modelele se prezintă cu diverse diverse variații în vecinătatea punctului de zero, majoritatea cu modele Striebeck.

În cadrul tezei s-a urmărit variația forței de frecare la schimbarea de sens a vitezei, înt-un contact dintre bun cilintru și piele degetelor. În Fig. 7.1 Testele au fost realizate la nivelul falangelor degetelor umane, utilizând un pin de construcție specială, caracterul vâscoelastic al pielii umane și al țesutului degetelor oferind posibilitatea obținerii unor modele originale pentru forța de frecare și pentru coeficientul de frecare.

În Fig. 7.1 se prezintă o schemă generală a testelor de frecare pe degete, utilizând Tribometrul CETR UMT 2 cu detalii privind contactul direct dintre pin și cele trei falage ale unui deget deget [Carlescu și Oprișan, 2022].



Fig. 7.1 Vedere generală a modului de testare la frecare pe pielea degetelor cu mișcare alternativă și detalii privind contactul deget cilindru.

Pentru acest tip de testări s-a utilizat un pin la capătului căruia i s-a atașat un cilindru din oțel, poz.4, cu diametrul de 6.96 mm, cu lungimea de 40 mm și rugozitatea $Ra = 0,06\mu m$. Mișcarea de translație alternativă este realizată de către suportul orizontal, poz.(2),în limitele unor valori de +30 mm și -30 mm,cu viteze cuprinse în intervalul 1 - 5 mm/s și cu forțe de apăsare Fz variabile de la 1 N până la 10 N. Senzorul de forțe, poz. 3, permite determinarea forței tangențiale dintre cilindru și suprafața pielii, pe direcție transversală Fy. În cazul acestor testări degetul testat este fixat pe masa standului, într-un suport cilindric, pentru a nu se mișca în timpul testărilor. În condițiile unei mișcări tranzitorii cu schimbare de sens a vitezei, apar probleme de întârzieri cauzate de elasticitatea țesutului degetelor, de vitezele de tranziție, de forța de apăsare. Modelarea forțelor de frecare în aceste condiții, cu trecerea prin zero, ridică probleme complexe în utilizarea unor expresii matematice continue și derivabile. În Fig.7.2 se prezintă variațiile forței tangențiale Fy la deplasarea cilindrului pe deget cu o viteza de 0,5 mm/s și o forța de apăsare Fz=1N pe o durată de 200 de secunde cu 4 salturi de trecere a vitezei prin zero.



Fig. 7.2. variațiile forței tangențiale Fy la deplasarea cilindrului pe deget cu o viteza de 0,5 mm/s și o forța de apăsare Fz=1N

Deși aparent se constată că saltul de la forța de frecare pozitivă la forța de frecare negativă se produce aproximativ în același timp cu schimbarea vitezei, un detaliu pe o secvență de 10 secunde, prezentat în Fig. 7.3, scoate în evidență o întârziere a trecerii prin zero a forței Fy, în raport cu timpus de schimbare a sensului de mișcare.



Fig.7.3. Detaliu cu întârzierea forței în raport cu timpulla viteza de 0,5 mm/s și la o forța de apăsare Fz=1N

Conform Fig. 7.3, viteza începe sa-și schimbe sensul în punctul A la aproximativ 40 secunde de la pornire, trece prin zero la 40,35 secunde și pornește în sens invers din punctul A* la 40,75 secunde.

Forța tangențială Fy, în punctul A trece din forță de frecare în forță de destindere tangențială elastică a țesutului degetului și ajunge la valoarea zero în punctul O la timpul de 41,5 secunde, deci cu o întârziere de 1,45 secunde față de viteză. În continuare, are loc comprimarea tangențială a țesutului degetului pe porțiunea OB, deformare ce se încheie în punctul B la un timp de 45,5 secunde. Din punctul B urmează alunecarea cilindrului pe deget.Prin urmare, între cele două forțe de frecare ,cea pozitivă și cea negativă există un decalaj de aprox. 5,5 secunde, în timp ce decalajul de timp este de doar 0,5 secunde. Fenomenul se manifestă similar și la schimbarea de la sensul negativ la cel pozitiv.

Practic modelele forțelor de frecare prezentate în Cap. 2 nu pot fi utilizate pentru frecarea dintre un material dur și un material vâscoelastic precum țesutul degetului.

Din punct de vedere al coeficienților de frecare cinetici, valorile diferă în funcție de încărcarea pe deget, după cum se poate vedea în Fig. 7.4.



Fig. 7.4. Variația coeficienților de frecare cinetici la viteza de 0,5 mm/s și la Forțe de apăsare de Fz=1N, 5N și 10N.

Rezultatele confirma valorile obținute și de alți cercetători.

Dacă viteza de deplasare a cilindrului crește, practic relaxarea și comprimarea țesutului degetelui au loc într-o succesiune mare încât, practic forța Fy nu mai este forță de frecare ci o forță tangențială corespunzatoare deformării și relaxării țesutului degetului, așa cum se poate vedea în Fig. 7.5.

Practic, avem coeficient de frecare, relativ constant la viteze de 0,5 și 1mm/s, în timp ce la 10 mm/s practic există doar comprimare și destindere a țesutului.

Precizăm că distanța parcursă s-a menținut aceeași, +30mm și -30 mm.



Fig. 7.5. Variația coeficienților de frecare cinetici la viteze de 0,5 mm/s până la 10mm/s și la forța de apăsare de Fz=1N

În teză sunt date și alte diagrame de tip forță-deplasare sau forță-timp-viteza.

Modelarea forței de frecare la schimbarea sensului vitezei, pentru contactul studiat este una complexa si depinde de viteză, încărcare dar și prezența sau absența unui lichid sau ulei pe suprafața degetului.

CAPITOLUL 8. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

8.1. Concluzii generale

În conformitate cu tematica, teza a abordat, în general, aspecte de modelare a frecării în condițiile unei mișcări liniare cu intermitență specifică fenomenului de "stick-slip" întâlnit în multe sisteme mecanice atunci când sunt întrunite o serie de condiții particulare. Modelările realizate în teză au avut ca suport fizic numeroase încercări experimentale desfășurate în condiții de stick-slip.

Principalele concluzii desprinse din cercetarea bibliografică, din experimente și din modelarea rezultatelor pot fi sintetizate astfel:

- Frecarea în tribosisteme de alunecare este un fenomen complex, studiat încă de la sfârșitul secolului XV de către Leonardo da Vinci și continuă să fie studiată și astăzi de la scară micro și nano până la scară macro.
- Referindu-ne strict la frecarea uscată, două caracteristici de bază sunt analizate atunci când se calculează forța de frecare: **coeficientul de frecare static**ă sau de aderență și **coeficientul de frecare cineti**că sau dinamic (care apare în procesul de alunecare). Ambele componente ale coeficientului de frecare depind de o multitudine de factori ce caracterizează suprafețele în contact ale tribosistemului de alunecare: natura materialelor, rugozitatea suprafețelor, presiunile de contact. În acest sens, coeficientul de frecare, într-o formă concentrată, poate fi o sumă a coeficientului de frecare datorat efectului energetic de adeziune între suprafețe și coeficientul de frecare generat de aspecte de natură mecanică (ruperi, deformări ale rugozităților).
- Pentru aceleași suprafețe în contact coeficientul de frecare static depinde de timpul de staționare a suprafețelor în contact iar coeficientul de frecare cinetic depinde de viteza de alunecare. În Cap. 2 sunt prezentate diverse relații propuse în literatură.
- În general, coeficientul de frecare static ce apare la pornire este mai mare decât coeficientul de frecare cinetic iar în literatură sunt indicate valori orientative pentru acești coeficienți funcție de materialele ce formează tribosistemul de alunecare.
- Mișcarea de stick-slip apare, în general la viteze de alunecare mici și foarte mici, în strânsă legătură cu rigiditatea sistemului mecanic în care este inclus tribosistemul de alunecare și atunci când coeficientul de frecare cinetic scade la creșterea vitezei de alunecare.
- Trecerea de la sensul pozitiv la sensul negativ, întâlnită în multe tribosisteme de alunecare cu mișcare alternativă este abordată sub diverse forme. Astfel, pornind de la modelul clasic Coulumbian,când trecerea presupune un salt prin zero a forței de frecare, sunt prezentate numeroase modele în care trecerea de la o viteză pozitivă la una negativă se face cu luarea în considerare a forței de frecare statică și a forței de frecare cinetică, cu diferențe mai mari sau mai mici, cu includerea efectului Stribeck, cu înclinări diferite a curbei de variație a fortei de frecare.

Pentru testările experimentale am utilizat următoarele echipamente și metodologii:

- Tribometrul CETR UMT2 existent în Laboratorul de Tribologie. Pentru a pune în evidență fenomenul de stick-slip s-au efectuat cu ajutorul Tribometrului doua tipuri de testări de alunecare cu intermitentă:
- Utilizarea metodei oscilatorului liniar cu alunecare pe o singura direcție (pe direcția de deplasare a mesei liniare a Tribometrului;
- Utilizarea unui echipament special conceput în conformitate cu standardul VDA 230-306.
- Pentru metoda oscilatorului liniar cu alunecare s-a folosit un disc cu masa m=242grame, legat printr-un arc elicoidal de tracțiune de senzorul pentru monitorizarea forței tangențiale. Discul a fost pus în contact cu o placă fixată pe masa liniară a Tribometrului. Prin deplasarea mesei Tribometrului cu viteze cuprinse între 0,02 și 8 mm/s s-au putut obține variații ale

forței tangentiale la contactul dintre disc si placă, forțe variabile cu evidențieri clare ale fenomenului de stick-slip.

- Pentru metoda corespunzătoare standardului VDA 230-306 s-a utilizat o lamelă elastică cu
 o bilă la un capăt și cu prindere în senzorul de forțe. In acest caz bila a fost pusa in contact
 cu placa de pe masa liniara, forța de apăsare fiind impusă si monitorizată de către senzor. Pe
 lamela elastică s-a montat un senzor de accelerație cu monitorizare separată pe un laptop și
 cu un program adecvat.
- Pentru testări cu rigiditate mare s-a utilizat metoda pin on disc, pinul fiind atașat senzorului de forțe la un capăt, iar la capătul opus având o bilă din oțel în contact cu plăcile utilizate pentru testări.
- Pentru testările de alunecare cu viteze care-si schimbă sensul de mișcare s-a utilizat un dispozitiv constând dintr-un pin fixat la senzorul de forțe cu un cilindru din oțel fixat la capătul opus. În acest caz mișcările de du-te-vino au fost efectuate de către traversa verticală a Tribometrului pe direcție perpendiculară pe direcția de mișcare a mesei liniare. Testele au fost făcute pe degetele de la mână urmărindu-se atât modificările coeficientului de frecare dintre cilindrul de oțel și piele cât și modul de trecere a forței de frecare de la un sens la sensul opus de mișcare.
- Pentru măsurarea rugozităților suprafețelor metalice în contact s-a utilizat Profilometrul Form Talysurf Intra cod. M112/334-02. În plus, cu ajutorul profilometrului s-a obținut pentru fiecare suprafață în contact câte o profilogramă și curbele Abott și cele de distribuție a densității probabilității înălțimilor rugozităților pe direcția de alunecare a suprafețelor.

În urma analizării rezultatelor testărilor cu oscilatorul liniar putem desprinde următoarele concluzii:

- Modelul oscilatorului liniar adoptat oferă posibilitatea urmăririi și monitorizării fenomenului de stick-slip în funcție de viteza de deplasare a mesei, de rigiditatea elementului elastic, de suportul (sticla sau oțel) utilizat pentru alunecare, de rugozitatea suprafețelor de alunecare utilizate.
- Prin utilizarea unui suport de sticla plană cu rugozitatea de 0,03 microni, s-au obținut variații foarte regulate ale forței de frecare în procesele de stick- slip, prin urmare coeficienții de frecare statică au valori foarte apropiate. Totodată, s-a pus în evidență că prin creșterea vitezei mesei liniare fenomenul de stick-slip se atenuează până la dispariție. De asemenea,creșterea rigidității elementului elastic, reduce considerabil fenomenul de stickslip, până la anulare lui.
- Utilizarea a trei plăci de oțel cu rugozități diferite a permis să se pună în evidență rolul major pe care-l are componenta mecanică a coeficientului de frecare, dată de interacțiunea dintre rugozități.
- Prin creșterea presiunii de contact utilizând trei bile din oțel ca suport de reazem pentru cilindru, presiunea de contact a crescut la aprox. 300 MPa, ducând și la o creștere a coeficientului de frecare static până la valori de peste 0,35.
- Modelarea coeficientului de frecare static cu modelul Cohen et al, care ia în considerare rugozitatea suprafețelor, duritatea și încărcarea, prin indicele de plasticitate ψ conduce la valori de peste 2 a coeficientului de frecare statică, ca rezultat al valorii mici a presiunii de contact și a regimului de deformare elastic la nivelul rugozităților.
- Luând în considerare valoarea maximă a coef. de frecare static obținut la primul salt, nu s-a confirmat modelul de creștere a coeficientului de frecare static în funcție de timpul de staționare parcurs de la pornirea testărilor.
- Plecând de la numeroasele relații care arată că, pentru un tribosistem de alunecare, coeficientul de frecare static crește odată cu creșterea timpului de staționare, până la o anumită limită obținută după un interval foarte mare de timp, ne-am propus să modelăm zonele de aderență prin modele de tip Leine et al.[Leine,1998]. Modelul propus de Leine

este, de fapt, o funcție sigmoida cu o creștere inițială pâna la o limită după care urmează o perioadă constantă, în funcție de timp.

- Pentru diagrama din Fig. 6.1, cu un pronunțat proces de stick-slip s-a considerat că perioadele de aderență dintre cilindru și placa de oțel sunt perioade de staționare, fără alunecare și ,în consecință, ar trebui să fie valabil molelul Leine. Cunoscând valoarea coeficientului de frecare static pentru o perioada de timp de max. 300 de secunde, aceasta s-a considerat ca fiind $\mu_{s,inf}$ iar valoarea coeficientului de frecare static la începutul aderenței s-a considerat $\mu_{s,0}$. Valorile lui $\mu_{s,0}$ au fost obținute direct din diagrama 6.1, pentru fiecare început de aderența. In modelul Leine singurul parametru care a fost ales pentru o cât mai bună aproximare a fost exponentul α .
- Astfel, pentru fiecare zonă de aderență s-a determinat funcția Leine care aproximează cel mai bine variația în timp a coeficientului de frecare static. Pentru toate cele 4 zone de aderență, exponentul α a avut aceeași valoare de 0,09.
- Considerăm că astfel am arătat că modelarea cu formula lui Leine et. al. poate fi utilizată atât pentru o staționare în care apare doar forța normală (greutatea în cazul nostru), situație prezentată în literatură, cat și în perioadele de staționare datorită aderenței suprafețelor în contact supuse unei forțe tangențiale date de mișcarea mesei și preluată prin încărcarea elementului elastic.

8.2. Contribuții originale

Din punctul nostru de vedere, teza aduce următoarele contribuții originale:

- Realizarea unui studiu bibliografic cu evidențierea clară a rolului coeficienților de frecare statică și cinetică în dezvoltarea fenomenului de stick- slip;
- Realizarea unui dispozitiv de tip oscilator unidirecțional cu care am studiat experimental fenomenul de stick-slip. Avantajul acestui sistem a constat în faptul că utilizând o masă oscilantă de tip cilindru am reușit să rezolv ecuația de mișcare a cilindrului în fazele de slip;
- Întrucât salturile de slip sunt de foarte scurtă durată, am transferat datele din softul Tribometrului și le-am prelucrat separat cu programe în Excel, Mathcad și Matlab;
- Am stabilit legea de variație a vitezei de retragere a masei oscilante în procesul de slip ca o funcție polinomială de ordinul 5;
- Am stabilit variația accelerației masei oscilante în procesul de slip pe cale analitică, prin derivarea funcției vitezei;
- Am efectuat măsurători ale accelerației masei oscilante în faza de slip utilizând un accelerometru cu un circuit separat cuplat la un laptop;
- Am validat prin măsurători de accelerație modelul teoretic propus;
- Cunoscând variațiile de accelerație pe parcursul saltului de slip, am calculat, cu ajutorul ecuației dinamice de mișcare a masei oscilante, variația coeficientului de frecare cinetic pe parcursul perioadei de slip;
- Am corelat într-un program Matlab variația coeficientului de frecare în timpul de slip cu variația vitezei de alunecare în aceeași fază de slip și am obținut o dependență complexă a coeficientului de frecare cinetic cu viteza de alunecare;
- Pentru zona de creștere a vitezei de alunecare am obținut, prin metodologia propusă scăderea coeficientului de frecare. Acest rezultat este esențial în dezvoltarea fenomenului de stick-slip, confirmând astfel valabilitatea metodologiei propuse;
- Am extins modelul lui Leine care prevede variația coeficientului de frecare static cu timpul de staționare înainte de experiment, la fazele de aderență din diagrama de stick-slip;
- Prin urmare, având valoarea coeficientului de frecare statică la un timp îndelungat (valoarea de saturație) am modelat fazele de aderență liniare ca urmare a arcului utilizat, prin relații de tip Leine, cu aproximări cuprinse între zero și 3,5%;
- Am arătat în final că, în procesul de stick-slip, fără amortizare, atât coeficientul de frecare static cât și coeficientul de frecare cinetic au valori diferite ce variază între valori maxime și

valori minime ce se schimbă succesiv la fiecare salt. Procesul este unul complex, într-o dinamică continuă și nu putem afirma că există o valoare pentru coeficientul de frecare static si o valoare pentru coeficientul de frecare cinetic. Prezența rugozităților face ca salturile de la aderență la alunecare să aibă o anumită dispersie pe lungimea testata;

- În final, utilizând un model de variație a coeficientului de frecare cinetică cu viteza de alunecare propus de Zuleeg, am dezvoltat un program în Matlab pentru a simula o diagramă tipică de stick-slip. Deși modelul prezintă o mare dificultate în alegerea corectă a patru parametri independenți, am reușit să obținem simulări ale unor teste realizate pe stand, impunând limitele maxime și minime ale variației deplasării masei oscilante.

Bhushan B, *Introduction to Tribology*, 2nd Edition, 2013, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.

Bhushan B.: Introduction to Tribology, John Wiley and Sons, Chichester, 2013. S. Kato, N. Sato and T. Matsubayashi, *Some Considerations on Characteristics of Static Friction of Machine Tool Slideway*, Trans of ASME, Journal of Lubrication Technology, July 1972, 234-247.

Călin, A., Cercetări teoretice și experimentale privind tribologia pielii cu aplicații la prinderea direct și indirect a obiectelor, Teză de doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București, 2022

Cârlescu, V., Oprișan, C.M., Chiriac, B., Ianuș, G., Olaru, D.N., (2022), Influence of Hand Sanitisers on the Friction Properties of the Finger Skin Amid the COVID-19 Pandemic, Innovations in Mechanical Engineering, pg 420-428, Springer International Publishing

Cârlescu, V., Oprișan, C.M., Ianuș, G., Olaru, D.N., (2020), Evaluation of friction behaviour on human finger skin considering precision grip task, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Chiriac, B., Oprisan, C.M., Carlescu, V., Olaru, D.N., (2022), Friction coefficient between glass surfaces and soft materials, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Chowdhury, M. A., et al., *Experimental Investigation on Friction and Wear of Stainless Steel 304 Sliding Against Different Pin Materials*, World AppliedSciences Journal 22 (12): 1702-1710, 2013.

Ciornei, F. C., S Alaci and C Bujoreanu, A model of the effect of dry friction on the behaviour of a dynamical system, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 997, The 9th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering - ACME 2020 4-5 June 2020, Iași, Romania

Cohen, D., Kligerman, Y. (2017). Simulation of Friction and Stiction in Multibody Dynamics Model Problems. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*.

Cohen, D., Kligerman, Y., & Etsion, I. (2008). A model for contact and static friction of nominally flat rough surfaces under full stick contact condition. *Journal of Tribology*, *130*(3). https://doi.org/10.1115/1.2908925

Cohen, D.,Y. Kligerman, I. Etsion, A Model for Contact and Static Friction of Nominally Flat Rough Surfaces Under Full Stick Contact Condition, Journal of Tribology, JULY 2008, Vol. 130 JULY (2008).

Daub, E. G., & Carlson, J. M. (n.d.). *Stick-slip instabilities and shear strain localization in amorphous materials*.

De Moerlooze, K., Al-Bender, F., Van Brussel, H., A Generalised Asperity-Based Friction Model, Tribol Lett (2010) 40:113–130, DOI 10.1007/s11249-010-9645-x

Denape, J., Popa N., Onescu C., *Dinamica interfețelor in tribologie*. Editura Universitatii din Pitesti, 2012.

Dion, J. L., Chevallier, G., Penas, O., & Renaud, F. (2013). A new multicontact tribometer for deterministic dynamic friction identification. *Wear*, *300*(1–2), 126–135. https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.100

Donescu, Ş., Munteanu, L., & Moşneguţu, V. (2011). ON THE ACOUSTICS OF THE STICK-SLIP PHENOMENON. In *Rev. Roum. Sci. Tech. – Méc. Appl* (Vol. 56, Issue 2).

Elmer, F. J., 1997 Nonlinear dynamics of dry friction J. Phys. A: Math. Gen.30 pp 6057 6063

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).

Flores, P., Ambrósio, J., Claro, J. C. P., Lankarani, H. M., & Koshy, C. S. (2006). A study on dynamics of mechanical systems including joints with clearance and lubrication. *Mechanism and Machine Theory*, *41*(3), 247–261. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2005.10.002

Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, *123*(1), 133–145. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2

Gafițanu, M., Crețu Sp., Racocea, C., Olaru D., Rulmenți. Proiectare si tehnologie, Vol.I, Ed. Tehnică, Bucuresti, 1985.

Gatti, F., Amann, T., Kailer, A., Baltes, N., Rühe, J., & Gumbsch, P. (2020). Towards programmable friction: control of lubrication with ionic liquid mixtures by automated electrical regulation. *Scientific Reports*, *10*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-74709-2

Gavrilă, G, CONTRIBUȚII PRIVIND ANALIZA SOLICITĂRII DE CONTACT ELASTICPLASTIC CU FRECARE, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, 2014

Georgescu, C., Botan, M., Deleanu, L., *Tribological Characterisation of PBT* + *Glass Bead Composites with the Help of Block on Ring Test*, Tribology in Industry Vol. 35, No. 2(2013) 134-140.

Gustafsson, E., *Investigation of friction between plastic parts*, Master's Thesis in Polymer Tribology, Department of Applied Mechanics, Division of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden , 2013.

Henaff, R., Doudic, G. le, Pilette, B., Even, C., Fischbach, J.-M., Bouquet, F., Bobroff, J., Monteverde, M., & Marrache-Kikuchi, C. A. (2017a). *A study on kinetic friction: the Timoshenko oscillator*. <u>https://doi.org/10.1119/1.5008862</u>

Ianuş, G., Cojocaru, D., Oprişan, M.C., Paleu, V., Olaru, D.N., (2020), Power loss in grease lubricated ball bearings, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Ianuş, G., Cojocaru, D., Oprişan, M.C., Carlescu, V., Olaru, D.N., (2020), Friction models for grease lubricated ball-race contacts, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Jacob, C., Eldhose, P. B., & Balaram, B. (2016a). Entrainment and Synchronization of Stick - Slip Oscillators. *Procedia Engineering*, 144, 1015–1022. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.037

Kietzig, A. M., Hatzikiriakos, S. G., & Englezos, P. (2010). Physics of ice friction. *Journal* of Applied Physics, 107(8). https://doi.org/10.1063/1.3340792

Lampaert, V., Swevers, J., & Al-Bender, F. (2004). *EXPERIMENTAL COMPARISON OF DIFFERENT FRICTION MODELS FOR ACCURATE LOW-VELOCITY TRACKING*. http://www.mech.kuleuven.ac.be/pma/

Leine, R. I., D. H. Van Campen, A. De Kraker and L. Van Den Steen, *Stick-Slip Vibrations Induced by Alternate Friction Models*, Nonlinear Dynamics 16: 41–54, 1998.

Marques, F., Flores, P., Claro, J. C. P., & Lankarani, H. M. (2019). Modeling and analysis of friction including rolling effects in multibody dynamics: a review. *Multibody System Dynamics*, *45*(2), 223–244. https://doi.org/10.1007/s11044-018-09640-6

Marques, F., Flores, P., Claro, J.C.P., Lankarani, H.M.: A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems. *Nonlinear Dynamics*, 86(3) 1407-1443 (2016)

Marques, F., Paulo Flores, J. C. Pimenta Claro, H. M. Lankarani, A survey and comparison of several friction force models for dynamic analysis of multibody mechanical systems, Nonlinear Dynamics · August 2016, online;

Nordhagen, H., Stick-Slip Friction, Thesis submitted for the degree of Candidatus Scientiarum, Department of Phyiscs, University of Oslo, January 2003

Olaru, D.N., TRIBOLOGIE, Ed. a II-a, revăzută și adăugită, Editura Universității Tehnice "Gheorghe Asachi" Iași, 2023

Oprisan, C.M., Tufescu, A., & Olaru, D. N. (2017). SIMULATION OF THE OIL REPLENISHMENT IN A BALL-RACE CONTACT, Brasov.

Oprişan, C. M., Chiriac, B., Tufescu, A., & Olaru, D.N. (2022), Static and dynamic friction coefficient in low loads and sliding speed conditions, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1262 012012

Oprișan, C. M., Chiriac, B., Cârlescu, V., & Olaru, D. N, (2020), Friction forces on human finger skin, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 724

Oprişan, C. M., Chiriac, B., Cârlescu, V. and Olaru, D. N., (2020), *Influence of the stiffness and the speed on the stick- slip process*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volumul 997.Nr.1, Pag. 012016

Papangelo, A., Ciavarella, M. & Hoffmann, N. 2017 Subcritical bifurcation in a selfexcited single-degree-of-freedom system with velocity weakening–strengthening friction law: analytical results and comparison with experiments *Nonlinear Dynamics* 90 pp 2037–2046

Pennestrì, E., Rossi, V., Salvini, P., & Valentini, P. P. (2016). Review and comparison of dry friction force models. In *Nonlinear Dynamics* (Vol. 83, Issue 4, pp. 1785–1801). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/s11071-015-2485-3

Pereira, L. D., Cayres, B., & Weber, H. I. (2018). Numerical application of a stick-slip control and experimental analysis using a test rig. *MATEC Web of Conferences*, 148. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814816009

Pitenis, A. A., Dowson, D., & Gregory Sawyer, W. (2014). Leonardo da Vinci's friction experiments: An old story acknowledged and repeated. *Tribology Letters*, *56*(3), 509–515. https://doi.org/10.1007/s11249-014-0428-7

Pitenis, A., Duncan Dowson, W. Gregory Sawyer, *Leonardo da Vinci's Friction Experiments: An Old Story Acknowledged and Repeated*, Tribology Letters, 2014, 56(3):509-515.

Rao, S. S. (2011). *Mechanical vibrations*. Prentice Hall.

Rodellar, J., & Griñó, R. (2005). *Identification of a system with dry friction*. https://www.researchgate.net/publication/33421035

Rusu, M. A., CERCETĂRI PRIVIND COMPORTAREA TRIBOLOGICA A UNOR TIPURI DE POLIMERI, Teză de doctorat, Univ. Tehnivă" GHEORGHE ASACHI" Iași, 2015.

Rusu, M. A., Ionita D., Cârlescu, V., Prisacaru G. And Olaru, D. N., (2015), *Characterization of some types of polymers by friction behaviour*, THE ROMANIAN REVIEW PRECISION MECHANICS, OPTICS & MECHATRONICS, 48, 2015, p.110-116.

Rusu, M. A., Ionita D., Cârlescu, V., Prisacaru G. And Olaru, D. N., (2015), *Analitical model for friction of the polimers*, Proc of The 6th International Conference on COMPUTATIONAL MECHANICS AND VIRTUAL ENGINEERING – COMEC 2015, 15 – 16 October 2015, Brasov.

Rusu, M. A., Ionita, D., Benchea, M., Cârlescu V. And Olaru, D. N., *Friction of the polymers. Experimental results and analytical model*, Proc. of International Conference of Mechanical Engineering, ICOME 2015, 8th – 9th October 2015, Craiova.

Rusu, M.A., Barnea, A., Enache, G. A., Cârlescu, V., Oprisan, C. and Olaru, D. N., *Friction behavior of the polymers operating at low loads sliding conditions*, Bulletin of thePolytechnic Institute of Iasi, Tom LXI (LXV), Fasc. 1 (2015), 111-122.

Singh, R. K., Devarajan, K., & Santhosh, B. (2018). Numerical solution for stick-slip oscillator with geometric non-linearity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *310*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012102

Song, G., Abdalla, A., CaP, L., & Wang I, Y. I. (n.d.). *Stick-Slip Friction Compensation of Uncertain Robot Manipulators Using Neural Network Controllers*.

Stoica, N. A., Petrescu, A. M., Tudor, A., & Predescu, A. (2017). Tribological properties of the disc brake friction couple materials in the range of small and very small speeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *174*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/174/1/012019

Stoica, N. A., Petrescu, A. M., Tudor, A., & Valentin Rădulescu, A. (2016.). EXPERIMENTAL STUDIES OF THE FRICTION PHENOMENON FOR STEEL ON OTHER MATERIALS FRICTION COUPLES AT LOW SLIDING VELOCITIES.

Stoica, N. A., Tudor, A., Some Aspects Concerning the Behaviour of Friction Materials at Low and Very Low Sliding Speeds, Tribology in Industry, Vol. 37, No. 3 (2015) 374-379

Tudor, A., & Stoica, N. A. (2018). Experimental results about the stick-slip phenomenon with application to the disc-brake friction materials couple used in used in the automotive domainU.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 80, Iss. 1, 2018,

https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez117_247078.pdf Tudor, A., et al.: Effect of friction about transsmisibility in coulombian damper, Bulletin of the Transilvania University of Braşov • Series I • Vol. 9 (58) No. 2 Special Issue – 2016

Zuleeg J. How to Measure, Prevent, and Eliminate Stick-Slip and Noise Generation with Lubricants, SAE Technical Paper 2015-01-2259, 2015, doi:10.4271/2015-01-2259.

http://antiqua91.fr/wa_2.html

https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8PDFDocs/SurfaceAnalysis/TMT/Webin ars/Tribology_101_Webinar-1_Intro_and_Basics_29-Jan-2013.pdf

ANEXA A.1

Lista lucrări publicate si in curs de publicare

Mat. Inf. Cezara-Măriuca Oprișan

LUCRARI INDEXATE IN WEB OF SCIENCE - CORE COLLECTION:

- Cârlescu, V., **Oprişan, C.M.,** Chiriac, B., Ianuş, G. and Olaru, D.N., 2022. Influence of Hand Sanitisers on the Friction Properties of the Finger Skin Amid the COVID-19 Pandemic. In Innovations in Mechanical Engineering (pp. 420-428). Springer International Publishing.
- 2. **Oprisan, C.M.,** Chiriac, B., Carlescu, V. and Olaru, D.N., 2020. Friction forces on human finger skin. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 724, No. 1, p. 012059). IOP Publishing.
- 3. Ianuş, G., Cojocaru, D., **Oprişan, M.C.,** Paleu, V. and Olaru, D.N., 2020. Power loss in grease lubricated ball bearings. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 724, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.

LUCRARI INDEXATE IN SCOPUS:

- 1. **Oprişan, C.M.,** Chiriac, B., Cârlescu, V. and Olaru, D.N., 2020, December. Influence of the stiffness and the speed on the stick-slip process. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 997, No. 1, p. 012016). IOP Publishing.
- Cârlescu, V., Oprişan, C.M., Ianuş, G. and Olaru, D.N., 2020, December. Evaluation of friction behaviour on human finger skin considering precision grip task. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 997, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.

LUCRARI INDEXATE IN GOOGLE SCHOLAR :

- 1. Chiriac, B., **Oprisan, C.M.,**Carlescu, V. and Olaru, D.N., 2022, October. Friction coefficient between glass surfaces and soft materials. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1262, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- 2. **Oprişan, C.M.,** Chiriac, B., Tufescu, A. and Olaru, D.N., 2022, October. Static and dynamic friction coefficient in low loads and sliding speed conditions. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1262, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- Ianuş, G., Cojocaru, D., Oprişan, M.C., Cârlescu, V. and Olaru, D.N., 2020, December. Friction models for grease lubricated ball-race contacts. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 997, No. 1, p. 012012). IOP Publishing..
- 4. Oprisan, C.M., Tufescu, A. and Olaru, D.N., 2017. Simulation of the oil replenishment in a ball-race, Int. Conf. COMEC 2017, Brasov, contact.aspeckt.unitbv.ro<u>https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl</u> <u>=en&user=5e-lxSQAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=5elxSQAAAAJ:u5HHmVD_u08C</u>
- OLARU, D., Oprisan, C.M., Chiriac, B., Carlescu, V., Tufescu, A. and Stamate, V.C., Kinetic and Static Friction Coefficients in Stick-Slip Motion (Rev. 1). Available at SSRN 4886251.<u>http://papers.ssrn.com</u> (Under review)