

**UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN
TIMIȘOARA**

**Facultatea de Mecanică
Catedra de Organe de Mașini și Mecanisme**

Ing. Andreea DOBRA

**OPTIMIZAREA FUNCȚIONAL-CONSTRUCTIVĂ
A MICROLAGĂRELOR CU CUZINEȚI
DIN PIETRE SEMIPREȘIOASE**

Teză de doctorat

Conducător științific:

Prof.dr.ing. Octavian GLIGOR

1998

CUPRINS

OPTIMIZAREA FUNCȚIONAL-CONSTRUCTIVĂ A	3
MICROLAGĂRELOR CU CUZINEȚI DIN PIETRE SEMIPREȚIOASE	
1. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND MICROLAGĂRELE CU	7
PIETRE SEMIPREȚIOASE	
1.1 Domenii de utilizare ale microlagărelor cu cuzinet din safir	7
1.2 Tipuri uzuale de lagăre cu cuzineți din pietre semiprețioase	9
1.3 Montura cuzinetului din safir	12
2. INFLUENȚA TEHNOLOGIILOR UZUALE DE CREȘTERE ȘI	14
PRELUCRARE A SAFIRULUI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR FIZICO -	
MECANICE	
2.1 Proprietăți ale safirului privind lagărele pentru mecanică fină	14
2.1.1 Constante fizice	14
2.1.2 Proprietăți fizice	16
2.2 Tehnologii de obținere a cuzineților din safir	19
2.3 Defecte ale cristalelor. Defecte specifice safirului și rubinului	19
2.4 Tensiuni interne în monocristalele sintetice de safir și rubin	20
3. ANALIZA PROCESELOR DE FRECARÉ SAFIR - OȚEL.	
CERCETAREA PIERDERILOR PRIN FRECARÉ ÎN LAGĂRELE	22
PENTRU VÂRFURI	
3.1 Analiza fenomenului frecării între safir și alte materiale	23
3.1.1 Uzarea safirului funcție de orientarea față de axa cristalografică "c"	23
3.1.2 Uzarea safirului funcție de orientarea față de axa cristalografică "a"	25
3.1.3 Analiza frecării și a uzării safirului funcție de lubrificare și de	28
nivelul de prelucrare al suprafețelor	
3.1.4 Analiza uzării safirului funcție de umiditatea relativă a mediului	35
3.2 Standuri pentru cercetarea frecării în lagărele cu safir	37
3.2.1 Măsurarea momentelor de frecare mici, în cazul lagărelor pentru	38
vârfuri	
3.2.2 Pierderi mecanice la contoare electrice	40
3.2.3 Tribometru cu o singură bilă	42
3.2.4 Stand pentru determinarea frecării din lagărele pentru vârfuri	44
3.2.5 Frecarea în lagărele pentru vârfuri	49
3.2.6 Determinarea experimentală a momentului de frecare pentru turații	50
mici	

4. BAZELE TEORETICE ALE CALCULULUI LAGĂRELOR PENTRU VÂRFURI	54
4.1 Considerații teoretice privitoare la contactul hertzian punctiform	54
4.2 Elemente de calcul ale lagărelor pentru vârfuri încărcate axial	60
4.2.1 Analiza influenței raportului razelor asupra momentului de frecare	64
4.2.2 Analiza influenței forței de încărcare axială și a tensiunii de contact asupra momentului de frecare	70
4.2.3 Contribuții la optimizarea parametrilor geometrici	72
I. Determinarea razei pivotului r_1 funcție de tensiunea de contact admisă	72
II Determinarea razei pivotului r_1 funcție de eroarea de citire	78
4.3 Elemente de calcul ale lagărelor pentru vârfuri încărcate complex	84
4.4 Considerații finale privind bazele teoretice ale calculului și funcționării lagărelor pentru vârfuri	95
5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE	97
5.1 Instalații experimentale pentru încercări în regim stabilizat	98
5.1.1 Stand pentru determinarea momentului de frecare	99
5.1.2 Stand pentru determinarea raportului optim al razelor în regim stabilizat	100
5.2 Instalația experimentală pentru încercări în regim tranzitoriu	104
5.3 Metoda de investigare	105
5.4 Prelucrarea rezultatelor	106
5.4.1 Incercări în regim stabilizat	106
5.4.2 Incercări în regim tranzitoriu	126
5.5 Analiza preciziei experimentale de indicație	132
6. CONTRIBUȚII ȘI CONCLUZII	137
6.1 Contribuții	137
6.2 Concluzii	138
ANEXA	140
BIBLIOGRAFIE	151

OPTIMIZAREA FUNCȚIONAL-CONSTRUCTIVĂ A MICROLAGĂRELOR CU CUZINEȚI DIN PIETRE SEMIPREȚIOASE

Safirele și rubinele au fost întotdeauna apreciate ca pietre prețioase pentru frumusețea lor. Rubinul, a cărui denumire provine din latinescul “ruber” - roșu, se găsește sub formă naturală în țările Indochinei. În antichitate i s-au oferit puteri divine și era considerat un simbol al vieții, dătător de curaj și inteligență. Etimologic, denumirea de safir provine de la ebraicul “ sappe ” – foarte frumos. În stare naturală acesta se găsește în Thailanda, Ceylon, India, Birmania, Australia, SUA, are o culoare albastră - azurie și spiritual întruchipează înțelepciunea și curățenia. Numeroase coroane regale împodobite cu safire și rubine, demonstrează prețuirea ce li s-a dat din cele mai vechi timpuri. Dar corindonul cu cele două variante ale sale (safirul și rubinul) are și alte calități care au dus la aplicațiile sale industriale.

Duritatea deosebită a corindonului, imediat următoare diamantului, a atras atenția ceasornicarilor, astfel că prima aplicație cu adevărat tehnică este aceea de cuzinet pentru lagăr de alunecare. Această întrebuintare a fost limitată în timp deoarece materia primă era de origine naturală.

Descoperirea procedurii de fabricare a pietrelor sintetice, la începutul secolului XX, a permis trecerea de la stadiul relizării artisanale a cuzinețelor la stadiul execuției industriale a acestora.

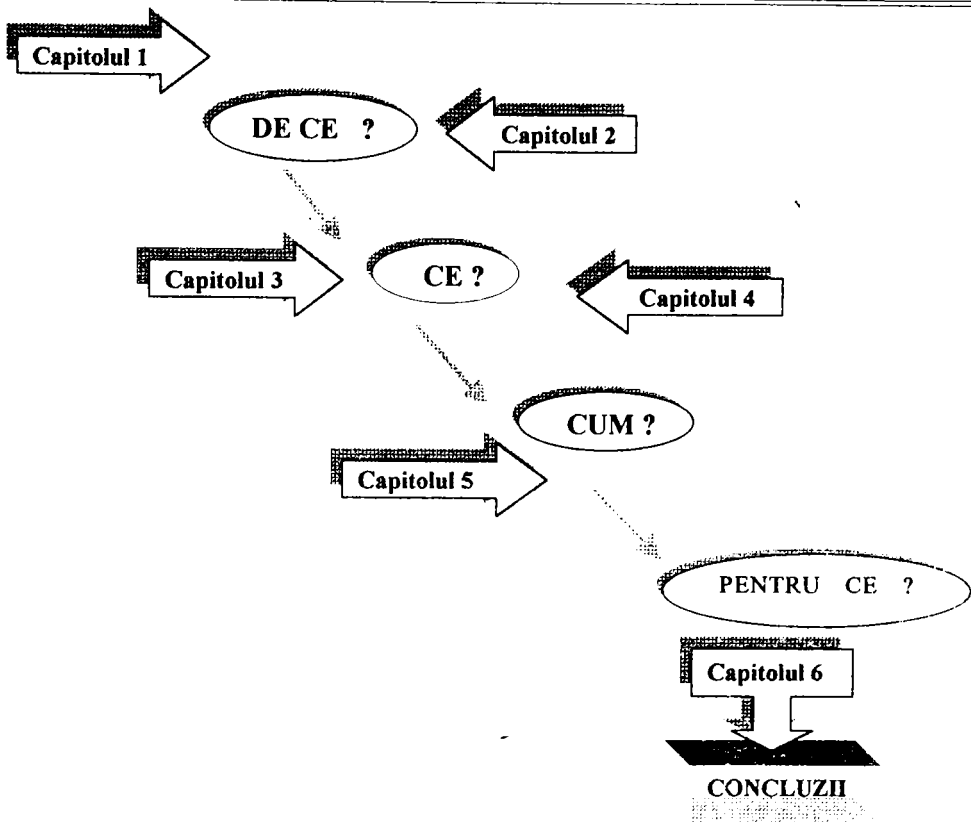
Sinteza pietrelor artificiale a fost realizată și pusă la punct de profesorul Louis Verneuil, în anul 1904. Procedul a făcut obiectul unor îmbunătățiri tehnologice importante.

Studiul fenomenelor fizico – chimice și tribologice la nivelul suprafețelor de contact dintre safir și diverse materiale se dezvoltă continuu.

Frecarea în microlagărele având cuzineții din safir a fost și este subiectul unor cercetări orientate pe o aplicație concretă (aparate magneto-electrice sau electromagnetice, contoare, echipamente de orologerie, etc).

Lucrarea de față lărgeste sfera cercetării influenței unor factori (geometrici, de viteză relativă, sarcină -stare de tensiune-, modalitate de lubrificare) asupra frecării în microlagăre. Ea este structurată în 6 capitole.

O imagine sugestivă a acestei structuri dialectice este redată în figura următoare:



1. Considerații generale privind microlagărele cu pietre semiprețioase
2. Influența tehnologiilor uzuale de creștere și prelucrare a safirului asupra proprietăților fizico-mecanice
3. Analiza proceselor de frecare safir - oțel. Cercetarea pierderilor prin frecare în lagărele pentru vârfuri
4. Bazele teoretice ale calculului lagărelor pentru vârfuri
5. Cercetări experimentale
6. Contribuții și concluzii

Primele cinci capitole, pacurg axa polurilor DE CE ?, CE ?, și CUM ? finalizându-se în motivația: PENTRU CE ?. Astfel:

DE CE ?

Deoarece:

↳ Domeniul larg de utilizare al lagărelor pentru vârfuri impune o continuă perfecționare a construcției acestora. Un aparat de măsură, un anemometru, un clinometru, un contor care nu redau semnalul real în clasa de eroare admisă, din cauza lagărelor pentru vârfuri, sunt declarate rebuturi. Măsurarea vitezei vântului cu un anemometru necorespunzător, poate conduce chiar la anularea unui record sportiv.

↳ oricărui subansamblu dintr-un sistem îi revine o cotă parte, pentru câmpul elementelor constructive de mecanică fină ce utilizează lagăre pentru vârfuri, construcția și funcționarea acestora poate deveni chiar esențială.

Dacă elementele componente ale unui contor (electric sau pentru apă) sunt executate impecabil, dar lagărele pe care se sprijină echipajul mobil, nu sunt montate cu jocul minim necesar, sau prelucrarea pivotului nu este cea corespunzătoare, funcționarea corectă a întregului contor este compromisă.

↳ tehnologia modernă de obținere a safirului, care poate fi monitorizată pe tot parcursul de creștere și a traseului automatizat în mare parte conduce la un cost de fabricație relativ scăzut, ceea ce face din lagărele cu safir un element de bază în diverse construcții de mecanică fină.

CE ?

Aspectele tratate în lucrare se referă la:

↳ analiza selectivă a cercetării fenomenului de frecare dintre oțel și safir (materiale utilizate în proporție de 99% în construcția lagărelor pentru vârfuri),

↳ construcția lagărelor pentru vârfuri,

↳ metode de cercetare ale comportamentului lagărelor pentru vârfuri în regim tranzitoriu (frânare - oprire, accelerare – pornire),

↳ considerații teoretice care stau la baza proiectării calculului și funcționării lagărelor pentru vârfuri.

CUM ?

↳ în cadrul investigațiilor experimentale s-a analizat comportamentul lagărelor pentru vârfuri în cazul modificării:

-macro și microgeometriei cuzinetului respectiv fusului
-cinematicii (regim constant și tranzitoriu)
-sarcinii axiale centrice,

păstrându –se invarianți parametri mediului ambiant (temperatură, curenți de aer).

↳ s-au efectuat 180 de încercări pentru 4 trepte de viteză unghiulară constantă, și câte 24 în regim tranzitoriu. Fiecare încercare s-a repetat de minim 3 ori. Valorile măsurate au fost prelucrate cu ajutorul unei plăci de achiziție și a unui soft adecvat, obținându-se 6000 de puncte de citire pentru fiecare măsurătoare.

↳ numărul total al valorilor măsurate a depășit cifra de $2 \cdot 10^6$.

PENTRU CE ?

↳ pentru a oferi prin proiectare / concepție soluții mai reușite, optime (din considerente de material, respectiv dimensional) și fiabile.

Pe această cale mulțumesc pentru sprijinul continuu acordat, conducătorului științific prof.dr.ing. **Octavian GLIGOR**, profesorului dr.ing. **Nicolae GHEORGHIU** și tuturor colegilor care m-au încurajat și mi-au oferit sfaturi din experiența lor.

Mulțumesc de asemeni referenților care au avut amabilitatea de a analiza prezenta lucrare.

1. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND MICROLAGĂRELE CU PIETRE SEMIPREȚIOASE

1.1 Domenii de utilizare ale microlagărelor cu cuzinët din safir

Duritatea deosebită, rezistența la agenți corozivi, și comportamentul la uzură a condus la o utilizare pe scară largă a microlagărelor¹ cu cuzineți din safir. Astfel, aceste lagăre sunt utilizate în construcția:

↳ aparatelor (galvanometre, ampermetre, indicatoare de nivel VU-metre) și a contoarelor electrice și pentru apă

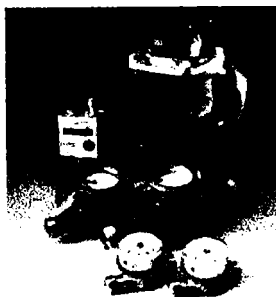


Fig. 1. 1 Contoare pentru apă (ZENNER)

↳ ceasurilor și echipamentelor de orologerie



Fig. 1. 2 Ceas (PIAGET)

↳ busolelor

¹ Lagăr cu dimensiuni nominale în domeniul 0,05 ... 3 mm

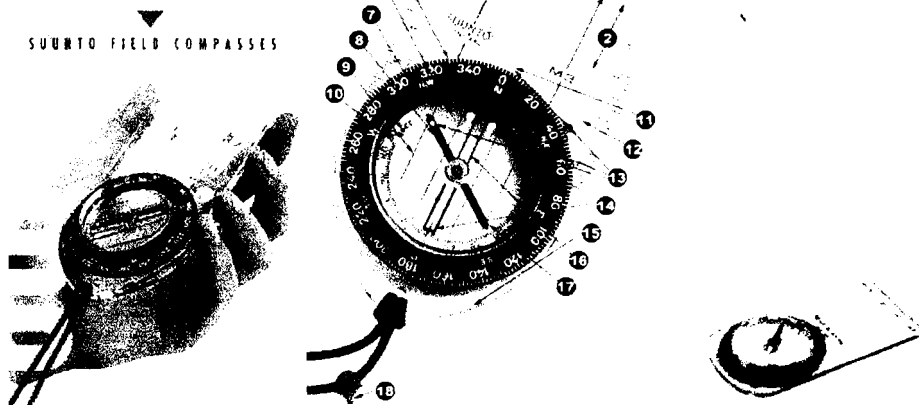


Fig. 1. 3 Busole (SUUNTO)

↳ anemometrelor, clinometrelor

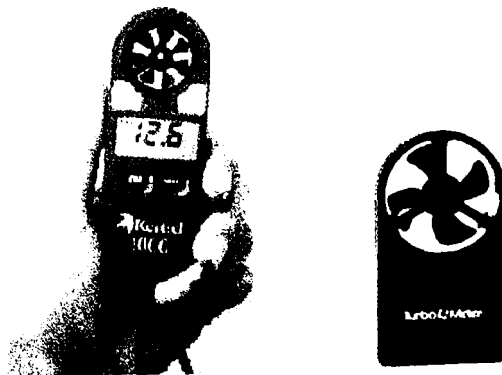


Fig. 1. 4 Anemometre

↳ giroscopelor

↳ tahometrelor mecanice și turometrelor de inducție

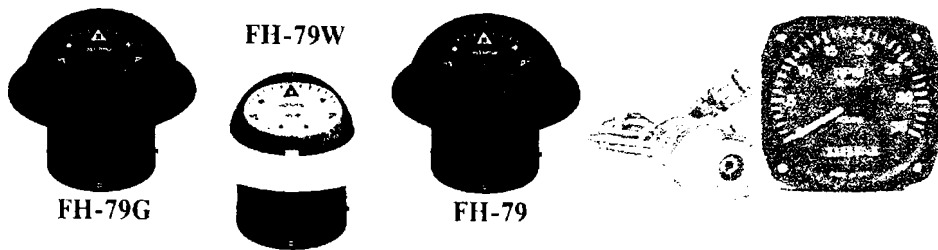


Fig. 1. 5 Turometre

↳ reometrelor

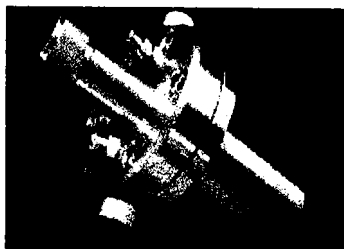


Fig. 1. 6 Vâscozimetru (BOHLIN)

1.2 Tipuri uzuale de lagăre cu cuzineți din pietre semiprețioase

Domeniul lagărelor de mecanică fină (al microlagărelor) se consideră prin convenție că aparține dimensiunilor nominale ale fusului sau / și cuzinetului cu diametrele $d < 5\text{mm}$.

Intensitatea sarcinilor preluate, ca și vitezele relative în zona de contact sunt relativ reduse în comparație cu cele din domeniul lagărelor specifice construcției de mașini.

Clasificarea generală a microlagărelor și câmpul de cercetare al prezentei lucrări este prezentată în figura 1.7.

Dependent de destinație, formele și dimensiunile componentelor lagărelor diferă în limite destul de largi.

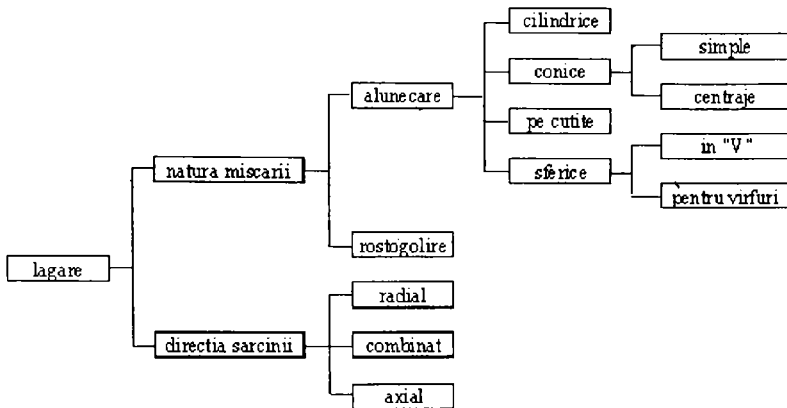


Fig. 1. 7 Clasificarea lagărelor² specifice în mecanică fină

Dimensiunea nominală a lagărului precum și destinația lor conduc la particularizări constructive ale fusului și cuzinetului.

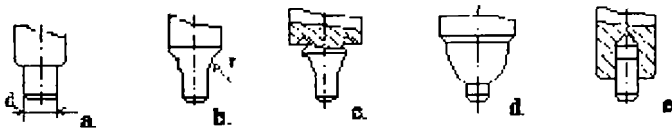


Fig. 1. 8 Forme constructive ale fusului

În general, fusurile lagărelor radiale cu $d > 1$ mm au forme perfect cilindrice cu posibilități de ungere la umărul lateral (fig. 1.8 a). Din considerente tehnologice și de rezistență fusurile cu $d < 1$ mm se racordează la arbore (respectiv ax) prin raze mari (fig. 1.8 b). La fusul "trompetă", degajarea terminală are rolul de a limita transferul de lubrifianț (datorat tensiunilor superficiale) de-a lungul arborelui (fig. 1.8 c). În regim ciclic de încărcare se folosește fusul parabolic (fig. 1.8 d) care are o rezistență de până la zece ori mai mare decât cel cilindric. Fusurile cu diametre foarte mici ($d = 0,15 \dots 0,5$ mm) sunt executate uneori din oțel tras precis și presat într-un alezaj coaxial practicat în arbore (fig. 1.8 e). [D1, D7]

În figura 1.9 sunt prezentate câteva din modalitățile de fixare a fusurilor (respectiv pivoților).

² au fost omise din această clasificare lagărele speciale (cu susținere magnetică, cu lichide, cu elemente elastice, etc)

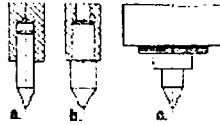


Fig. 1. 9 Modalități de fixare a fusului / pivotului (a-strângere, b-filet, c-lipire)

Formele constructive ale cuzinetului, figura 1.10, depind de dimensiunile și cerințele locului de utilizare fiind tipizate de producător, figura 1.11. Prelucrarea cavităților este superfină de tip oglindă, cu rugozitatea cuprinsă între $0,012 \dots 0,2 \mu\text{m}$ [G3].



Fig. 1. 10 Cuzinet din safir

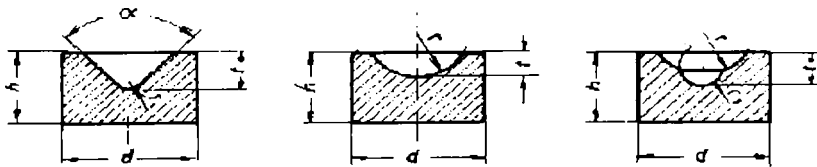


Fig. 1. 11 Forme uzuale de cuzinet

În figura 1.12 este prezentat un lagăr pentru vârfuri, unde prin r_1 s-a notat raza fusului, iar prin r_2 raza cuzinetului, iar prin "2a" diametrul suprafeței de contact. Forța de încărcare axială s-a marcat prin F , iar axa verticală prin OO' .

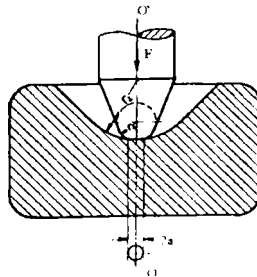


Fig. 1. 12 Reprezentarea unui lagăr pentru vârfuri

1.3 Montura cuzinetului din safir

Cuzineții din pietre semiprețioase se fixează, în general, nedemontabil prin sertizare sau prin chituire. La aparatele de înaltă precizie montura cuzinetului trebuie să permită o reglare axială pentru compensarea jocurilor la montaj.

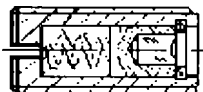


Fig. 1.13 Fixarea cuzinetului

În astfel de cazuri (a aparatelor de înaltă precizie) se poate asigura sprijinirea fusului printr-un cuzinet format dintr-o piatră cu alezaj (pentru ghidare) și o piatră de acoperire (pentru sprijin).

Între cele două pietre, între suprafața plană a pietrei de acoperire și cea bombată a pietrei cu alezaj se formează un unghi ascuțit care favorizează păstrarea uleiului în lagăre. Datorită degajării adânci pentru ulei și muchiilor rotunjite ale alezajului ce formează lagărul, se asigură suprafețe minime de contact între cep și piatră. Aceasta echivalează cu o reducere semnificativă a frecării. Vârful cepului (capătul) care se sprijină pe piatra de acoperire este rotunjit. Deoarece fusul are diametre foarte mici (0,08...3,8 mm) este necesar să fie luate măsuri în vederea mării rezistenței lui. Aceasta presupune folosirea unor materiale cu caracteristici mecanice ridicate, aplicarea tratamentului termic de călire și revenire și alegerea unei forme constructive optime.

În figura 1.14, 1.15 și 1.16 sunt exemplificate modalitățile uzuale de realizare a montajelor cu lagăre care au cuzineții din pietre semiprețioase.

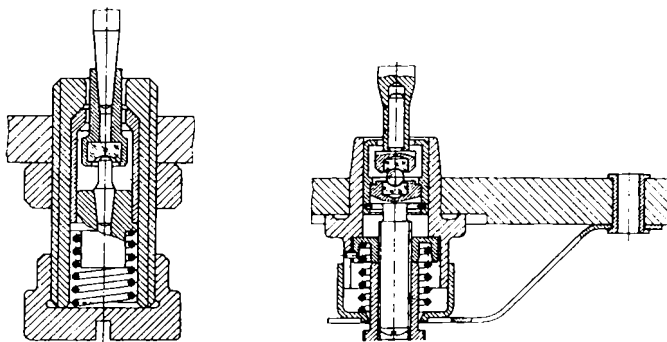


Fig. 1.14 Exemple de utilizare a cuzinetelor din piatră

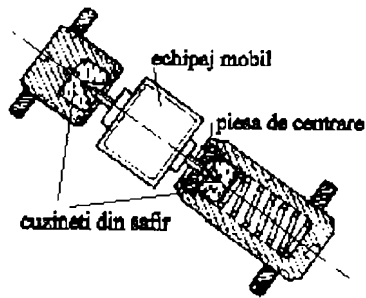


Fig. 1. 15 Exemplu de sprijinire a unui echipaj mobil al aparatelor

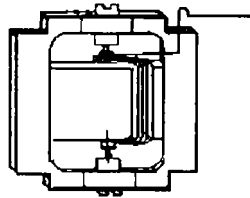


Fig. 1. 16 Sprijinirea unui sistem mobil

Dimensiunile și formele consacrate ale pietrelor de lagăr cu bușe pentru fusurile radiale și a plăcilor sau prismelor pentru pivoți sunt tipizate la nivel de producător.

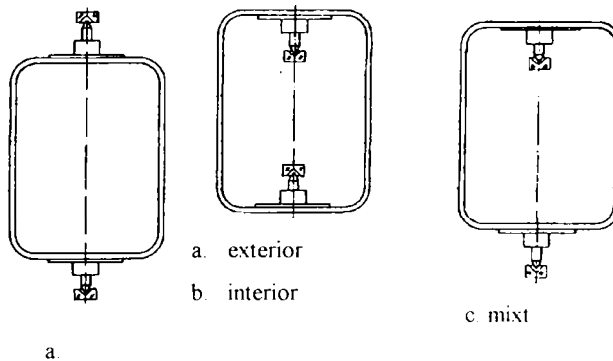


Fig. 1. 17 Poziționarea cuzineților din pietre semiprețioase

Poziționarea lagărelor pentru vârfuri în raport cu elementul central se poate realiza ca în figura 1.17 exterior (a), respectiv în interior (b) sau mixt (c) [B1]. O analiză de caz demonstrează că cel mai frecvent este întâlnit modul de centrare din exterior, chiar dacă prin utilizarea acestei variante nu se obține o eroare minimă a aparatului. Celelalte soluții sunt mai rar întrebuițate datorită complicațiilor constructiv tehnologice.

2. INFLUENȚA TEHNOLOGIILOR UZUALE DE CREȘTERE ȘI PRELUCRARE A SAFIRULUI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR FIZICO - MECANICE

2.1 Proprietăți ale safirului privind lagărele pentru mecanică fină

2.1.1 Constante fizice

Safirul și rubinul fiind cristale cu structura de tip corindon, fac parte din clasa ditrigonal-scalenoedrică, și au forma reprezentată în figura 2.1

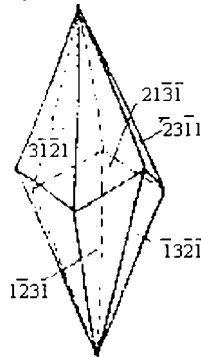


Fig.2 1 Structura scalenoedrică

Scalenoedrul ditrigonal aparține clasei cristalografice simbolizată $\bar{3}m[V1]$ și se caracterizează prin:

- o axă de rotație - inversie de ordinul 3 (reprezentată schematic în figura 2.2)
- trei axe de rotație de ordinul 2 (perpendiculare pe axa de rotație - inversie de ordinul 2)
- un centru de simetrie.

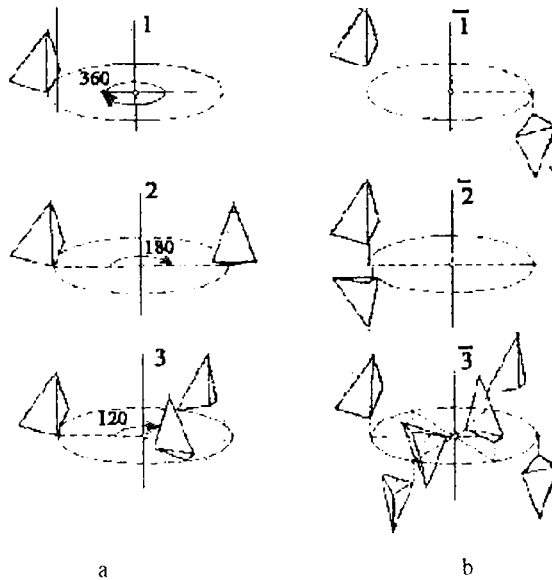


Fig. 2. 2 Axe de simetrie cristalografice, de rotație (a) și de rotație cu inversiune (b) și acțiunea acestora asupra unui tetraedru

Formula de simetrie a clasei este: $A_6^3 3A^2 3PC$ (A - axa, P - plan de simetrie, C - centru).

Parametrii de rețea ai safirului pentru celula unitate hexagonală, reprezentată în figura 2.3, sunt:

$$a=4,748\pm 0,004\text{Å} \quad c=12,957\pm 0,001\text{Å}$$

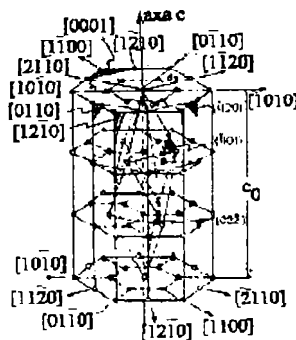


Fig 2. 3 Celula unitate hexagonală a safirului

Greutatea moleculară a safirului $\gamma_M = 101.94$, iar densitatea $\rho = 3986 \text{ Kg } \cdot \text{ m}^{-3}$

Temperatura de topire a safirului este aproximativ 2040°C, iar cea de fierbere aproximativ 3500°C.

2.1.2 Proprietăți fizice

Monocristalele de safir sunt cristale incolore, foarte dure. Amestecurile izomorfe $Al_2O_3-Cr_2O_3$ se formează pentru concentrații arbitrare de crom, sub forma unor complecși. Monocristalele de rubin au o culoare roz sau roșie, iar amestecurile izomorfe cu o concentrație mai mare de Cr_2O_3 formează cristale de culoare roz până la verde (Cr_2O_3 pur, are culoarea verde).

Cristalele care au un conținut mediu de Cr_2O_3 își modifică culoarea în funcție de lumina incidentă.

Constantele elastice (rigiditatea C_{ij} și maleabilitatea S_{ij}) ale safirului măsurate la 25°C, după direcțiile precizate sunt prezentate în tabelul 2.1 [A1]

Tabelul 2. 1

rigiditatea C_{ij} (10^{11} N/m ²)	maleabilitatea S_{ij} (10^{-12} m ² /N)
$C_{11}=4,968$	$S_{11}=2,353$
$C_{33}=4,981$	$S_{33}=2,170$
$C_{41}=1,474$	$S_{44}=6,940$
$C_{12}=1,636$	$S_{12}=-0,716$
$C_{13}=1,109$	$S_{13}=-0,364$
$C_{14}=0,235$	$S_{14}=0,489$

În tabelul 2.2 sunt prezentate diversele valori obținute de producători, pentru modulul de elasticitate E (Young).

Tabelul 2. 2

nr. crt.	Firma producătoare / sursa bibliografică	E [MPa]
1.	C. GieseKG Industrie - Edelsteine- Germany [7]	$(3,5 \dots 3,9) \cdot 10^5$
2.	C1	$(4,25 \dots 4,6) \cdot 10^5$
3.	D5	$3 \cdot 10^5$
4.	H1	$5 \cdot 10^5$
5.	L.T.D. Ceramics [5]	$3,71 \cdot 10^5$
6.	AEM [6]	$(3,45 \dots 3,82) \cdot 10^5$
7.	General Ruby - Sapphire [3]	$(5 \dots 5,5) \cdot 10^5$
8.	Industrial Jewels [1]	$(4,35 \dots 4,44) \cdot 10^5$
9.	Bird Precision - USA [4]	$4,4 \cdot 10^5$
10.	Swiss Jewel Company (SJC) [2]	$(3,5 \dots 3,8) \cdot 10^5$

În legătură cu valorile considerate pentru modulul de elasticitate, se constată o plajă largă ceea ce conduce la diverse valori pentru tensiunea de contact hertziană (valoare care stă la baza analizei fenomenelor de la nivelul microsuprafețelor în contact), care la rândul lor influențează toți parametri care se determină pentru a caracteriza frecarea (exemplu: momentul de frecare) [D6].

În figura 2.4 este prezentată variația momentului de frecare teoretic în raport cu diversele valori citate ca module de elasticitate. Valorile au fost calculate pentru raza fusului $r_1 = \{0.2, 0.3, 0.4, 0.5\}$ mm iar a cuzinetului $r_2 = 3.2$ mm, pentru o forță axială de încărcare $F = 0,5$ N, în ipoteza contactului teoretic hertzian punctiform (v. § 4).

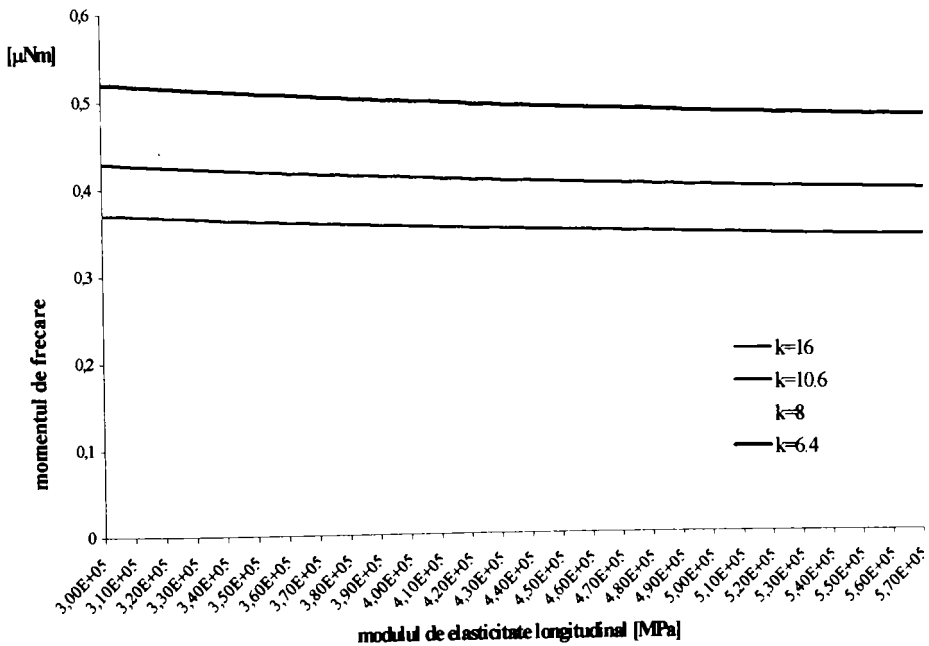


Fig. 2. 4 Variația momentului de frecare teoretic M_f funcție de modulul de elasticitate E

Se constată, din figura 2.4 importanța determinării unei valori concrete pentru modulul de elasticitate, fapt care nu se petrece în realitate.

Duritatea safirului pe scara Mohs este 9, iar pe scara Knoop este $2,1 \cdot 10^{10} \dots 2,4 \cdot 10^{10}$ N/m² [C1], respectiv în grade Knoop: 1900 (pe aceeași scară de durități mineralogice oțelurile dure se situează pe poziția 6 – 7).

O reprezentare sugestivă a scării durităților este redată în figura 2.5.

Microduritatea cristalelor de tip corindon ($\cdot 10^{10}$ N/m²), funcție de orientarea față de axa optică, respectiv de modul de creștere, este prezentată în tabelul 2.3.

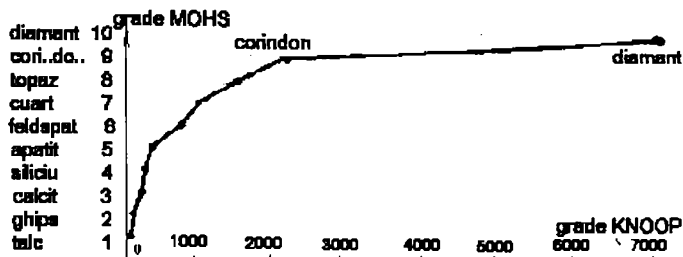


Fig. 2. 5 Scara durităților

Tabelul 2. 3

Material	orientare față de axa optică	înainte de tratament termic	după tratament termic
safir crescut din topitură	perpendicular	2,720	2,720
	paralel	2,350	2,150
safir crescut cu metoda Verneuil	perpendicular	2,280	2,370
	paralel	2,350	2,450
rubin crescut cu metoda Verneuil	perpendicular	2,750	2,750
	paralel	2,900	2,730

Rezistența la compresiune pentru încărcări atât paralele cât și perpendiculare pe axa c au valori cuprinse între $3\text{-}20 \cdot 10^2$ MPa.

Pentru valoarea coeficientului de dilatare termică liniară valorile sunt marcate în tabelul 2.4, funcție de firma producătoare:

Tabelul 2. 4

Firma producătoare	α – coeficient de dilatare termic [$\cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$]	
	\perp pe axa optică	cu axa optică
C. GieseKG Industrie - Edelsteine- Germany [7]	5.4	6.2
L.T.D. Ceramics [5]	7.7	7.7
AEM [6]	4.5	5.3
General Ruby - Sapphire [3]	5	6.7
[C1]	–	6.6
Industrial Jewels [1]	5.4	6.2
Swiss Jewel Company (SJC) [2]	8	8

Prin prelucrări mecanice se obțin suprafețe perfect lise. Frecarea uscată cu oțelul asigură un coeficient de frecare teoretic $\mu=0,14 \dots 0,15$. [3],[5], [6], [C1]

Safirul este complet inoxidabil, iar până la temperatura de 300°C rezistă la diverși acizi și lichide corozive. Din punct de vedere electric este un foarte bun izolator.

2.2 Tehnologii de obținere a cuzineților din safir

Obținerea lagărelor din safir comportă un proces tehnologic complex, detaliat în anexa (A1).

2.3 Defecte ale cristalelor. Defecte specifice safirului și rubinului

În figura 2.6 sunt prezentate global defectele uzuale, care influențează atât proprietățile fizice cât și pe cele optice.

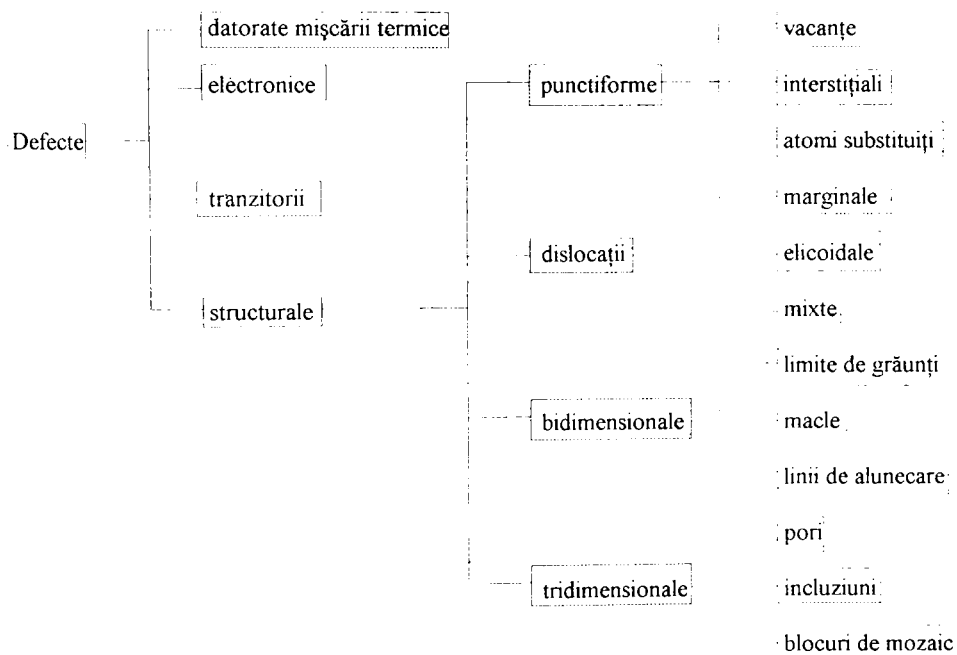


Fig.2. 6 Defecte uzuale ale cristalelor

1. defecte datorate mișcării termice

Particulele dintr-un cristal efectuează vibrații termice în jurul pozițiilor de echilibru (nodurile rețelei), perturbând permanent structura ideală a cristalului. Vibrațiile termice se propagă în cristal sub forma unor unde elastice.

2. defecte electronice

Electronii "liberi", golurile pot fi privite ca defecte, deoarece constituie elemente care perturbă starea perfectă a structurii cristaline, și interacționează cu ionii rețelei.

3. defecte tranzitorii

O radiație trecând printr-un cristal, are efecte temporare asupra structurii ideale, putând fi considerată ca un defect tranzitoriu.

4. defecte structurale

Cristalele prezintă abateri de la ordinea perfectă și datorită neregularităților ce apar în arhitectura lor intimă. Ele se clasifică în funcție de analogia lor cu noțiunile geometrice de punct, linie și suprafață.

2.4 Tensiuni interne în monocristalele sintetice de safir și rubin

Ca urmare a deformațiilor elastice imobile ale rețelei, cristalele conțin tensiuni interne. Ele se generează datorită:

- distribuției neregulate a temperaturii în timpul creșterii
- variației compoziției chimice a cristalului ce conduce la variații ale parametrului de rețea
- existenței diferitelor defecte de structură

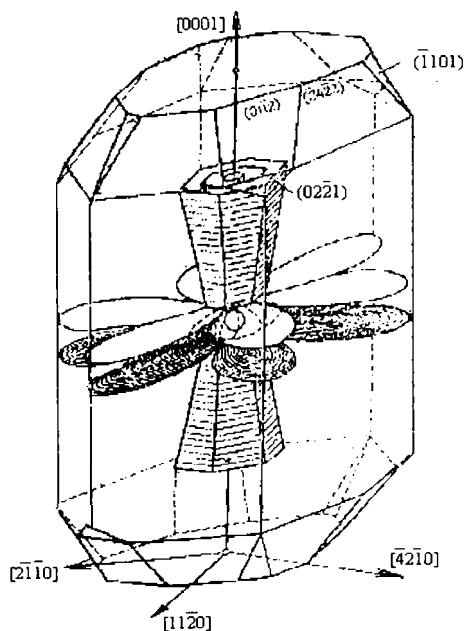


Fig. 2. 7 Dislocație spațială dintr-o sursă locală de tensiuni în cristalul de corindon (1600°C)

Tensiunile interne se manifestă prin efecte elastooptice. În cazul cuzineților din safir este importantă influența asupra constantelor fizice, care intervin în calculele pentru determinarea momentului de frecare.

În figura 2.7 este reprezentată configurația unei rozete de dislocație spațială, care apare dintr-o sursă locală de tensiuni în volumul unui cristal de corindon α - Al_2O_3 , la 1600°C. [V1]

Principalele cauze ale tensiunilor interne în monocristalele de safir și rubin sunt:

- defecte de structură
- existența frontierelor blocurilor de mozaic
- distribuția neomogenă în volumul cristalului a defectelor punctuale.

Mărimea tensiunilor interne este dependentă de densitatea și distribuția dislocațiilor (funcție de forma izotermei de răcire).

Înlăturarea tensiunilor interne se poate obține prin supunerea monocristalelor unui tratament termic.

Controlul prezenței (și înlăturării) tensiunilor interne se realizează cu metode optice.

Odată cu creșterea diametrului cristalului, cresc și tensiunile interne. Durata răcirii cristalelor la temperatura camerei influențează efectele tratamentului termic. Creșterea vitezei de răcire conduce la creșterea tensiunilor în cristal, ceea ce deteriorează simțitor calitatea acestuia.

Concluzii:

-metoda preponderent utilizată în vederea obținerii cuzineților este metoda Verneuil;

-defectele cristalului trebuie diminuate în așa o fel încât influențele (negative) pe care le au asupra proprietăților fizice să fie minime;

-monitorizarea continuă pe parcursul creșterii cristalelor poate conduce la diminuarea numărului de cristale cu defecte de creștere.

În tabelul 2.5 sunt prezentate principalele proprietăți fizice ale safirului:

Tabelul 2. 5

Mărime	Unitate de măsură	Valoare
Modul de elasticitate (Young), E	MPa	$(3.5 \dots 4.45) 10^5$
Coefficient de dilatare liniară, α	/°C	$(5,4 \dots 9) 10^{-6}$
Duritate Mohs		1900
Duritate Vickers, HV	MPa	2500 ... 5000
Densitate	kg/m ³	3960 ... 4000

3. ANALIZA PROCESELOR DE FRECARĂ SAFIR – OȚEL. CERCETAREA PIERDERILOR PRIN FRECARĂ ÎN LAGĂRELE PENTRU VÂRFURI

Din cercetarea bibliografică și din corespondența purtată prin e-mail cu CSEM¹⁾ S.A. Tribology & Coatings Service NEUCHATEL SWITZERLAND, prof. Ranga Kamandouri -tribologie- (SUA), respectiv din corespondența avută cu diverse firme producătoare de lagăre pentru vârfuri și parcurgerea unor articole din Bibliotecile Universităților din Londra, München, Augsburg, Würzburg, Stuttgart se remarcă două direcții de cercetare:

- a. frecarea și uzura dintre safir și oțel (1980 – 1996)
- b. pierderea prin frecare în lagărele pentru vârfuri. (1931 – 1970)

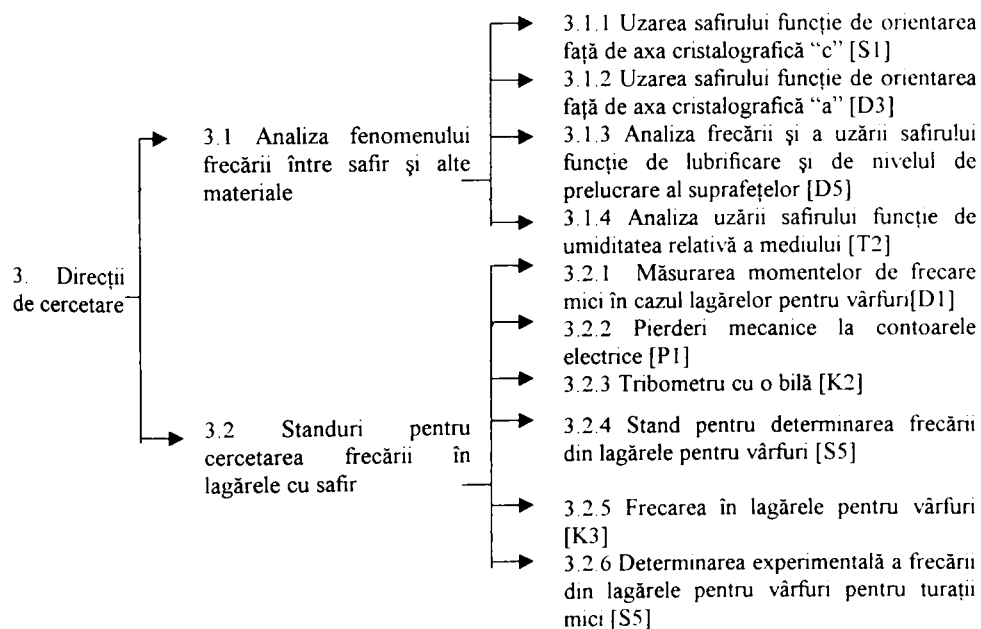


Fig. 3. 1 Cercetări reprezentative incluse în capitolul 3

Intrucât, cercetarea pierderilor prin frecare în lagărele pentru vârfuri, nu se poate efectua făcând abstracție de analiza frecării și uzurii dintre safir și oțel, în acest

¹⁾ Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique

capitol sunt menționate cercetările reprezentative, figura 3.1.

3.1 Analiza fenomenului frecării între safir și alte materiale

3.1.1 Uzarea safirului funcție de orientarea față de axa cristalografică "c"

[S1]

S-au constatat modificări ale proprietăților mecanice ale cristalului de safir în funcție de orientarea cristalografică [A2, S2], motiv pentru care s-au studiat câteva aspecte ale microstructurii fenomenului de frecare.

Safirul - epruvetă a fost produs de firma Linde Company. Orientarea cristalografică și evidențierea mecanismului de deformare plastică (prismatic, respectiv bazal) este prezentată în figura 3.2.

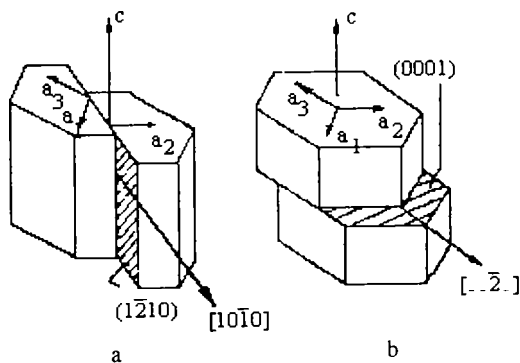


Fig. 3. 2 Deformarea funcție de orientarea cristalografică a-prismatic,b-bazal

Standul de investigare al uzurii este prezentat în figura 3.3.

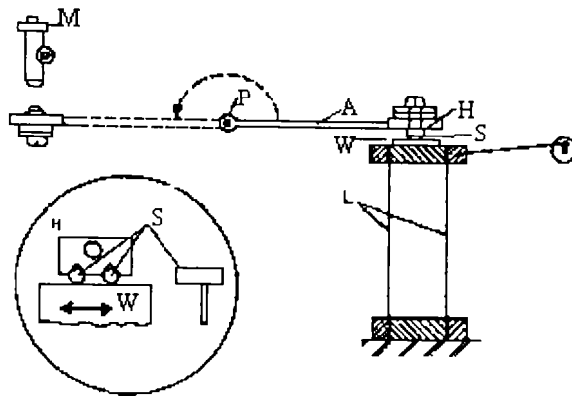


Fig. 3. 3 Stand pentru investigarea uzării

H-suportul safirului, A-pârghie, M-microscop, W-suportul safirului, S-safir [S1]

Suportul H al safirului S este montat în pârghia A, care pivotează în jurul punctului P. Safirul rămâne pe suportul W, care execută pe suportul L, o mișcare alternativă (de 6,25 mm, antrenat fiind de un motor electric). Sarcina axială este de 14,7 N, măsurată în punctul de contact dintre S și W. Experimentul s-a efectuat la temperatura mediului ambiant.

După un anumit număr de cicluri, brațul a fost rotit, astfel încât cu ajutorul microscopului M să se poată determina uzura (prin calculul volumului de safir îndepărtat prin uzură).

În urma acestui experiment a rezultat o corespondență liniară între numărul de cicluri de solicitare și volumul uzat de material. Experimentul a fost reluat pentru alunecarea prismatică a planelor (paralel cu axa c) iar apoi bazală (perpendicular pe axa c).

Concluzii:

1. rezistența safirului la uzură este strâns legată de orientarea cristalografică. Planul bazal este de departe foarte puțin rezistent la frecare.
2. Când direcția de frecare este perpendiculară pe axa c se remarcă o rezistență foarte mare la uzură manifestată la nivelul fețelor romboidale ale cristalului.
3. Când direcția de frecare este paralelă cu axa c se observă așchii și smulgeri de material la nivelul suprafeței de contact.

3.1.2 Uzura safirului funcție de orientarea față de axa cristalografică "a"

[D3]

Experimentul își propune analiza influenței orientării cristalografice a safirului asupra frecării și uzării unei epruvete sferice din safir care alunecă pe o suprafață din oțel. Standul pe care s-au efectuat încercări este prezentat schematic în figura 3.4.

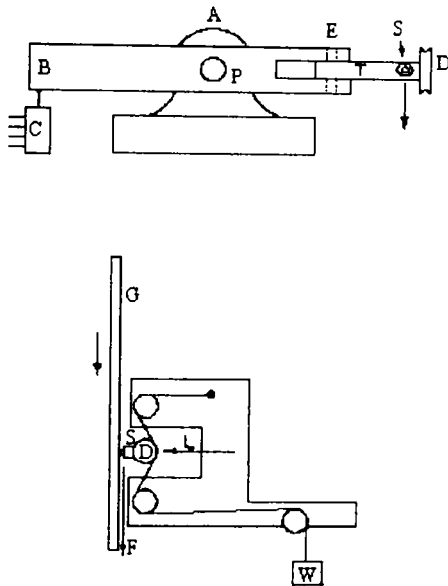


Fig. 3. 4 Stand pentru investigarea uzării [D3]

A-suport, B - pârghie, P - pivot, E - canal de orientare, T - braț, S - safir montat în piuliță suport, D - scripete, G - disc din oțel, C - traductor de forță, W- sistem de încărcare

Studiile de la care s-au pornit [C2], o epruvetă (safir) care alunecă pe o suprafață metalică cu o viteză de 8,83 mm/s au condus la concluzia că adeziunile rezultate în urma frecării precum și uzura sunt dependente de mediul înconjurător, iar pentru a studia modificarea stării suprafeței materialului mai dur este necesar ca experimentul să se efectueze pe o durată mai mare de timp. Cum din punct de vedere chimic, safirul nu este reactiv la temperatura camerei, analiza adeziunilor nu a fost concludentă.

Standul utilizat, figura 3.4 [D3] diferă de celelalte cu care s-au făcut investigații, deoarece măsurarea uzurii safirului se face după o perioadă de alunecare când este sesizabilă uzura acestuia. S-a constatat că uzura specifică a safirului și coeficientul de frecare oțel / safir este dependentă de orientarea axelor cristalografice.

Sfera de safir (produs de Linde Company) are diametrul de 4,75 mm și este fixată într-o piuliță-suport. Elementele componente ale standului sunt: A-suport, B -

pârghie, P - pivot, E - canal de orientare, T - braț, S - safir montat în piuliță suport, D - scripete, G - disc din oțel cu diametrul de 305mm , C - traductor de forță, W- sistem de încărcare.

Încercarea s-a efectuat la o turație a discului de 180 rot/min. Montura (piulița) care conține safirul execută o mișcare de translație în direcție radială.

În acest experiment, forța de încărcare este constantă de 6,37 N, iar viteza de alunecare este constantă.

Uzura safirului depinde într-un mod complex de proprietățile fizice și chimice ale lubrifiantului în interfața de alunecare. Oxidul de fier de pe suprafața de analizat este însuși un lubrifiant și din această cauză s-au obținut rezultate diferite în aceleași condiții de lucru, diferind doar stratul inițial de oxid de fier. Pentru înlăturarea acestui inconvenient s-a folosit lubrificarea cu apă.

Pentru obținerea unei uzuri sesizabile a safirului au fost necesare câteva ore. Apoi s-a reluat experimentul menținând aceeași orientare a cristalului dar ca lubrifiant a fost utilizat alcool isopropil, și s-a constatat o creștere a uzurii de 5,8 ori mai mare, față de lubrificarea cu apă.

După aceste etape ale experimentului s-a observat o arie plană pe safir. S-a sesizat de-asemenea că uzura specifică este proporțională cu încărcarea, independentă de aria de contact dintre suprafețe și viteza de alunecare, și dependentă de distanța parcursă.

Determinarea uzurii s-a efectuat prin măsurarea pe cale microscopică a suprafeței plane obținute în urma experimentului și calculând volumul de sferă îndepărtat (prin uzură). S-a investigat efectul direcției de alunecare asupra ratei de uzură. Pentru aceasta s-au făcut 20 - 30 de determinări pentru diferite direcții. Pentru fiecare determinare s-a făcut o singură măsurare, ceea ce conduce la o eroare aproximativă de 20 %.

Proprietățile anizotropice ale sferei de safir permit determinarea axei c . Montura pentru sfera din safir s-a făcut astfel încât să permită rotirea acesteia cu un unghi φ , figura 3.5, conducând astfel la modificarea orientării cristalografice (determinabilă prin investigații cu raze X).

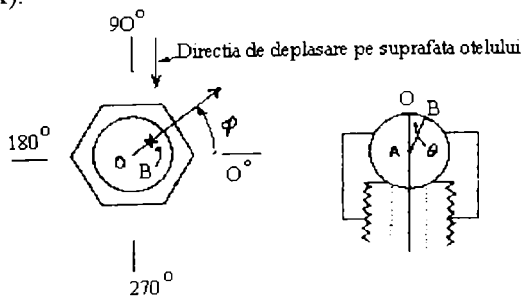


Fig. 3. 5 Montura pentru epruveta din safir

Unghiul θ este format de axa c și normala la interfața de alunecare. B - este punctul unde axa c este normală la planul tangent suprafeței de contact. Punctul B poate fi chiar polul axei c . Dacă B este proiectat pe planul de alunecare și O este punctul inițial de contact (pe sferă), atunci direcția OB (în sistemul de coordonate utilizat) determină direcția de alunecare (sub unghi φ). Această poziție este fixată prin utilizarea unui ac de indexare.

Pentru diferitele măsurări efectuate pentru diverse orientări ale axelor cristalografice, s-a determinat că uzura specifică variază exponențial în raport cu coeficientul de frecare, figura 3.6.

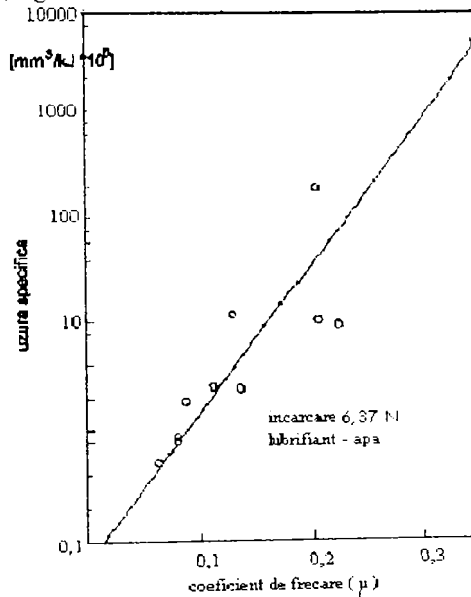


Fig. 3. 6 Variația uzurii specifice funcție de coeficientul de frecare

Relația dintre acestea se poate exprima:

$$V'' = A \cdot e^{k\mu}$$

$A=5,2 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{kJ}$ [D3], și $k=31,8$ determinat prin logaritmare. Variația uzurii specifice este mare (trei ordine de mărime) pentru valori ale coeficientului de frecare între 0,05 și 0,35 dar cele mai multe valori s-au obținut în jurul valorii $\mu=0,1$.

Pentru modificarea direcției de alunecare cu unghiul φ , s-a obținut variația din figura 3.7.

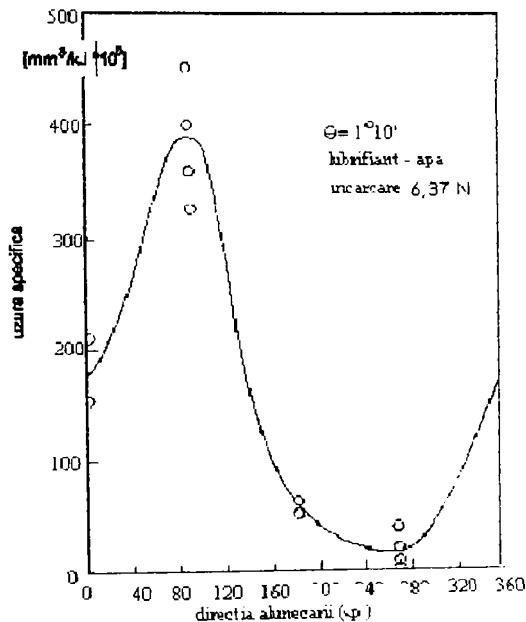


Fig. 3. 7 Variația uzurii specifice funcție de direcția de alunecare

Referitor la acest aspect al influenței orientării axei cristalografice în figura 3.8 sunt prezentate diagramele variației momentului de frecare funcție de orientare și numărul de rotații efectuate de pivot, obținute în urma experimentelor [S5].

Concluzie: Această fluctuație a uzurii specifice este dependentă cu precădere de direcția de alunecare și în mai mică măsură de valoarea unghiului θ și independentă de orientarea axei cristalografice a.

3.1.3 Analiza frecării și a uzurii safirului funcție de lubrificare și de nivelul de prelucrare al suprafețelor

[D5]

Decizia de utilizare a pieselor ceramice se poate lua doar în urma unei analize a stării suprafețelor.

Alegerea calității de prelucrare a suprafețelor ceramice este un compromis între uzura redusă și prețul de cost. Evaluarea și previziunea comportamentului tribologic al acestor materiale necesită o bună cunoaștere a mecanismului ce intervine la nivelul microgeometriei suprafețelor în contact.

Tensiunea de contact (punctiformă) poate ajunge în astfel de situații la 1500 MPa.

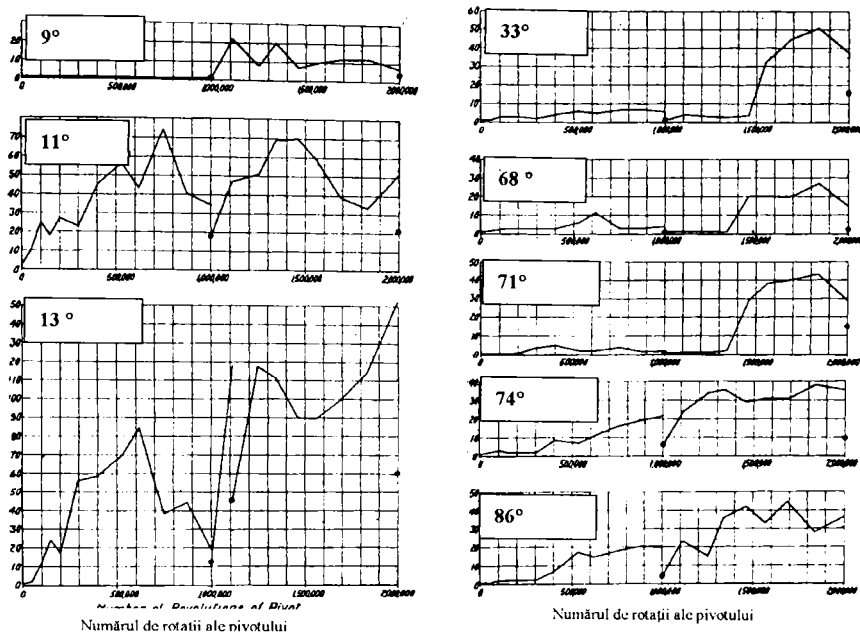


Fig. 3. 8 Variația momentului de frecare în raport numărul de revoluții, funcție de unghiul dintre direcția de alunecare și axa cristalografică “c” [S5]

Numeroase cercetări au încercat să modeleze suprafețele în contact. Unii autori au analizat influența distribuției (gauss-iene, stochastice, etc.) înălțimii asperităților sferice funcție de presiunea de contact între asperități și aria reală de contact, cu modele elastice, plastice sau elastoplastice [B2, A3, C3, L2, L3, N2, L2, M1]. Alți autori au efectuat calcule analitice pentru determinarea restricțiilor (la un contact alunecător) în utilizarea criteriilor de plasticitate Von Mises pentru evaluarea riscului de rupere sau de degradare mecanică a suprafețelor [B3, B4, H2].

Datorită dificultăților de aplicare a acestor modele în domeniul industrial ele se utilizează doar în condiții de laborator [S2]. Inconvenientul acestor modele este acela că ignoră modificările topografice ale suprafețelor. În cazul lubrificării la limită interacțiunea asperităților dintre materialele metalice produce inevitabil îndepărtare prin uzare (de material) și generează particule de material (resturi) [G1]. Uzura rezultată poate avea un efect benefic, spre exemplu în cazul rodajului, dar poate conduce în egală măsură la abraziune, fisurare sau exfoliere. [S4, K1, L1, W1].

Contactul dintre metal / material ceramic este mai puțin investigat, rezultatele obținute fiind particulare condițiilor de efectuare ale încercărilor.

Un exemplu este cel consacrat degradării în urma contactului hertzian punctiform [W2]. Standul experimental este reprezentat schematic în figura 3.9.

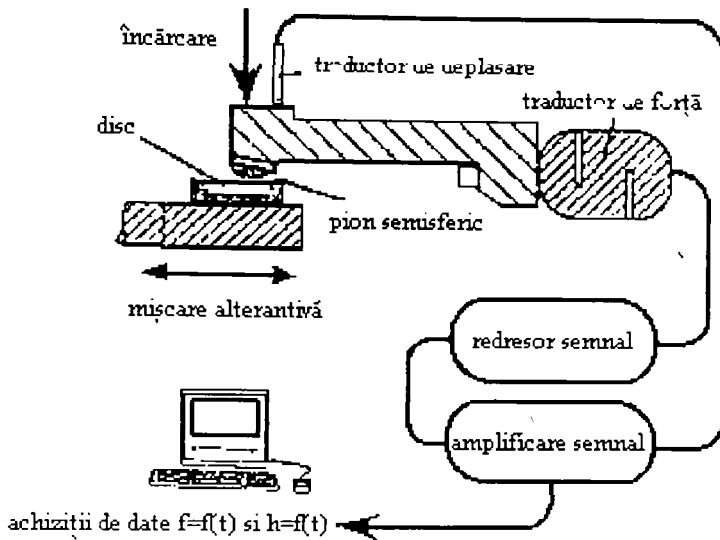


Fig. 3. 9 Tribometru cu mișcare alterantivă

Încercările au fost efectuate pe un tribometru cu mișcare alterantivă (figura 3.9) unde epruveta semisferică (raza de curbură de 12,5 mm) din oțel se află în contact cu o placă ceramică de grosime 5 mm. Condițiile de efectuare a încercărilor sunt: viteză relativă mai mică de 0,3 m/s, încărcare constantă de 200 N, pentru un timp de alunecare de la câteva secunde până la 11 ore. Un traductor de deplasare sesizează evoluția profunzimii uzurii pe toată durata încercării.

Volumele de uzură ale epruvetei din oțel sunt evaluate pornind de la valoarea h (profundime - înălțimea uzată a calotei sferice) pe toată durata încercării sau de la dimensiunea r (rază) de la început până la sfârșitul experimentului.

Expresia volumului unei calote sferice este:

$$V(h,r) = \frac{\pi}{6} h(h^2 + 3r^2) \quad (3.1)$$

Cu ajutorul unor relații geometrice, această expresie devine funcție de H sau de r :

$$V(r) = \frac{2\pi}{3} R^3 \left[1 - \frac{1}{2} \left(2 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.2)$$

$$V(h) = \frac{\pi}{3} h^3 \left(\frac{3R}{h} - 1 \right) \quad (3. 3)$$

unde $\left(\frac{2\pi}{3}\right)R^3$ reprezintă volumul unei semifere de rază R.

Deoarece h este mult mai mic decât R se admit simplificările:

$$V(r) = \frac{\pi \cdot r^4}{4R}, h \ll R, \rightarrow h = \frac{r^2}{2R} \quad (3. 4)$$

$$V(h) = \pi R h^2, h \ll R, \rightarrow r = \sqrt{2Rh} \quad (3. 5)$$

Prima relație (3.4), V în funcție de r, subestimează valoarea volumului de uzură, față de cea de-a doua (3.5), V funcție de h, care supraestimează această valoare. În cazul cel mai defavorabil, pentru o uzură mare a epruvetei (exemplu: h=0,5 mm corespunzător razei r=3,5 mm), creșterea față de valoarea exactă este 2,7 % pentru prima relație și de 1,35 % (mai mic) pentru cea de-a doua.

Volumul de uzură al materialului ceramic este neglijabil în raport cu cel al oțelului. În ceea ce privește uzura specifică a oțelului, aceasta se exprimă prin relații clasice care țin cont de încărcarea aplicată L și de distanța de alunecare d pe parcursul căreia se produce uzura efectivă:

$$U(m^3 / N \cdot m) = \frac{V}{L \cdot d} \quad (3. 6)$$

Configurația contactului este de tip emisferă / plan; tensiunea inițială de contact hertzian, (calculată statistic) este de ordinul 1600 MPa (pentru pata de contact cu diametru 0,48 mm) și scade (în cazul uzurii epruvetei din oțel până la 10 MPa pentru diametrul petei de contact de 4 mm).

Inercările au fost efectuate asupra materialelor ceramice termomecanice comerciale, Al₂O₃ - alumină de puritate ridicată 99,7 % și Al₂O₃ - 96 % cu flux de impurități cu conținut (în stare amorfă) de MgO și SiO₂. Acesta din urmă are caracteristici mecanice mai slabe (la temperaturi ridicate) decât alumina pură.

Epruveta din oțel utilizată este prelucrată cu Ra = 0,07±0,02μm, iar suprafețele ceramice sunt reprezentative gamei de rugozități întâlnite în diversele etape ale prelucrării: brut, rectificat și rodat tabelul 3.2. [D5]

Principalele proprietăți ale materialelor utilizate sunt trecute în tabelul 3.1:

Tabelul 3. 1

Proprietate	u.m.	96 Al ₂ O ₃	99,7 Al ₂ O ₃
Densitate, ρ	[Kg / m ³]	3800	3900
Mărime granule	[μm]	5 – 15	5 - 10
Modul de elasticitate, E	[GPa]	300	350
Duritate, H	[Vickers]	1500	1530
Conductivitate termică, λ	[W / m K]	20	25
Căldură specifică, c	[J / Kg K]	950	950

Tabelul 3. 2

Material	96 Al ₂ O ₃	99,7 Al ₂ O ₃
Brut	2±0,3	1,5±0,3
Rectificat	0,7±0,2	0,9±0,2
Rodat	0,11±0,05	0,08±0,03

Lubrifiantul utilizat este un ulei de motor preconizat pentru condiții severe de lubrificare la limită, cu conținut de aditivi

Inercarea s-a făcut cu ulei nou cu vâscozitatea cinematică (la 40°C) de 83,5 mm²/s și cu ulei folosit (uzat) cu vâscozitatea cinematică de 107,4 mm²/s.

În condițiile menționate, rezultatele experimentale ale frecării și uzurii au pus în evidență 2 tipuri de evoluție a coeficientului de frecare (μ) și a uzării (U) pe durata alunecării în trei cazuri de rugozitate ale suprafețelor: rugoase, rectificate și rodate. Rezultatele obținute s-au exprimat în tabelul 3.3.

Tabelul 3. 3

suprafața		Inițială		rugos		rectificat		rodât	
material	Ulei	μ	U	μ	U	μ	U	μ	U
		[-]	[·10 ⁻¹⁶ m ³ /Nm]	[-]	[·10 ⁻¹⁶ m ³ /Nm]	[-]	[·10 ⁻¹⁶ m ³ /Nm]	[-]	[·10 ⁻¹⁶ m ³ /Nm]
96 Al ₂ O ₃	Nou	0,12	200	0,03	270	0,08	0,026		
	Uzat	0,03	440	0,03	1240	0,08	0,028		
99,7Al ₂ O ₃	Nou	0,03	100	0,03	300	0,07	0,017		
	Uzat	0,03	200	0,03	1600	0,06	0,022		

Variația acestor parametri este redată în figura 3.10.

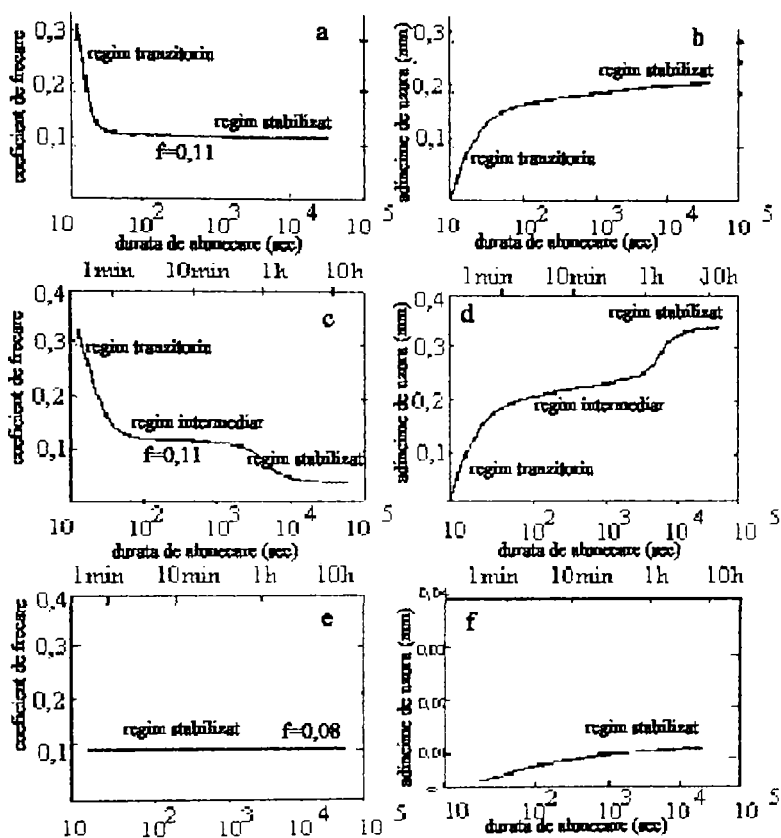


Fig. 3. 10 Variația coeficientului de frecare funcție de durata de alunecare

Primul tip de evoluție al coeficientului de frecare staționar de ordinul $f=0,11$ este precedat de un regim staționar foarte scurt, de câteva secunde (poate chiar câteva minute), care apoi descrește rapid, figura 3.10a. Curba corespunzătoare uzurii oțelului arată că eliminarea de material se face în timpul regimului tranzitoriu și continuă moderat în timpul primului regim stabil, figura 3.10 b. Această variație este specifică materialelor ceramice.

În diagrama 3.10c evoluția prezintă un timp de acomodare destul de mare (între 20 min și chiar mai mult de 10 ore) în care coeficientul de frecare scade la început rapid (regimul tranzitoriu), apoi într-un ritm mai lent (regimul intermediar), urmat de o stabilizare a acestuia la o valoare scăzută de ordinul 0,03. Evoluția uzurii specifice arată aceleași trei regimuri, figura 3.10.d. Durata (în ore) a regimului intermediar (până la stabilizarea valorii coeficientului de frecare) este mai mare pentru suprafețele cu rugozitate mare decât pentru cele rectificate, valori înregistrate în tabelul 3.4.

Material	ulei	rugos	rectificat
96 Al ₂ O ₃	Nou	>> 10 ^(*)	1,4
	Uzat	11	0,3
99,7 Al ₂ O ₃	Nou	5,5	1,3
	uzat	4,5	0,35

(*) valoare estimată.

Starea rectificată a suprafețelor conduce la valori stabile ale coeficientului de frecare, pe durata încercării, indiferent de tipul lubrifiantului utilizat, figura 3.10 e.

Curbele reprezentative pentru uzura specifică (figura 3.11) oțelului pentru rugozitate inițială arată un rezultat inexplicabil: uzura specifică a oțelului față de starea rectificată a aluminei este de 3 ori mai mare decât cea calculată față de starea brută a altor materiale ceramice studiate comparativ.

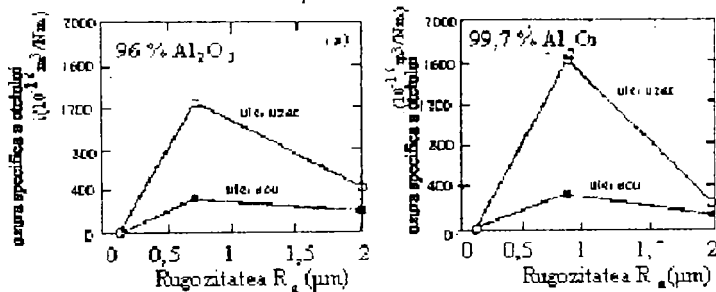


Fig. 3. 11 Rata uzurii funcție de rugozitatea suprafețelor

Este evident că nivelul de prelucrare a suprafeței (geometric și mecanic) are un rol important. Astfel, starea rectificată a suprafeței aluminei, prezintă colțuri fragile datorate microfisurilor din etapa de fabricație, și conduc la coeficienți de frecare și uzuri specifice de valori ridicate în perioada tranzitorie de scurtă durată. Starea de rugozitate ridicată a suprafeței, caracterizată prin asperități rotunjite, nefragile, conduc la perioade tranzitorii mult mai mari în ceea ce privește uzura specifică, dar cu un volum mai mic de uzură (în comparație cu cel pentru suprafețe rectificate).

Epruvetele pentru aceste încercări au fost elaborate de Societatea de ceramică tehnică -Bazet.

Concluzie: În urma studiului comportamentul aluminei în condiții similare de frecare de alunecare, pentru două tipuri de lubrifiant și trei nivele de rugozitate, în comparație cu alte materiale ceramice, respectiv uzura unei epruvete din oțel în aceste condiții de frecare. Astfel, a rezultat că pentru alumina nu este necesară o prelucrare de rectificare a suprafeței deoarece crește coeficientul de frecare în perioada tranzitorie, și conduce la uzare rapidă a oțelului.

3.1.4 Analiza uzării safirului funcție de umiditatea relativă a mediului

[T2]

Când sunt aduse în contact două suprafețe, una metalică și una ceramică, are loc un transfer de metal pe suprafața ceramică. Acest efect este influențat și de condițiile de mediu.

Experimentul s-a efectuat utilizând o epruvetă (pinion) din safir (diametru 6 mm) care alunecă pe suprafețe de diverse materiale (cupru, nichel, titan și aluminiu) în condițiile de mediu prezentate în tabelul 3.5.

Tabelul 3. 5

Condiții	Sistem	
	Al ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / metal
încărcare [N]	30 – 50	5
viteză de alunecare [mm / s]	2	5
distanța de alunecare [m]	2 – 4	2
umiditate relativă ($\pm 2\%$)	20 - 50 - 90	20 - 50 - 90
temperatura [°C]	19 \pm 2	19 \pm 2

Uzura suprafețelor a fost investigată prin scanare cu microscopie electronică (SEM), analiză electronică a microprobelor (EMA) și cu profilometru [T3, T1].

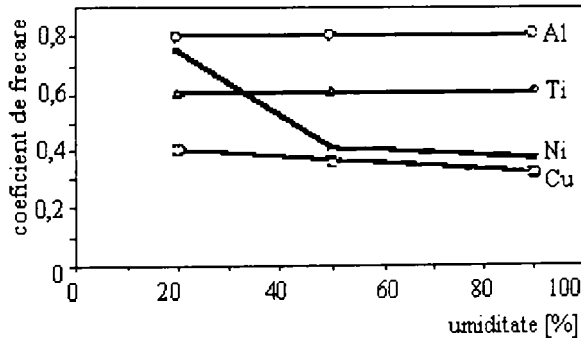


Fig. 3. 12 Variația coeficientului de frecare funcție de umiditatea relativă a mediului

Figura 3.12 arată variația coeficientului de frecare (μ) pentru diverse niveluri ale umidității relative (RHL) și diferite materiale pe care alunecă epruveta din Al₂O₃.

Rezultatele arată că la o umiditate relativă de 20% $\mu_{(Ni)}$ este mai mare decât $\mu_{(Ti)}$ deoarece titanul este mult mai activ din punct de vedere chimic decât nichelul. Pentru sistemele Ti / Al₂O₃ și Al / Al₂O₃ coeficientul de frecare nu este afectat de umiditatea relativă. Coeficientul de frecare pentru titan ($\mu_{Ti} \approx 0,6$) și pentru aluminiu

($\mu_{Al} \approx 0,8$) este constant. În plus s-a constatat o creștere a transferului de metal pe suprafața ceramică.

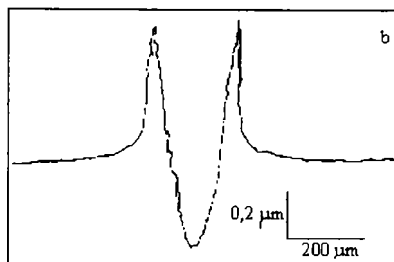
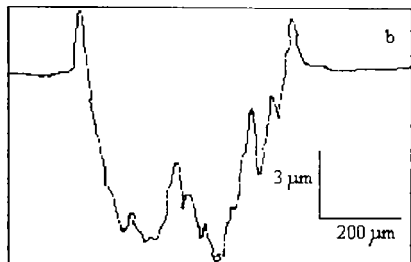
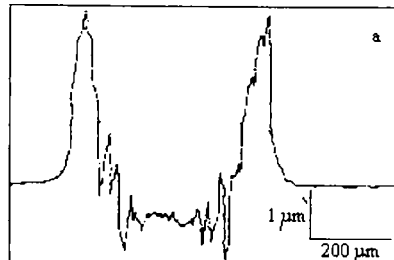
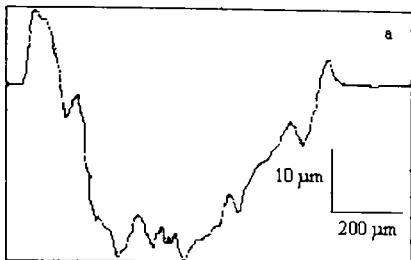


Fig. 3. 13 Profilul uzurii adezive

Fig. 3. 14 Profilul uzurii adezive

a-Al / Al₂O₃, b-Ti / Al₂O₃, umiditate 20%

a-Ni / Al₂O₃, umiditate 20%, b- Ni / Al₂O₃ umiditate 90%

În figura 3.13 este prezentat profilul uzurii adezive în cazul frecării de alunecare pentru Al / Al₂O₃ (a) și pentru Ti / Al₂O₃ (b), pentru o încărcare de 5 N, o viteză de alunecare de 5mm / s iar distanța de alunecare a fost de 2m. Experimentul s-a efectuat pentru o umiditate relativă inferioară valorii de 20 %.

În figura 3.14 este prezentat profilul uzurii adezive în cazul frecării de alunecare pentru Ni / Al₂O₃ în condițiile unei umidități relative de 20%(a) și pentru 90%(b), a unei încărcări de 5 N, o viteză de alunecare de 5mm / s iar distanța de alunecare a fost de 2m.

Figura 3.15 arată evoluția tipică a coeficientului de frecare pentru Ni / Al₂O₃ pentru suprafață îmbogățită cu ioni de bor.

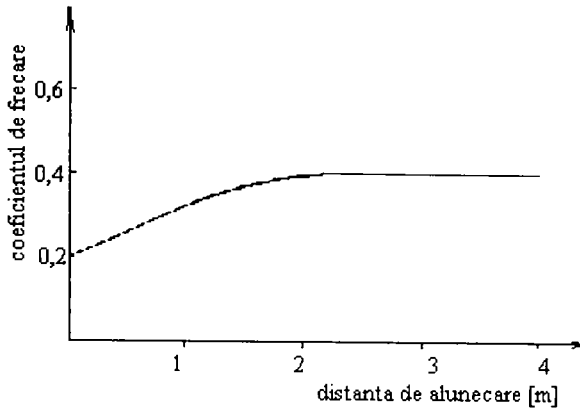


Fig. 3. 15 Variația coeficientului de frecare Ni / Al₂O₃ pe o suprafață îmbogățită cu ioni de bor

Concluzii: S-a studiat fenomenul frecării și al uzurii pentru frecarea de alunecare menținându-se constanți parametri mecanici (sarcină, viteză, distanță), în condițiile modificării stării de umiditate relativă a mediului. Astfel s-a constatat:

1. Aluminiul și titanul aderă puternic la suprafața ceramică, iar coeficientul de frecare pentru sistemele Ti / Al₂O₃ și Al / Al₂O₃ nu este afectat de umiditatea relativă.
2. Coeficientul de frecare și uzura sunt afectate de nivelul umidității relative în cazul Ni / Al₂O₃ și Cu / Al₂O₃. Valorile uzurii adezive scade cu creșterea nivelului de umiditate.
3. Prin îmbogățirea suprafeței de alunecare cu elemente corespunzătoare (spre exemplu suprafața de Ni îmbunătățită cu ioni de bor), datorită reacțiilor chimice se constată o importantă reducere a frecării și implicit a uzurii.

Observație: toate cercetările menționate analizează fenomenele complexe la nivelul suprafețelor în contact, în condiții de încărcare și viteză mai mari decât în cazul real de funcționare al lagărelor pentru vârfuri. Cu toate acestea concluziile sunt importante și se impun în vederea unei analize complexe a lagărelor pentru vârfuri.

3.2 Standuri pentru cercetarea frecării în lagărele cu safir

Analiza pierderilor prin frecare în lagărele pentru vârfuri a făcut obiectul multor cercetări. Standurile cu ajutorul cărora s-au făcut măsurători prezintă atât avantaje cât și dezavantaje. În cele ce urmează sunt prezentate cele mai reprezentative soluții în domeniu.

3.2.1 Măsurarea momentelor de frecare mici, în cazul lagărelor pentru vârfuri

Metoda detaliată în teza de doctorat de către prof. Tr. Demian, urmărește determinarea cât mai exactă a pierderilor prin frecare realizată prin: stabilirea mărimii momentului de frecare.[D1]

Frecarea foarte mică din lagăr necesită ca metoda de măsurare să fie “fără contact” astfel încât să nu modifice rezultatele prin introducerea unor erori.

Principiul metodei constă în antrenarea sistemului mobil (sprijinit pe lagăre pentru vârfuri) până la o turație convenabilă, după care e lăsat liber să revină în poziția de repaus. Baza teoretică o concretizează ecuația mișcării de rotație a unui rigid în jurul unei axe fixe:

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = I \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_r \quad (3.7)$$

unde: M_m este moment motor;

M_r - moment rezistent care cuprinde frecarea din lagăre, frecarea în aer a sistemului mobil precum și momentul creat de curenții remanenți din dispozitivul de antrenare a sistemului mobil;

I – momentul de inerție al masei sistemului mobil;

ω - viteza unghiulară.

Momentul rezistent M_r din (3.7) se poate determina dacă M_m și $I \frac{d\omega}{dt}$ sunt cunoscute.

Dacă momentul este constant, se obține (3.8)

$$M_r = M_m - I \frac{d\omega}{dt} = M_m - I \cdot \varepsilon \quad (3.8)$$

După atingerea turației maxime, sistemul se decuplează ($M_m = 0$) și rezultă:

$$M_r = -I \cdot \varepsilon \quad (3.9)$$

iar:

$$M_r = M + M_a + M_b \quad (3.10)$$

unde: M este momentul de frecare din lagăr;

M_a - momentul rezistent care apare în urma frecării sistemului mobil cu aerul (se poate elimina prin efectuarea măsurătorilor în vid);

M_b - momentul rezistent provocat de curenții turbionari;

Determinarea prin calcul a momentului de inerție al masei I al sistemului mobil întâmpină uneori dificultăți cauzate de forma geometrică.

Practic, momentul de inerție masic se determină pe principiul oscilatorului armonic, în baza ecuației diferențiale:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{k}{I} \cdot \varphi = 0 \quad (3. 11)$$

Dacă se utilizează un subansamblu cu moment de inerție al masei I_0 cunoscut și se măsoară perioada de oscilație T_0 corespunzătoare se obține:

$$I = \frac{T^2}{T_0^2} \cdot I_0 \quad (3. 12)$$

Măsurarea accelerației unghiulare $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ este dificilă, deoarece momentul de frecare din sprijinirile pentru vârfuri este mic. În cadrul metodei se determină funcția:

$$\omega = \omega(t) \quad (3. 13)$$

după care prin derivare grafică se determină

$$\varepsilon = \varepsilon(t) \quad (3. 14)$$

Practic, se stabilesc valori medii ale accelerației unghiulare

$$\varepsilon = \frac{k_\omega}{k_t} \cdot t g \beta \quad (3. 15)$$

unde k_ω și k_t sunt coeficienții de scară pentru viteza unghiulară respectiv pentru timp.

Deoarece metoda stroboscopică și fotografică de înregistrare a funcției (3.14) depășesc domeniul de turații utilizat la lagărele pentru vârfuri ($n < 200$ rot/min), se utilizează următorul principiu. Pe discul sistemului se practică un orificiu. În timpul acționării sistemului mobil, la trecerea orificiului prin dreptul unui traductor se modifică inductanța acestuia. Impulsul electric este transmis la un aparat de înregistrare prin sistemul de măsură adoptat.

Standul de încercare realizat are în componența sa un arbore din oțel de secțiune constantă pe care se montează un disc din aluminiu (sau cupru) care materializează implicit încărcarea lagărelor. În extremitățile arborelui se montează două bușe, în care au fost în prealabil fixate prin sertizare bile din oțel, care reprezintă fusurile vârf. Arborele, discul, bușele și bilele alcătuiesc părțile componente ale sistemului mobil care se sprijină pe două lagăre cu cuzineți din piatră sintetică.

Antrenarea sistemului mobil s-a realizat ca la contorul electric de inducție pentru curent alternativ. Avantajul acestei antrenări este că nu are nici o înfășurare pe sistemul mobil și părțile străbătute de curentul electric nu se află în mișcare. Se evită astfel utilizarea colectorului, a periiilor și formarea de scânteii în colector.

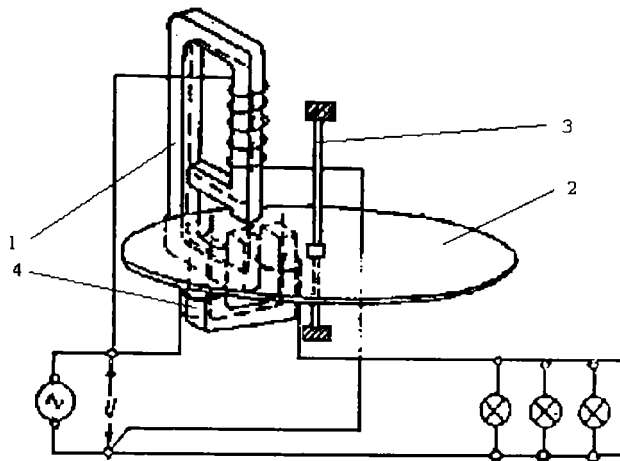


Fig. 3. 16 Stand pentru determinarea momentului de frecare

1-electromagnet I, 2-disc din aluminiu sau cupru, 3-arbore, 4-electromagnet II

Rotorul sistemului este discul de aluminiu sau cupru 2, montat pe arborele 3, care se rotește între polii unui electromagnet 1, a cărui înfășurare este legată în paralel pe circuitul de alimentare de la rețea. (figura 3.16)

Asupra discului mai acționează și fluxul magnetic al unui alt electromagnet 4, a cărui înfășurare este legată în serie cu circuitul. Rezultă astfel, că fiecare punct al discului, aflat între polii electromagneților cu înfășurare în paralel sau în serie este atras de un cuplu și respins de celălalt.

Pentru a efectua măsurătorile la diferite valori ale încărcării lagărelor s-a prevăzut posibilitatea variației greutății sistemului mobil prin utilizarea unor discuri din materiale diferite (aluminiu sau cupru), pline sau găurite.

3.2.2 Pierderi mecanice la contoare electrice

Pentru determinarea pierderilor mecanice la contoarele electrice, printr-un procedeu propus de prof. D.Perju, prof. M.Crudu ș.a., s-a utilizat metoda disipării energiei cinetice. Considerând discul ca un solid cu axă fixă, prin antrenarea acestuia până la o anumită valoare a vitezei unghiulare, acesta va avea o energie cinetică datorită căreia discul va continua să se rotească și după dispariția momentului de antrenare (motor). [P1]

Această energie cinetică se disipă treptat prin frecările din lagăre, cu aerul și în angrenajele transmisiei mecanice al e mecanismului totalizator. Viteza unghiulară scade treptat până la oprirea discului. Deoarece momentul de inerție redus la axa discului este constant, accelerația unghiulară devine o măsură a momentului global de frecare. Considerând că legea de variație a momentului de frecare total (în aceleași condiții de funcționare) este reproductibilă, atunci timpul de oprire al discului lansat de la aceeași viteză unghiulară este de asemenea o măsură globală a momentului de frecare total.

Pentru determinarea legii de variație a momentului de frecare total redus la axul discului în funcție de viteza unghiulară, se ridică întâi diagrama de variație a vitezei unghiulare în funcție de timp. Prin derivarea acesteia în raport cu timpul se obține diagrama de variație a accelerației unghiulare $\varepsilon(t)$. Prin multiplicarea ordonatelor acestei diagrame cu factorul constant I , rezultă diagrama de variație a momentului de frecare total în funcție de timp.

Modul de determinare a pierderilor este asemănător celui descris la §3.2.1 [D1] Standul cu ajutorul căruia s-au efectuat măsurătorile este prezentat schematic în figura 3.16.

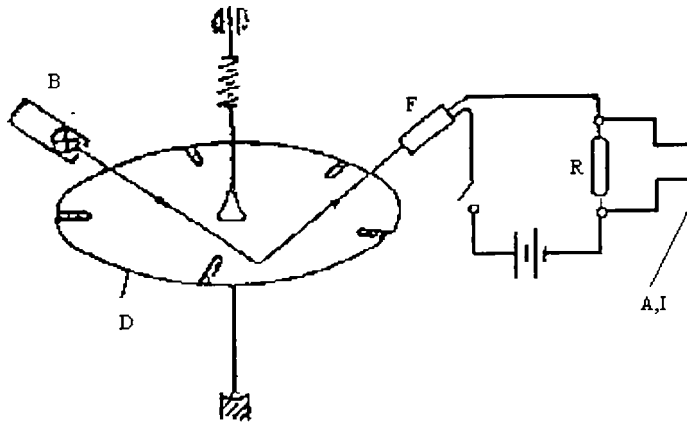


Fig. 3. 17 Stand pentru determinarea pierderilor mecanice la contoarele electrice

A-amplificator electronic, B-bec, D-disc, F-fotodioda, R-rezistența, I-înregistrator

Derivarea se poate face grafic.

Prin eliminarea timpului rezultă diagrama momentului de frecare în funcție de viteza unghiulară a discului.

Determinarea valorilor vitezei unghiulare în diferite momente se poate face prin înregistrarea unor impulsuri generate pe cale optoelectronică cu ajutorul unor repere de pe disc. Ca traductor pentru impulsuri s-a utilizat un bec și o fotodiodă, discul fiind marcat cu 5 repere de culoare neagră. (figura 3.17).

Lumina incidentă de la becul B este reflectată de discul D în direcția fotodiodei

F. Variația căderii de tensiune pe rezistența de sarcină R cauzată de variația curentului din circuitul fotodiodei (ca urmare a trecerii porțiunilor albe și negre ale discului prin locul de incidență a fascicolului de lumină) este adusă la un nivel convenabil prin intermediul amplificatorului electronic A. Semnalele sunt înregistrate pe bandă termosensibilă la înregistratorul I.

Pe baza principiului disipării energiei cinetice se propun două variante de stand pentru determinarea momentului de frecare redus funcție de metoda de determinare a vitezei unghiulare de lansare:

- prin metoda stroboscopică
- prin metoda numărării unui tren de impulsuri

O altă metodă de determinare a momentului de frecare redus este acela de utilizare a unui traductor dinamometric elastic.

Standul este propus pentru încercarea și verificarea mecanismelor totalizatoare ale contoarelor electrice și determinarea momentului redus al frecărilor mecanice bazat pe deformațiile elastice ale unui arc spiral.

Antrenarea mecanismului totalizator se face, ca și în cazul real, prin intermediul melcului montat pe axa contorului fără disc. Discul este suprimat pentru a elimina frecările cu aerul și a oscilațiilor torsionale ale sistemului mobil datorate angrenării intermitente care se manifestă la transmiterea mișcării de la melc la roata dințată.

Cu ajutorul acestui stand este dificilă determinarea mărimii pierderilor prin frecare în lagăre și prezintă dezavantajul particularizării analizei.

3.2.3 Tribometru cu o singură bilă

Figura 3.18 prezintă o vedere schematică a unui tribometru, propus de Kragelski, cu o singură bilă. Cu ajutorul acestui stand se pot efectua încercări care pot conduce la o concluzie în ceea ce privește comportamentul lagărelor pentru vârfuri, cu ipoteza ca pentru pivot să se utilizeze o bilă din oțel, iar pentru cuzinet o placă din safir. La rezultatele obținute se aduc corecțiile necesare ținându-se cont de raza de curbură a cuzinetului. Principiul de funcționare este următorul: bila (de contact) 16 și plăcile plan paralele 5 și 17 sunt folosite ca epruvete pentru încercări. Bila de contact este montată într-o mandrină cilindrică 15 care are un canal inelar. În acest canal este introdus un cablu 13, care este legat cu un arc lamelar 12 fixat pe platforma ce se poate deplasa pe ghidajele 8. Un cablu 9 este fixat de platformă. Acesta leagă platforma cu arborele 10 al reductorului 11. Rotindu-se arborele reductorului mișcă platforma împreună cu elementul elastic (arc lamelar). Arcul se tensionează și cablul rotește mandrina cu bila de contact. [K2]

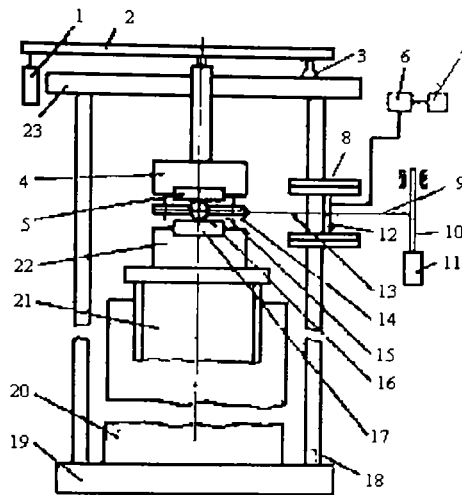


Fig. 3. 18 Tribometru cu o singură bilă

1-greutate, 2-sistem de încărcare, 3-pârghie, 4- suportul epruvetei superioare , 5-placă plan paralelă, 6-amplificator, 7-înregistrator, 8-ghidaje, 9-cablu fixat de platformă 10-arbore, 11-reductor, 12-arc lamelar, 13-cablu, 14-limitatoare, 15-mandrina cilindrică, 16-bila de contact, 17-placă plan paralelă, 18-coloane (4), 19-placă, 20,21-suport, 22-suportul epruvetei inferioare, 23-cilindru

Momentul rezistent este proporțional cu deformația arcului. Timbrele tensometrice care sunt conectate la instrumentul de înregistrare 7 printr-un amplificator sunt lipite pe arc în montaj de semipunte cu două traductoare active.

Mișcarea de rotația poate apare când se exercită o forță de apăsare pe bilă. In acest scop plăcile împreună cu bila de contact sunt așezate pe un suport 20 între două plăci 19 și 23, dintre care una formează baza tribometrului. Plăcile sunt legate prin patru coloane 18. Pe suportul 20, este așezat suportul epruvetei inferioare 22 (în formă de cilindru plin) care este montat în cilindrul 23. Acesta se poate deplasa (pe filet) vertical.

Pe placa superioară este montat al doilea suport de epruvetă, care se poate deplasa ghidat vertical.

O astfel de concepție de unitate permite desfășurarea experimentelor cu plăci de diverse grosimi și bile de diferite diametre. O sarcină normală dată de un dispozitiv de încărcare cu pârghie 1 -3, montat pe placa superioară 23, acționează asupra tijei suportului epruvetei superioare printr-o cuplă sferică. Centrarea bilei de contact față de cupla sferică se face prin limitatoarele 14.

Ajustând poziția suportului epruvetei inferioare, este necesar să se găsească poziția suportului superior pentru care pârghia de încărcare devine orizontală. Dispozitivul poate fi amplasat într-o cameră cu mediu controlat.

Dispozitivele de încărcare și cel de înregistrare a forței se calibrează înainte de desfășurarea încercărilor.

Intre bilă și plăcile plan paralele 5 și 17 se realizează un contact teoretic punctiform. Prin admiterea unor ipoteze simplificatoare, se poate analiza fenomenul în cazul frecării în lagărele pentru vârfuri.

3.2.4 Stand pentru determinarea frecării din lagărele pentru vârfuri

[S5]

Principiul metodei utilizate de către Stott constă în transformarea momentului de frecare dintre fus și cuzinet în moment motor acționarea sistemului mobil (cu moment de inerție cunoscut). Cunoscând accelerația imprimată sistemului mobil, și momentul de inerție al acestuia se poate determina momentul de frecare. Discul este amplasat conform figurii 3.19.

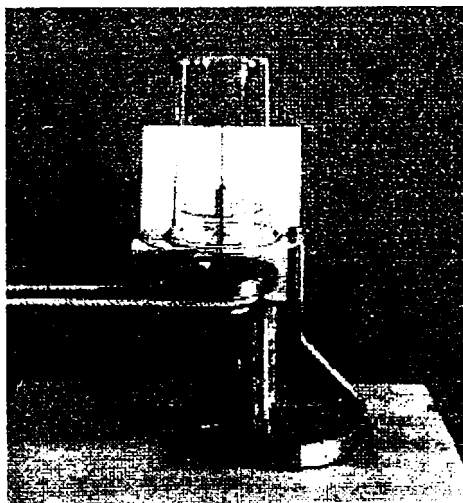


Fig. 3. 19 Stand pentru determinarea frecării din lagărele pentru vârfuri

Discurile, din sistemul mobil, folosite ca epruvete au avut practicate (fiecare) câte o gaură circulară centrală, iar pe circumferință linii de marcaj ca în figura 3.20. Pentru a sesiza mișcarea discului, acestea au fost realizate într-un câmp de toleranțe restrâns, pentru o bună reproductibilitate a datelor măsurate. S-a acordat totodată o atenție deosebită centrării orificiului și grosimii discurilor. Cuzinetul din safir este montat într-o piesă cilindrică metalică (cu posibilitatea reglării poziției) filetată, care la rândul ei se află într-un tub metalic care trece prin orificiul central al discului.

Cuzinetul din safir s-a montat într-un locaș practicat în piesa metalică. Examinarea acestuia (a safirului) se poate efectua prin transmiterea de raze luminoase, din partea inferioară a unui microscop fără a extrage cuzinetul din locașul său. Ansamblul safir - montură - tub suport, au fost executate din materiale foarte ușoare și transparente pentru a permite trecerea razelor luminoase la investigarea cu microscopul, dar în același timp să aibe moment de inerție mic în comparație cu cel al discului. După cum rezultă din figura 3.19 pivotul s-a montat într-un ax vertical. Sub acțiunea propriei greutate suprafața cavității sferice a safirului este mereu în contactul dintre pivot și cuzinet, și sprijină în acest fel discul în poziție orizontală.

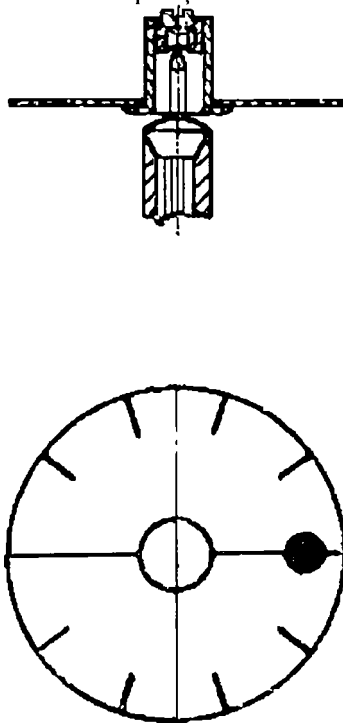


Fig. 3. 20 Detaliu asupra sprijinirii discului

În cazul experimentului prezentat autorul a utilizat sistemul de antrenare al unui gramofon. Modul de lăgăruire al axului s-a făcut în așa fel încât acesta a asigurat o mișcare uniformă, fără vibrații sau perturbații. Pentru eliminarea influenței aerului echipajul mobil s-a montat sub un clopot de sticlă. În vederea sesizării rotirii discului s-au marcat repere atât pe clopot cât și pe placa din spatele aparatului.

Pentru a măsura momentul de frecare dintre pivot și cuzinet, se poziționează discul astfel încât indicatorul de pe disc să se afle în dreptul celor două linii verticale. Semnalul este prelevat pe banda de hârtie (care se deplasează cu 14 mm / sec) a unui

cronograf.

Înregistrarea începe simultan cu pornirea motorului. După câteva minute, motorul este oprit dar mișcarea discului rămâne sub observație până la oprirea acestuia. Din înregistrările de pe banda de hârtie se trasează dependențele: spațiu - timp, respectiv viteză - timp, figura 3.21. Aceasta din urmă este alcătuită din două drepte care se intersectează.

Panta primei drepte este dată de accelerația discului iar panta celei de-a doua de frânarea sa. Valorile obținute de autor pentru momentul de frecare sunt prezentate în tabelul 3.6

Tabelul 3. 6

înregistrare ^{*)}	moment de inerție [g mm ²]	Accelerația [rad/sec ²]	moment de frecare [μNm]	moment frecare mediu [μNm]
83 a	2464	0.038	0.93	0.95
83 f	2464	0.040	0.99	
84 a	2464	0.034	0.84	
84 f	2464	0.041	1.02	

Când se cere o acuratețe ridicată se recomandă reprezentarea grafică efectivă a dependențelor spațiu - timp respectiv viteză - timp, iar acolo unde precizia determinării nu este strict riguroasă, accelerația se poate determina din timpul corespunzător primei rotații, și accelerația de frânare din timpul corespunzător ultimei rotații. Ambele perioade pot fi citite direct de pe înregistrare.

În figura 3.22 sunt prezentate diagramele momentului de frecare dintre pivot și cuzinetul din safir în funcție de numărul de rotații al pivotului. În figura 3.23 se evidențiază imaginea suprafeței cuzinetului din safir după un milion de rotații (fig.3.23 a-uscat, b-lubrificat), respectiv imaginea pivotului după un milion de rotații figura 3.25 (a-uscat, b-lubrificat).

^{*)} a – accelerație, f - frânare

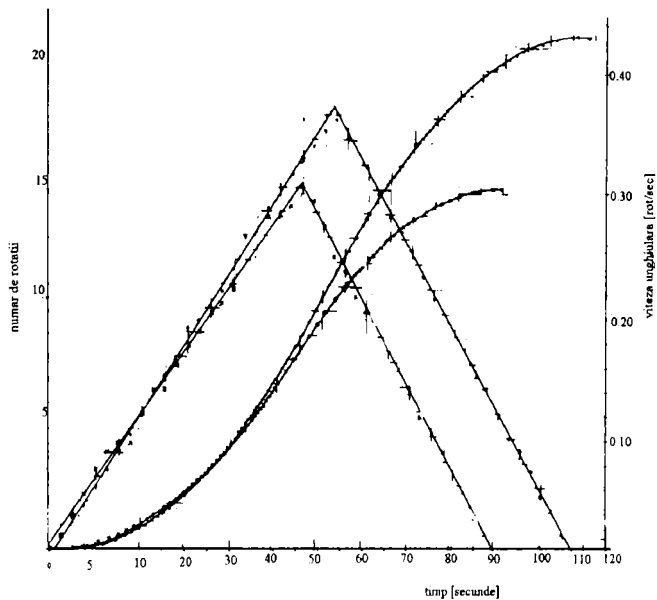


Fig. 3. 21 Variația vitezei unghiulare, respectiv a numărului de rotații funcție de timp (experimental)

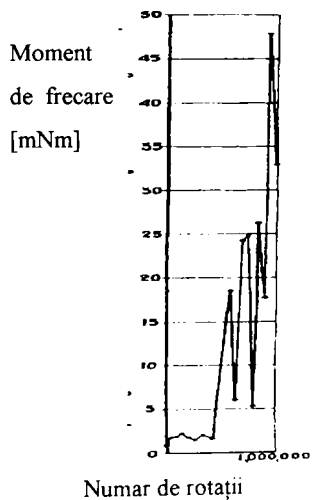
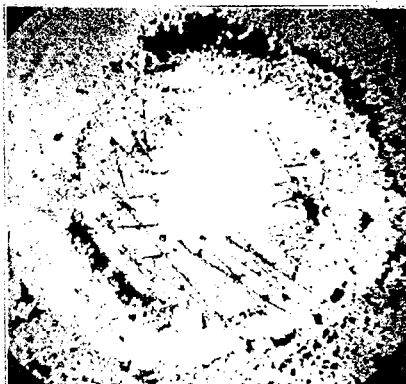
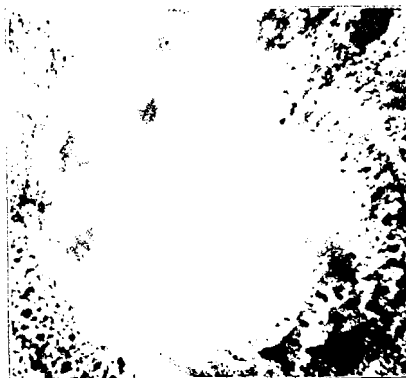


Fig. 3. 22 [S5] Variația momentului de frecare funcție de numărul de rotații ale pivotului, pentru o încărcare axială de 0,2 N, (lagăr neuns)



a- lagăr neuns



b- lagăr lubrificat

Fig. 3. 23 Imaginea suprafeței cuzinetului după un milion de rotații ale pivotului, (x 175)



a-lagăr neuns



b- lagăr lubrificat

Fig. 3. 24 Imaginea suprafeței pivotului după un milion de rotații (x 200)

3.2.5 Frecarea în lagărele pentru vârful

[K3]

Standul propus de Kolzner pentru efectuarea experimentelor în vederea determinării momentelor de frecare este prezentat în figura 3.25, unde: a - ax vertical, b - motor, c - lagăr pentru vârful, d - dispozitiv de fixare al lagărului pentru vârful, reglat în așa fel încât încât discul - f - să se poată roti. Pe lagăr se sprijină un fus de ax - e - . Axul vertical "a" și lagărul "c" sunt puse în mișcarea de rotație de către motorul "b" (Ferrari).

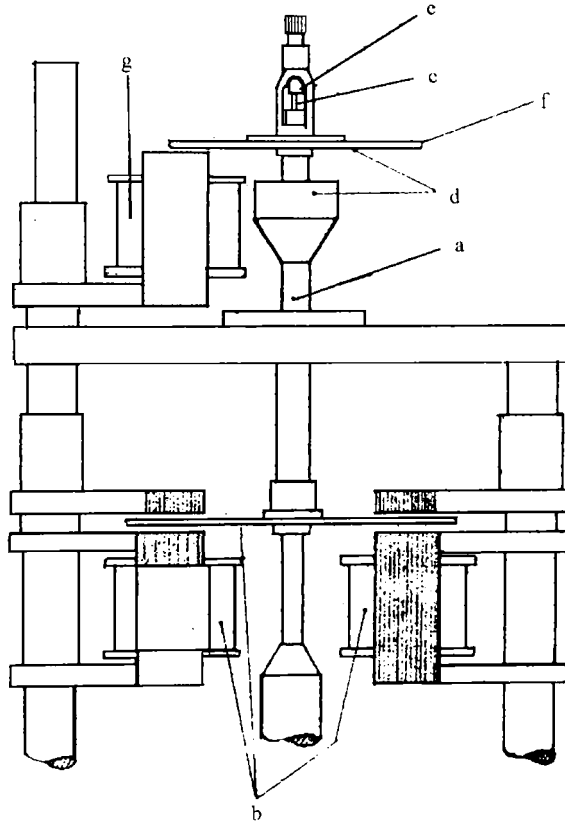


Fig. 3.25 Stand pentru determinarea frecării în lagărele pentru vârful , cu motor Ferrari
a-ax vertical, b-motor, c-lagăr pentru vârful, d-dispozitiv de fixare al lagărului pentru vârful, e-vârful
axului, f-disc, g-bobina

Discul "f" din aluminiu, se rotește într-un câmp magnetic datorită sistemului de

bobine "b", care constituie un motor homopolar. Rolul bobinei "g" este de a frâna discul. Intensitatea curentului din bobină va fi astfel reglată încât discul să se oprească. Momentul de frecare din lagăr este egal cu momentul motor, care la rândul său este proporțional cu intensitatea curentului, relația 3.16

$$M_m = M_f; \quad M_f = c \cdot I^2 \quad (3.16)$$

unde - c este o constantă determinată experimental, dependentă de interacțiunea celor două câmpuri: cel creat de curentul prin cele două bobine respectiv din câmpul magnetic creat de curenții turbionari induși în disc, precum și de datele geometrice și constantele electrice ale discului f.

Prin acceptarea convenabilă a curentului $I = \text{constant}$ s-a urmărit ca în perioada desfășurării experimentului să se mențină o turație constantă de 120 ± 2 rot / min.

3.2.6 Determinarea experimentală a momentului de frecare pentru turații mici

[F2]

Standul propus de Fischer urmărește determinarea influențelor asupra momentului de frecare care conduc la creșterea acestuia.

Pornind de la ipotezele simplificatoare ale contactului hertzian punctiform, s-a stabilit o relație pentru momentul de frecare de pivotare (alunecare nulă), detaliată în capitolul 4. Experimentul analizează momentele de frecare la trecerea din starea de repaus în starea de mișcare cu viteze foarte mici. Standul din figura 3.26 se compune din:

- a- arc lamelar
- b- fir care susține potcoava i
- k- fir susținut de pârghia m.

Datorită greutății l, benzile (firele) b și k sunt perfect întinse chiar și la eventualele variații de lungime ale pârghiei m. Elementul mobil i, sub formă de potcoavă este sprijinit de lagărele pentru vârfuri f (superior și inferior) respectiv de pârghia e.

c- greutate pentru echilibrare, astfel încât centrul de greutate al discului să se situeze pe axa b, k, f;

g- disc din aluminiu, antrenat în mișcarea de rotație de câmpul produs de sistemul de bobine j.

Firele (benzile) de torsiune se rotesc în urma acțiunii momentului motor până la echilibrarea acestuia de către momentul rezistent creat în câmpul forțelor elastice. Pe scala h, se citește deviația față de poziția inițială. Inițial între discul g și potcoava i nu este o mișcare relativă. Dacă discul este antrenat în mișcarea de rotație, se constată mișcarea relativă între reperatele g și i. Valoarea citită pe scală (unghiul de rotație) este o măsură a momentului de frecare de pivotare, între acestea fiind o dependență liniară.

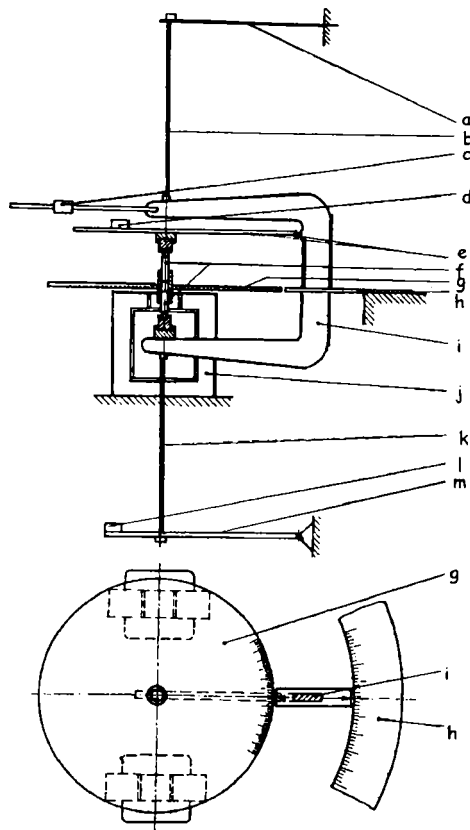


Fig. 3. 26 Stand pentru determinarea momentului defrecare pentru turajii mici

a-arc lamelar, b,k-fire de susținere, c-greutate pentru echilibrare, d,l-contragreutate, e-pârghie, f-vârfuri, g-disc din aluminiu, h-scala, i-potcoavă, j-bobină, m-pârghie

Momentul de frecare astfel determinat reprezintă efectul cumulat al celor două lagăre (inferior respectiv superior).

O altă variantă propusă de același autor [F2], cea prin care determină momentul de frecare pentru un singur lagăr, și anume al celui inferior, figura 3.27. Principiul de măsurare nu a fost modificat.

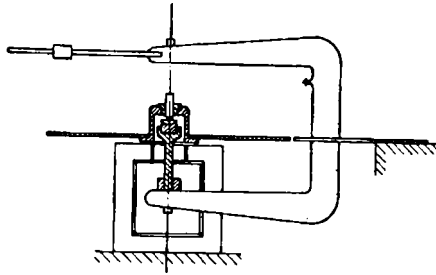


Fig. 3. 27 Stand pentru determinarea momentului de frecare pentru turații mici la sprijinirea pe un singur lagăr

Incercările s-au efectuat în situația unei tensiuni de contact maxime de 3000 MPa.

Ipotezele simplificatoare care au stat la baza experimentului au fost:

- diametrul suprafeței de contact mult mai mic decât raza pivotului, $2a \ll r_1$, respectiv $r_1 > 0,01$ mm);
- cuzinetul și pivotul sunt omogene, izotrope, iar deformațiile în punctele de contact sunt pur elastice;
- zonele active ale cuzinetului și fusului se află în contact forțat.

Concluzii

• Adoptarea soluției cuzinetului din safir a fost rezultatul a multor cercetări experimentale. Etapele parcurse au fost:

- pivot și cuzinet din oțel [W3, F3]
- pivot și cuzinet din safir [G2].

Experimentele efectuate nu au condus la concluzii care să justifice alegerea unei din variantele menționate.

Cuzinetul din safir și pivotul din oțel (sau aliaje ale acestuia) este soluția unanim acceptată, fiind varianta cea mai frecvent utilizată în domeniile menționate (cap.1)

• Rezistența safirului la uzură este strâns legată de orientarea cristalografică. Planul bazal este de departe foarte puțin rezistent la frecare.

Când direcția de frecare este perpendiculară pe axa c se remarcă o rezistență foarte mare la uzură manifestat la nivelul fețelor romboidale ale cristalului.

Când direcția de frecare este paralelă cu axa c se constată desprinderi de așchii de material la nivelul suprafeței de contact.

• Studiind comportamentul aluminei (safirului) în condiții de frecare de alunecare, pentru două tipuri de lubrifianți și trei grade de rugozitate, în comparație cu alte

materiale ceramice, a rezultat că pentru alumină nu este necesară o prelucrare de rectificare a suprafeței deoarece crește coeficientul de frecare în perioada tranzitorie.

- Analiza fenomenului frecării și al uzării pentru frecarea de alunecare menținându-se constanți parametri mecanici (sarcină, viteză, distanță), în condițiile modificării stării de umiditate relativă a mediului a condus la rezultatele:

- Aluminiul și titanul aderă puternic la suprafața ceramică, iar coeficientul de frecare pentru sistemele Ti / Al₂O₃ și Al / Al₂O₃ nu este afectat de umiditatea relativă.

- Coeficientul de frecare și uzura sunt afectate de nivelul umidității relative în cazul Ni / Al₂O₃ și Cu / Al₂O₃. Valorile uzurii adezive scade cu creșterea nivelului de umiditate.

- Instalațiile prezentate, în marea lor majoritate sunt specializate și permit stăpânirea cu un grad de precizie corespunzător determinarea parametrilor funcționali. În general însă, prezintă dezavantaje prin faptul că nu oferă posibilitatea modificării facile a parametrilor geometrici ai zonelor de contact pivot-cuzinet, a vitezelor relative și mai ales a modificării tensiunilor de contact.

4. BAZELE TEORETICE ALE CALCULULUI LAGĂRELOR PENTRU VÂRFURI

4.1 Considerații teoretice privitoare la contactul hertzian punctiform

Pentru studiul fenomenului frecării la lagărele pentru vârfuri se analizează comportamentul contactului teoretic punctiform [P2] ca fiind cel mai reprezentativ domeniului.

Sub sarcină, corpurile se deformează elasto-plastic, luând naștere suprafețe de contact a căror dimensiuni la contactul punctiform sunt mici în raport cu dimensiunile corpurilor în contact. Astfel de contacte încadrează în categoria celor cunoscute sub denumirea de contacte hertziene. Generic, se spune contact teoretic punctiform, independent dacă corpurile se află sub acțiunea sarcinii sau în absența acesteia, în mediu lubrificat sau nelubrificat.

Determinarea tensiunilor maxime de contact σ_{Hmax} , se face pe baza următoarelor ipoteze simplificatoare:

- corpurile sunt fixe, omogene, izotrope, iar deformațiile în punctele de contact sunt pur elastice;
- sarcina are intensitatea constantă și este dirijată după normala la suprafața de contact;
- contactul între suprafețe este direct, neexistând între ele peliculă de lubrifiant.

În realitate, cu toate că suprafețele au o mișcare relativă și ca urmare apar forțe de frecare, chiar și în cazul suprafețelor unse, relațiile lui Hertz conduc la rezultate satisfăcătoare [D1].

Se consideră, două corpuri cu suprafețe curbe având constante elastice diferite, aflate în contact într-un punct nesingular al suprafețelor lor, conform figurii 4.1.

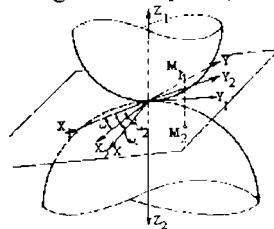


Fig. 4. 1 Corpuri cu suprafețe curbe în contact

În punctul de contact cele două corpuri au un plan tangent comun și evident o

normală comună. Corpurile se raportează la câte un sistem de axe cartezian $Ox_1y_1z_1$ și $Ox_2y_2z_2$ cu originea în punctul inițial de contact, cu axele z_1 și z_2 dirijate după normalele interioare și cu axele x_1y_1 și x_2y_2 alese arbitrar în planul tangent comun. În raport cu aceste două sisteme de coordonate, suprafețele limitrofe ale corpurilor au ecuații de forma:

$$\begin{cases} z_1 = f_1(x_1, y_1) \\ z_2 = f_2(x_2, y_2) \end{cases} \quad (4.1)$$

Dezvoltând aceste funcții în serie Mac-Laurin și neglijând termenii de grad mai mare ca doi, se obțin ecuațiile suprafețelor în vecinătatea punctului O.

Distanța dintre două puncte M_1 și M_2 , de pe suprafețele în contact, care se află pe aceeași normală la planul tangent comun este dată de suma ordonatelor z_1 și z_2 .

$$\begin{cases} z_1 = \frac{1}{2}k_{11}x_1^2 + \frac{1}{2}k_{12}y_1^2 \\ z_2 = \frac{1}{2}k_{21}x_2^2 + \frac{1}{2}k_{22}y_2^2 \end{cases} \quad (4.2)$$

unde k_{11} și k_{12} sunt curburile principale ale primului corp în punctul de contact, iar k_{21} și k_{22} ale celui de-al doilea corp, figura 4.2.

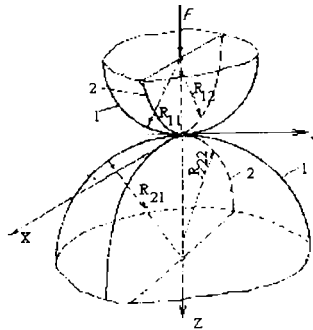


Fig. 4. 2 Curburile corpurilor aflate în contact

Aceste ecuații au o formă simplificată dacă axele x_1y_1 și x_2y_2 se aleg astfel încât să coincidă cu intersecțiile dintre planul tangent comun și planele principale de curbură ale celor două suprafețe, duse în punctul O. Derivatele parțiale se înlocuiesc cu coeficienții k_{ij} , relațiile (4.1) devenind (4.2).

În cazul general al poziției relative a corpurilor, planele lor principale de curbură și deci axele x_1, y_1 și x_2, y_2 nu coincid, între ele există un unghi ω . Din acest motiv, ecuațiile suprafețelor se raportează la axe unice x și y , conținute în planul tangent, axa x formând cu axele x_1 și x_2 unghiurile ω_1 respectiv ω_2 . Ținând seama de

transformarea de coordonate la rotirea sistemelor de axe în planul tangent, se alege poziția axelor x și y astfel încât să fie îndeplinită condiția:

$$(k_{11} - k_{12}) \sin 2\omega_1 + (k_{21} - k_{22}) \sin 2\omega_2 = 0 \quad (4.3)$$

După efectuarea calculelor de simplificare se obține:

$$z_1 + z_2 = Ax^2 + By^2 \quad (4.4)$$

unde A și B sunt constante dependente de curburile principale ale celor două corpuri și de unghiul ω dintre planele omoloage, de curbura.

Distanța dintre cele două puncte fiind pozitivă, coeficienții A și B trebuie să fie tot pozitivi. Astfel, proiecțiile pe planul tangent comun ale locurilor geometrice ale punctelor de pe cele două suprafețe limitrofe, aflate pe aceleași normale la acest plan la distanță constantă unele de altele, sunt elipse concentrice. În ipoteza că cele două suprafețe sunt netede și între ele nu există frecare, și că cele două corpuri sunt apăsate reciproc de o forță dirijată după normalele la planul tangent comun, corpurile se deformează și au contact pe o suprafață mică pe care sarcina normală se distribuie ca tensiune de contact. În ipoteza microgeometriei perfecte această suprafață este suprafața de contact, iar proiecția ei pe planul xOy reprezintă aria de contact, figura 4.3.

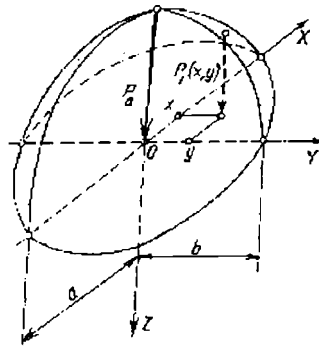


Fig. 4.3 Forma eliptică a suprafeței de contact

Aria de contact dintre corpuri, trebuie să fie delimitată de o elipsă, care raportată la sistemul de axe xOy are ecuația:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4.5)$$

iar tensiunea de contact devine:

$$\sigma_H(x, y) = \frac{3F}{2\pi ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad (4.6)$$

Relația (4.6) pune în evidență faptul că sarcina normală F se distribuie elipsoidal pe suprafața de contact. Tensiunea maximă se atinge în dreptul punctului inițial de contact și are valoarea:

$$\sigma_{H \max} = \frac{3F}{2\pi ab} = \frac{3}{2} \sigma_{Hmed} \quad (4.7)$$

Deoarece constantele A și B din (4.4) sunt determinate de geometria corpurilor în contact, se pot determina semiaxele elipselor de contact a și b . Pentru aceasta se rezolvă integralele eliptice de prima și a doua speță definite de ecuația tensiunii de contact.

Semiaxa mare "a" a elipsei de contact este:

$$a = n_a \sqrt[3]{\frac{3}{2} \eta \frac{F}{\Sigma k}}, \text{ unde } n_a = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{B}{A}\right) D} \quad (4.8)$$

Semiaxa mică "b" a elipsei de contact este:

$$b = n_b \sqrt[3]{\frac{3}{2} \eta \frac{F}{\Sigma k}}, \text{ unde } n_b = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{A}{B}\right) (K - D) \sqrt{1 - e^2}} \quad (4.9)$$

Apropierea dintre corpurile în contact este:

$$\delta = \frac{1}{2} n_\delta \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 F^2 \Sigma k}, \text{ unde } n_\delta = K \sqrt[3]{\frac{4}{\pi^2} \frac{1}{1 + \frac{A}{B}}} \quad (4.10)$$

Tensiunea hertziană maximă devine:

$$\sigma_{H \max} = n_p \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3}{2} \left(\frac{\Sigma k}{\eta}\right)^2} F, \text{ unde } n_p = \frac{1}{n_a} n_b \quad (4.11)$$

unde:

e - excentricitatea elipsei de contact

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (4.12)$$

K - integrala eliptică completă de speța întâi având ca modul excentricitatea elipsei de

contact:

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}, \quad D = \frac{1}{e^2} (K - L),$$

$$L = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} d\varphi, \quad \Sigma k = k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22} \quad (4.13)$$

η - dependent de materialele corpurilor în contact

$$\eta = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (4.14)$$

Aceste curburi sunt pozitive dacă în planul considerat, centrul de curbură se află în interiorul corpului și negative dacă se situează în exteriorul lui. Excentricitatea elipsei de contact se determină din ecuația:

$$\frac{A}{B} = (1 - e^2) \frac{D}{K - D} \quad (4.15)$$

Aceste relații au un caracter general, ele fiind valabile pentru o arie eliptică de contact, de excentricitate oarecare cuprinsă între limitele 0 și 1. Cele două cazuri limită menționate corespund unei arii circulare de contact ($e = 0$) și unei fâșii de contact limitată de două drepte paralele ($e = 1$).

Primul caz apare fie la contactul a două corpuri limitate de suprafețe sferice de raze oarecare, una din ele putând chiar degenera într-un plan, fie la contactul a doi cilindri cu axele perpendiculare.

În cazul contactului a două sfere rezultă:

$$a = b, \quad e = 0, \quad A = B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right), \quad K_0 = L_0 = \frac{\pi}{2} \text{ și } D_0 = \frac{\pi}{4}$$

astfel coeficienții n_a , n_b , n_p și n_δ devin egali cu unitatea.

Dacă nu există apăsare între corpuri, atunci contactul se poate considera punctiform [T1]. Distanța de la planul tangent O la punctele M și N în secțiunea mediană a corpurilor sferice, la o foarte mică distanță r de la axele z_1 și z_2 se poate exprima cu suficientă exactitate de formulele:

$$z_1 = \frac{r^2}{2R_1}, \quad z_2 = \frac{r^2}{2R_2} \quad (4.16)$$

și distanța între cele două puncte, figura 4.4

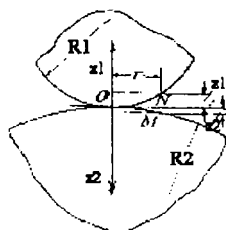


Fig. 4. 4 Contactul dintre două corpuri sferice

Contactul punctiform în cazul lagărelor pentru vârfuri între cele două corpuri sferice (pivot, cuzinet) este reprezentat în figura 4.5

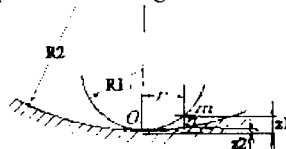


Fig. 4. 5 Contactul punctiform dintre două corpuri (convex și concav)

Elementele caracteristice ale contactului sunt:

-raza ariei de contact $a = b = \sqrt[3]{\frac{3 \eta F'}{2 \Sigma k}}$;

-tensiunea hertziană maximă $\sigma_H = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3 \left(\frac{\Sigma k}{\eta}\right)^2}{2}} F'$ (4. 17)

-apropierea dintre corpurile în contact $\delta = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{9}{4} \eta^2 F'^2 \Sigma k}$

unde curbura redusă Σk are expresia:

$$\Sigma k = \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} \quad (4. 18)$$

În cazul contactului dintre două corpuri mărginite de suprafețe sferice, semnul minus corespunde cazului când corpul de rază R_2 este o cavitate sferică și $R_2 > R_1$, cazul lagărelor pentru vârfuri.

4.2 Elemente de calcul ale lagărelor pentru vârfuri încărcate axial

Lagărele pentru vârfuri au suprafețe de contact punctiforme [D2, H1, K3, T4], și se utilizează la sprijinirea părții mobile a dispozitivelor și aparatelor unde se cer momente de frecare foarte mici pentru reducerea erorilor de indicație. Aceste lagăre sunt utilizate pentru sarcini și turații relativ reduse, și pot funcționa atât în poziție verticală (figura 4.6 a) cât și orizontală (figura 4.6 b).

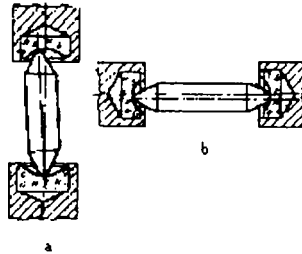


Fig. 4. 6 Posibilități de funcționare a lagărelor pentru vârfuri (a-vertical, b-orizontal)

Pentru evitarea înțepenirilor între vârf și cuzinet se lasă un joc care se reglează prin deplasarea axială a unuia dintre lagăre.

Literatura de specialitate recomandă pentru raza vârfului valori de (0,03 ... 0,5) mm, iar raza cuzinetului (0,5 ... 4) mm, grupate astfel încât să rezulte un raport:

$$k = \frac{r_2}{r_1} = 3 \dots 10 \quad (4. 19)$$

fără a se face referiri asupra elementelor de precizie sau a procesului disipativ. [D1, K3]

În cele ce urmează se vor face referiri asupra alegerii acestui raport .

Calculul lagărelor pentru vârfuri, are drept scop determinarea momentului de frecare, erorile indicatorului a aparatului și tensiunea de contact maximă, iar pentru optimizarea lor se evidențiază influența raportului razelor asupra acestora.

Materialele recomandate a fi utilizate pentru vârfuri sunt oțelurile de scule OSC 10, OSC 12 (cu o duritate de până la HRC 60, iar pe scara de duritate mineralogică ele se situează pe poziția 6 -7) sau aliajele cu cobalt și wolfram. În practică însă vârfului este confecționat din oțel inoxidabil.

Datorită fenomenelor complicate care au loc în lagărele de dimensiuni foarte mici, determinarea exactă a momentului de frecare prezintă dificultăți de ordin metodic !

În ipoteza pivotării pure, corespunzătoare unei forțe concentrate F , în direcție axială, suprafața de contact va avea forma unui cerc a cărei rază "a" se poate

determina din teoria lui Hertz pentru contactul a două sfere (§ 4.1).

Tensiunile datorate forței concentrate F și a greutateii sistemului mobil se consideră distribuite după o elipsă care are axa mare egală cu diametrul suprafeței circulare de contact (§ 4.1), figura 4.7.

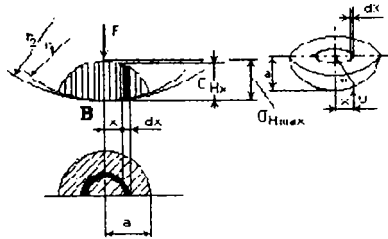


Fig. 4. 7 Distribuția tensiunilor de contact în lagărele pentru vârfuri

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{\sigma_{H \max}^2} - 1 = 0 \quad (4.20)$$

$$y = \sigma_{H \max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (4.21)$$

La distanța x , față de punctul B (unde viteza de alunecare este zero, și crește în direcție radială) se consideră o suprafață circulară elementară:

$$dA = 2\pi x dx \quad (4.22)$$

pe care acționează o forță elementară dF :

$$dF = y dA \quad (4.23)$$

La rotația vârfului, dF determină o forță de frecare care se opune mișcării de rotație a fusului și produce un moment de frecare elementar:

$$dM = \mu \cdot x \cdot dF \quad (4.24)$$

Ținând cont de relațiile (4.22), (4.23), (4.24) se obține succesiv:

$$dM = \mu xy \cdot 2\pi x \cdot dx = 2\pi x^2 \mu \cdot y dx \quad (4.25)$$

Din figura 4.7, rezultă că

$$\frac{y}{\sigma_{H \max}} = \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{a}, \Rightarrow y = \sigma_{H \max} \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{a} \quad (4.26)$$

ecuația (4.25) devine:

$$dM = 2\pi\mu\sigma_{H \max} \frac{1}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \cdot x^2 dx \quad (4.27)$$

Momentul de frecare va fi:

$$M = 2\pi\mu \frac{\sigma_{H \max}}{a} \int_0^R x^2 \sqrt{a^2 - x^2} dx \quad (4.28)$$

știind că

$$x = a \sin \alpha, \text{ deci } dx = a \cos \alpha \quad (4.29)$$

Integrala din relația (4.28) va avea succesiv formele:

$$\begin{aligned} I &= \int_0^a \frac{x^2}{a} \sqrt{a^2 - x^2} dx \\ I &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{a^2}{a} \sin^2 \alpha \sqrt{a^2 - a^2 \sin^2 \alpha} \cdot a \cos \alpha d\alpha = \\ &= a^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha \cdot d\alpha \end{aligned} \quad (4.30)$$

unde:

$$\sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha = \frac{1}{4} \sin^2 2\alpha = \frac{1}{4} \cdot \frac{\cos 4\alpha}{8} \quad (4.31)$$

cu (4.31) pentru integrala I se obține:

$$I = a^3 \left(\frac{1}{8} \alpha - \frac{\sin 4\alpha}{8} \right) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = a^3 \frac{\pi}{16} \quad (4.32)$$

Inlocuind (4.32) în (4.28), expresia momentului va deveni:

$$M = \frac{1}{8} \pi^2 \mu \cdot \sigma_{H \max} a^3 \quad (4.33)$$

Tensiunea maximă de contact $\sigma_{H \max}$ raportată la tensiunea medie $\sigma_{H \text{med}}$, (prin integrare) este:

$$\sigma_{H \max} = \frac{3}{2} \sigma_{H \text{ med}} \quad (4.34)$$

$$\sigma_{H \max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi \cdot a^2}$$

înlocuind în (4.33), prin exprimarea tensiunii de contact, rezultă

$$M = \frac{3}{16} \pi \mu \cdot F^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{3}{2\pi} \frac{1}{\sigma_{H \max}}} \quad (4.35)$$

Relația (4.35) pune în evidență faptul că momentul de frecare se micșorează odată cu creșterea valorii tensiunii maxime $\sigma_{H \max}$ și cu micșorarea razei de curbură a vârfului fusului. Creșterea tensiunii $\sigma_{H \max}$ este însă limitată de nivelul tensiunilor admisibile σ_{Ha} pentru materialul cel mai slab din cuplul pivot / cuzinet, iar raza vârfului nu poate fi micșorată prea mult deoarece la presiuni de contact mari, se depășește limita deformării elastice și vârful se aplatizează, caz în care apare uzura abrazivă și raza r_1 crește considerabil. Pentru materialele utilizate frecvent, în tabelul 4.1 [D1] sunt prezentate câteva valori ale tensiunii admisibile:

Tabelul 4. 1

Material	Tensiune de contact admisă σ_{Ha} [MPa]
OSC 10	3000 ... 5000
aliaje de cobalt și wolfram	2000 ... 4000
agat	4000 ... 5000
safir, rubin	4000 ... 5000

Dar relația (4.35) se regăsește în literatură [F1, R1] preponderent sub forma, obținută prin exprimarea diametrului "a" al suprafeței de contact (cu (4.34) în (4.33)), rezultă

$$M_f = \frac{3}{16} \cdot \pi \cdot \mu \cdot F \cdot a \quad (4.36)$$

Pentru oțeluri, în condiții de vibrații, tensiunea admisibilă se adoptă ca o fracțiune din duritatea BRINELL [D1]

$$\sigma_{Ha} = (0,25 \quad 0,35) \text{ HB}$$

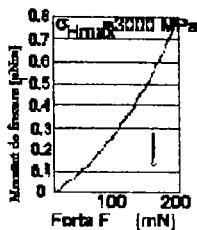


Fig. 4. 8 Moment de frecare funcție de forță

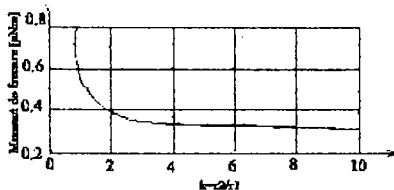


Fig. 4. 9 Moment de frecare funcție de raportul k

În figura 4.8 este prezentată variația momentului de frecare în funcție de forța de încărcare axială F , iar în figura 4.9 variația în raport cu raportul razelor (cuzinetului și pivotului) [D2].

S-a analizat veridicitatea celei din urmă diagrame și s-a concluzionat că alura curbei este cea din figura 4.9, dar valorile diferă substanțial. Astfel au fost calculate teoretic **momentele de frecare**, **ariile suprafețelor de contact** precum și **tensiunile maxime**, în cazul pivotării pure, când acționează doar o forță axială, pentru perechile pivot / cuzinet și intensitatea încărcărilor utilizate în experimentele efectuate în capitolul următor.

Nu se poate face afirmația că momentul de frecare variază doar funcție de raportul razelor $k = r_2 / r_1$, cum se precizează [D1, H1] ci trebuie menționată și una dintre raze (ca parametru).

4.2.1 Analiza influenței raportului razelor asupra momentului de frecare

Pentru a evidenția faptul că variația momentului de frecare M_f este dependentă și de una dintre raze (ca parametru), s-au calculat valorile teoretice ale acestuia în două situații [D10]

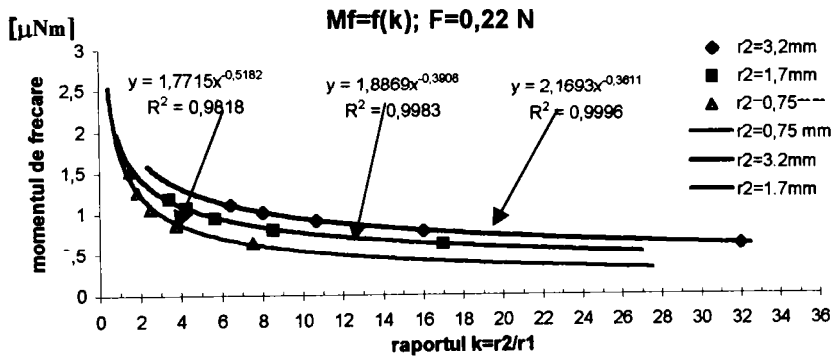
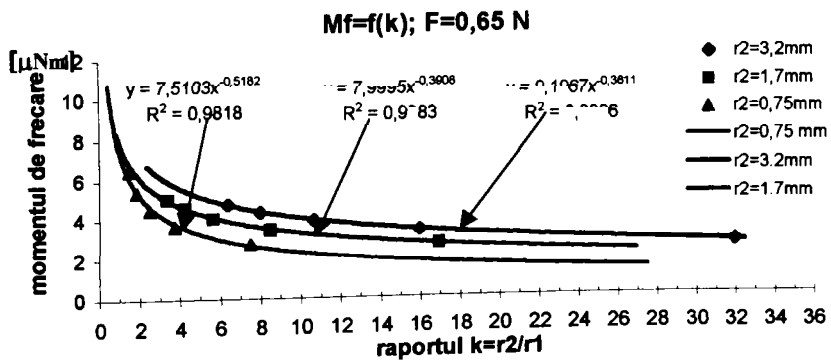
- a. r_1 raza pivotului – parametru
- b. r_2 raza cuzinetului – parametru

Valorile discrete acceptate pentru r_2 și r_1 respectiv pentru sarcina F sunt cele pregătite în vederea verificării pe cale experimentală a rezultatelor teoretice.

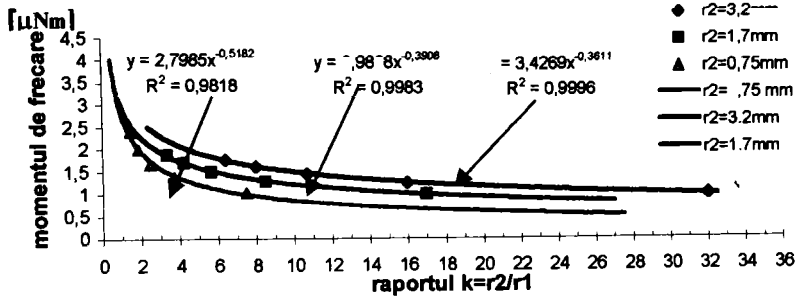
a. r_1 – parametru

În figurile 4.10 și 4.11 sunt prezentate variațiile momentului de frecare funcție de raportul razelor, pentru diverse valori de dimensiuni ale razei de curbură al cuzinetului ($r_2 = [0,75; 1,7; 3,2]$ mm), pentru două valori ale forței axiale: minimă ($F = 0,22$ N) respectivă maximă ($F = 0,65$ N), restul de grafice fiind prezentate în figura 4.12. Se observă că spre exemplu, pentru un raport $k = 4$ al razelor de curbură se obțin pentru momentul de frecare valorile din tabelul 4.2:

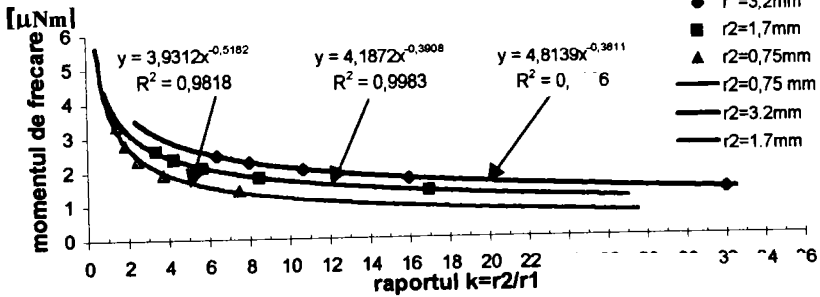
k	Raza curbura cuzinet r_2 [mm]	Moment de frecare [μNm]	
		Forța $F_{\min} = 0,22 \text{ N}$	Forța $F_{\max} = 0,65 \text{ N}$
4	0,75	0,86	3,661
4	1,7	1,097	4,653
4	3,2	1,315	5,574

Fig. 4. 10 Moment de frecare funcție de k în raport cu parametri r_1 și $F=0.22 \text{ N}$ Fig. 4. 11 Moment de frecare funcție de k în raport cu parametri r_2 și $F=0.65 \text{ N}$

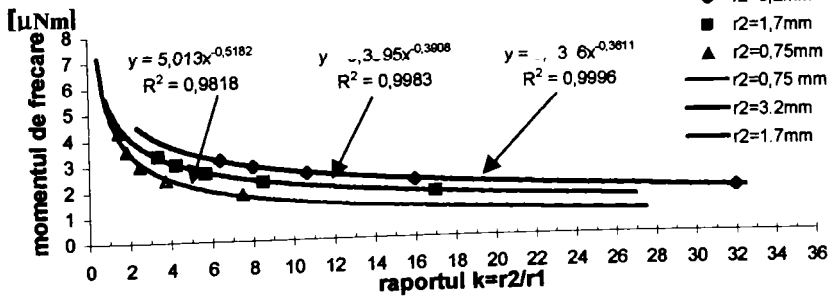
Mf=f(k); F=0,31 N



Mf=f(k); F=0,4 N



Mf=f(k); F=0,48 N



$$Mf=f(k); F=0,56 \text{ N}$$

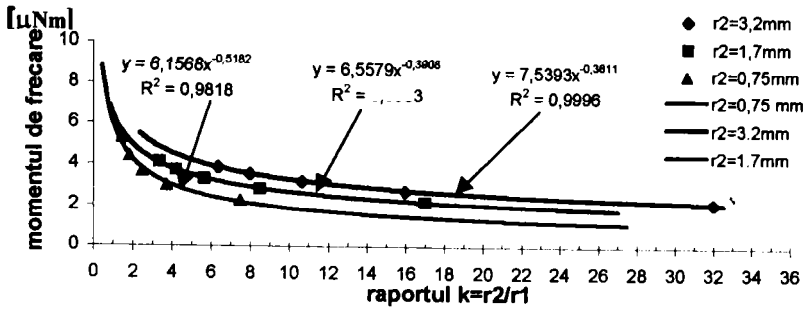


Fig. 4. 12 Moment de frecare funcție de raportul razelor, r_1 (a pivotului) parametru

b. r_2 – parametru

În figurile 4.13 și 4.14 sunt reprezentate variațiile momentului de frecare în funcție de raportul k , când se modifică raza pivotului r_1 , pentru forțele axiale menționate în cazul figurilor anterioare (4.9 și 4.10), minim de 0,22 N și 0,65 N. Graficele obținute pentru celelate trepte de forță menționate sunt reprezentate în figura 4.15.

Pentru același raport $k=4$ ca în cazul precedent, rezultă:

Tabelul 4. 3

k	Raza curbura pivot r_1 [mm]	Moment de frecare [μNm]	
		Forța $F_{\min} = 0,22 \text{ N}$	Forța $F_{\max} = 0,65 \text{ N}$
4	0,1	0,656	2,781
4	0,2	0,854	3,624
4	0,3	0,999	4,237
4	0,4	0,973	4,118
4	0,5	1,201	5,09

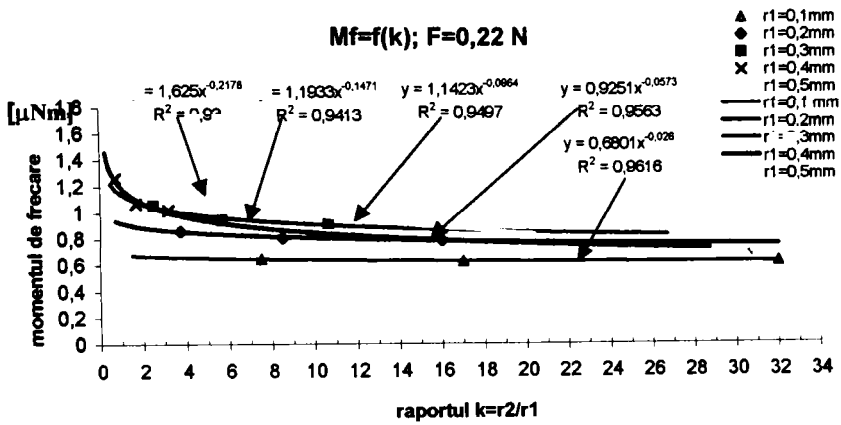


Fig. 4. 13 Moment de frecare funcție de k în raport cu parametri r_2 și $F=0,22\text{ N}$

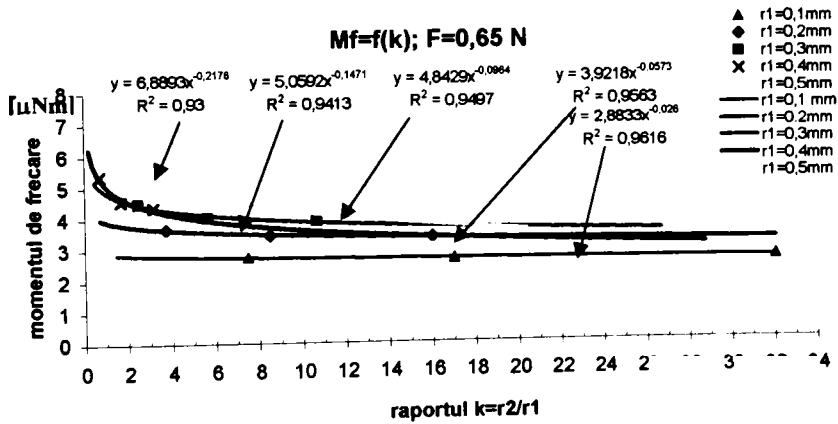
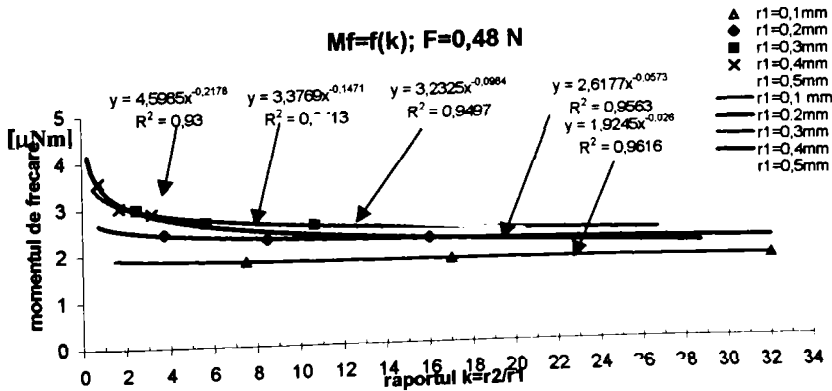
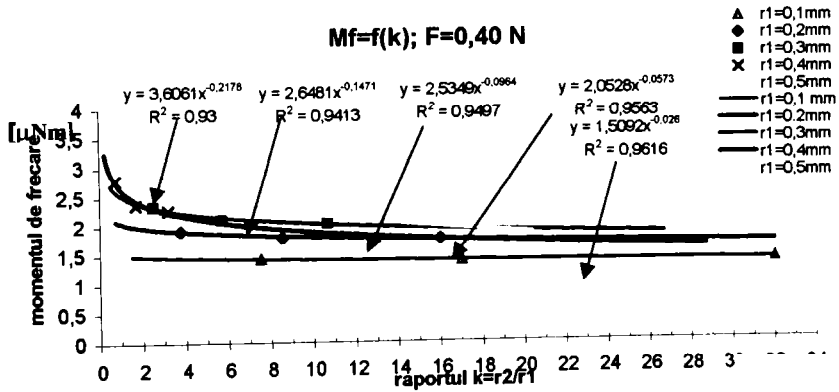
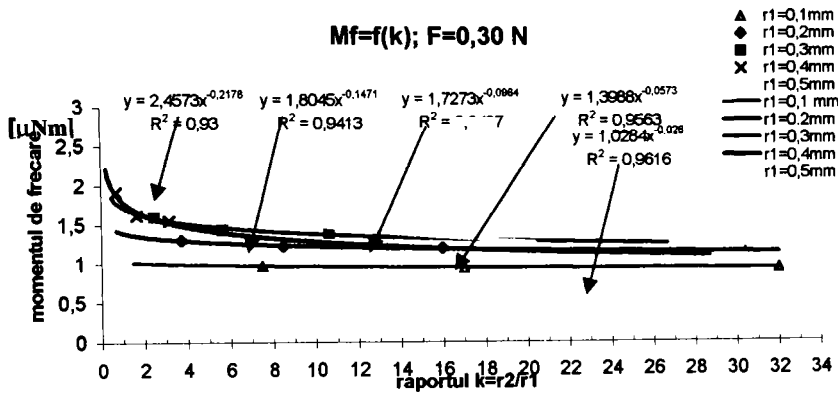


Fig. 4. 14 Moment de frecare funcție de k în raport cu parametri r_2 și $F=0,65\text{ N}$



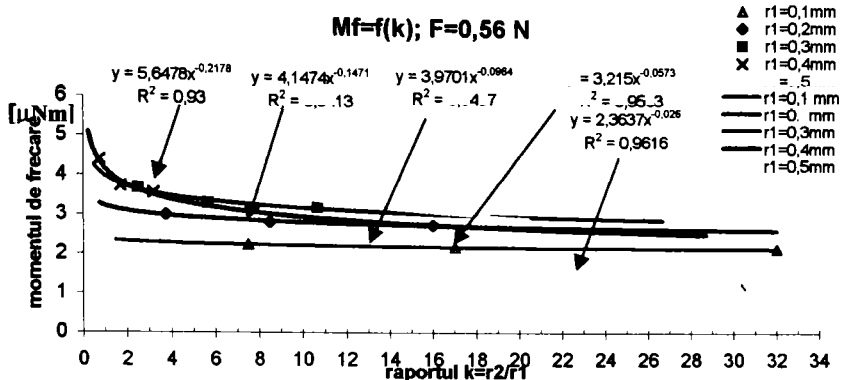


Fig. 4. 15 Moment de frecare funcție de raportul razelor, raza cuzinetului -parametru

Din analiza acestor exemple (tabelele 4.2, 4.3, figurile 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 și 4.15) se remarcă faptul că variația momentului de frecare în raport cu raza cuzinetului conduce la un domeniu de variație sensibil mai mic, (tabelul 4.2) decât dacă se consideră variabilă raza pivotului (tabelul 4.3), pentru același raport al razelor (exemplu $k=4$).[D8]

Punctele calculate teoretic au permis trasarea curbelor de regresie ale momentului de frecare funcție de raportul razelor, de forma (4.37) cu un indice de corelație cuprins între (0,93 ... 0,99):

$$y = A \cdot x^{-B} \quad (4.37)$$

unde A și B sunt constante dependente de forța de încărcare și raportul razelor.

4.2.2 Analiza influenței forței de încărcare axială și a tensiunii de contact asupra momentului de frecare

În diagramele prezentate anterior s-a putut observa că odată cu creșterea forței axiale, crește și valoarea momentului de frecare. În figura 4.16 s-a reprezentat variația momentului de frecare M_f funcție de raportul k având ca parametru sarcina axială. În figura 4.17 s-a trasat dependența momentului de frecare de încărcarea axială, iar ca parametru s-a ales raportul razelor k :

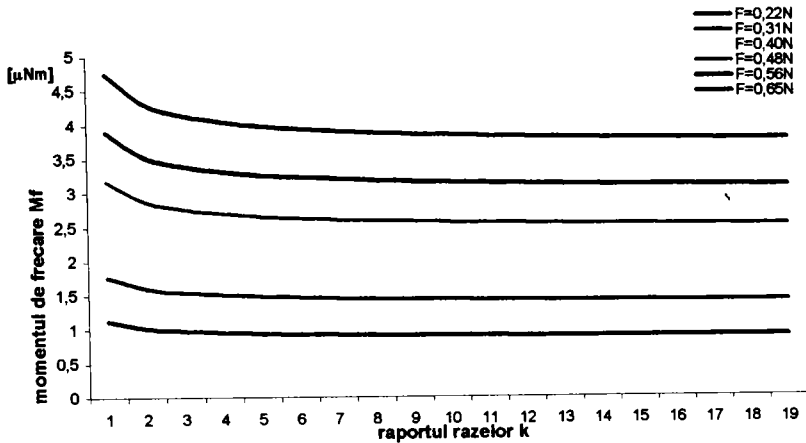


Fig. 4. 16 Moment de frecare funcție de k în raport cu încărcarea axială F , pentru $r_1=0,1$ mm

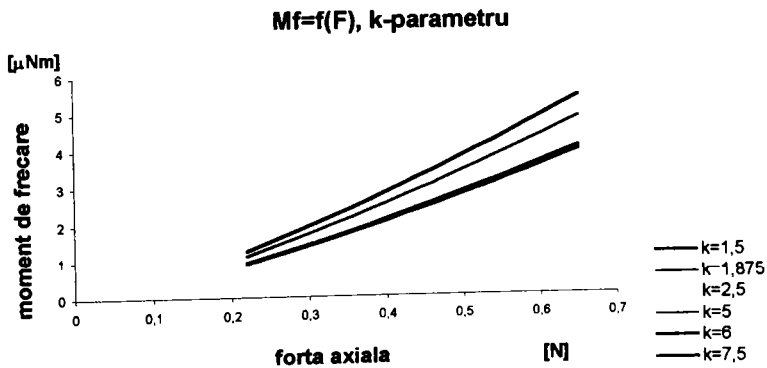


Fig. 4. 17 Moment de frecare M_f funcție de încărcarea axială F

Figura 4.18 evidențiază variațiile momentului de frecare funcție de tensiunea efectivă de contact pentru pivotul cu raza $r_2 = 0,1$ mm pentru 6 valori ale raportului razelor: 1,5; 1,875; 2,5; 5; 6; și 7,5 pentru modificarea în trepte a sacinii axiale (0,22 N; 0,31 N; 0,39 N; 0,48 N; 0,57 N și 0,65 N).

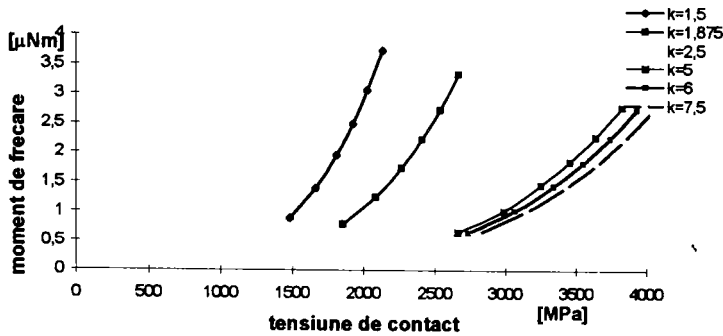


Fig. 4. 18 Moment de frecare funcție de tensiunea de contact pentru $r_1=0,1\text{mm}$

4.2.3 Contribuții la optimizarea parametrilor geometrici

Valoarea minimă a razei pivotului se poate determina:

- ↳ din condiția de rezistență, când pentru tensiunea hertziană punctiformă se impune la limită valoarea maxim admisă,
- ↳ din condiția unui raport k optim al razelor
- ↳ din condiția unor erori minime de citire.

În cazul lagărelor pentru vârfuri o problemă importantă o reprezintă eroarea semnalului citit pe scala gradată a aparatului. Această eroare este în strânsă legătură cu valoarea momentului de frecare respectiv cu raportul razelor k , motiv pentru care ultime condiții se vor analiza împreună.

I. Determinarea razei pivotului r_1 funcție de tensiunea de contact admisă^{*)}

Analiza lagărelor pentru vârfuri, presupune, după cum s-a văzut în paragraful 4.2.2 mărimile:

- ↳ diametrul suprafeței punctiforme de contact (A)

^{*)} În relațiile transformate pentru mărimile precizate, în prezentul paragraf, coeficienții introduși au unități de măsură.

- ↳ momentul de frecare din lagăr (B)
- ↳ presiunea maximă. (C)

Pentru ușurința prelucrării datelor, ecuațiile determinate anterior se vor aduce într-o formă convenabilă.

A. Determinarea diametrului suprafeței punctiforme de contact

Raza suprafeței punctiforme de contact este:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} F \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}} \quad (4.38)$$

unde: F este forța de încărcare axială [N]

$\nu_{1,2}$ coeficientul lui Poisson (pentru oțel și safir are valoarea 0,3)

E_1 modulul de elasticitate al materialului pivotului (pentru oțel $2,1 \cdot 10^5$ [MPa])

E_2 modulul de elasticitate al materialului cuzinetului (pentru safir $4,15 \cdot 10^5$ [MPa]¹)

între razele cuzinetului și pivotului se poate scrie dependența:

$$\frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} = \frac{r_1 \cdot k}{k - 1} = r_1 \cdot \chi, \quad \text{unde } k = \frac{r_2}{r_1} \quad (4.39)$$

Introducând coeficienții menționați mai sus, relația (4.38) devine:

$$a = 1,69 \cdot 10^{-2} (m \cdot r_1 \cdot \chi)^{\frac{1}{3}} \quad (4.40)$$

sau sub forma logaritmică:

$$\lg m + \lg r_1 + \lg \chi = 3 \lg(59,17 \cdot a) \quad (4.41)$$

B. Determinarea momentului de frecare din lagărele pentru vârfuri

În ipoteza pivotării pure (în cazul contactului în punctul B), expresia pentru

¹ Media tuturor valorilor oferite de producători

momentul de frecare demonstrată în paragraful 4.2.2, este:

$$M_f = \frac{3}{16} \pi \cdot a \cdot \mu \cdot F \quad (4.42)$$

unde: coeficientul de frecare teoretic, admis² [1], [3], [4], [5], [7] ca fiind $\mu = 0,14$ [-]

În ipotezele menționate anterior, expresia (4.42) devine:

$$M_f = 1,393 \cdot F^{\frac{4}{3}} \cdot (r_1 \cdot \chi)^{\frac{1}{3}} \quad [\mu\text{Nm}] \quad (4.43)$$

respectiv

$$0,717875 \cdot M_f = F^{\frac{4}{3}} \cdot (r_1 \cdot \chi)^{\frac{1}{3}} \quad (4.44)$$

sau sub formă logaritmică:

$$3 \lg(0,717875 \cdot M_f) = 4 \lg F + \lg r_1 + \lg \chi \quad (4.45)$$

C. Determinarea presiunii de contact maxime

Cum s-a arătat în paragraful 4.2.2, presiunea maximă efectivă de contact este:

$$\sigma_{H \max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi \cdot a^2} \quad (4.46)$$

transformând relația (4.46) prin introducerea mărimilor m, r_1 și χ rezultă

$$\sigma_{H \max} = 1671,73 \cdot F^{\frac{1}{3}} (r_1 \cdot \chi)^{\frac{2}{3}} \quad (4.47)$$

respectiv prin logaritmare:

$$3 \lg \left(\frac{\sigma_{H \max}}{1671,73} \right) = \lg F + 2 \lg r_1 + 2 \lg \chi \quad (4.48)$$

Relația (4.48) se poate scrie și sub forma:

² Media tuturor valorilor oferite de producători

$$\frac{F}{r_1^2 \cdot \chi^2} = \left(\frac{\sigma_{H \max}}{1671,73} \right)^3 \quad (4.49)$$

Dacă în relația (4.49) se atribuie tensiunii maxime de contact $\sigma_{H \max}$, valoarea tensiunii de contact admisibile σ_{Ha} pentru materialul pivotului aceasta devine o relație de dimensionare a razei pivotului, în condiții limită:

$$r_1 = \frac{1}{\chi} \sqrt[3]{F \cdot \left(\frac{1671,73}{\sigma_{Ha}} \right)^3} \quad (4.50)$$

Cu (4.50) în relația (4.48) și transformată convenabil sub forma:

$$F^4 \cdot r_1 \cdot \chi = (0,717875 \cdot M_f)^3 \quad (4.51)$$

rezultă:

$$M_f = \frac{1}{0,717875} \cdot F^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{1671,73}{\sigma_{Ha}} \right)^2 \quad (4.52)$$

respectiv:

$$M_f = 56,95 \cdot F \sqrt{\frac{F}{\sigma_{Ha}}} \quad [\mu\text{Nm}] \quad (4.53)$$

Cu ajutorul relațiilor (4.50) și (4.53) se poate reprezenta o nomogramă pentru evaluarea preliminară a razei pivotului r_1 și a momentului de frecare M_f , în condiții limită date de tensiunea de contact admisibilă σ_{Ha} .

În figura 4.19 este reprezentată o astfel de nomogramă pentru tensiunea de contact admisibilă $\sigma_{Ha} = 4000$ MPa, în funcție de încărcare, prin admiterea valorii $\chi = 1,1$, ceea ce corespunde unui raport $k = 10$ a razelor. S-a admis această valoare, pentru k , deoarece conform diagramelor $M_f = f(k)$ trasate în paragraful 4.2.2, momentul de frecare M_f are valorile minime.

Pentru o valoare a încărcării, se ridică o perpendiculară până intersectează curba corespunzătoare razei pivotului, respectiv curba corespunzătoare momentului de frecare, după care se duc paralele la axa Ox , până în ordonatele corespunzătoare, determinându-se astfel valorile la limită pentru r_1 și M_f .

Variatia razei r_1 si a M_f in raport cu incarcarea
 ($\sigma_{Ha} = 4000 \text{ MPa}$)

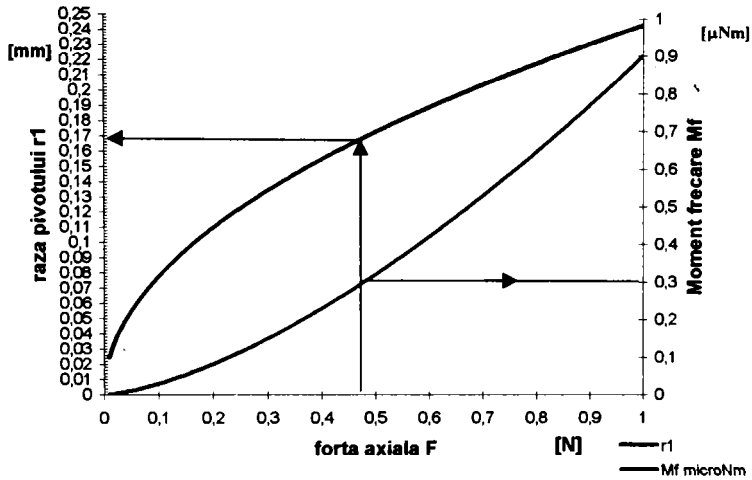


Fig. 4. 19 Nomogramă pentru determinarea M_f și r_1

In figurile 4.20 și 4.21 sunt prezentate nomograme și pentru valorile tensiunii de contact de 2000 MPa respectiv 3000 MPa, și o nomogramă figura 4.22, care reunește toate acestea, dar care este mai dificil de utilizat.

Variatia razei r_1 si a M_f in raport cu incarcarea
 ($\sigma_{Ha} = 2000 \text{ MPa}$)

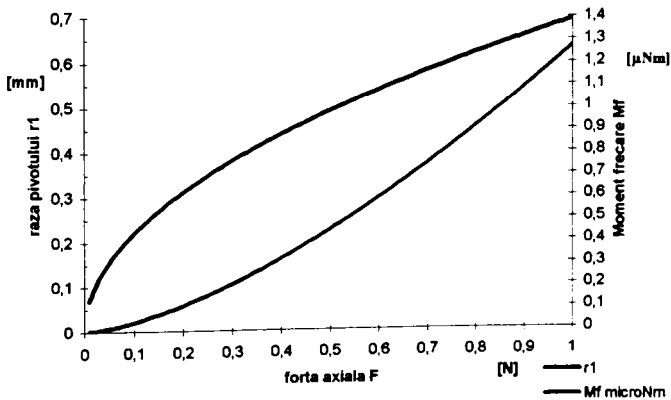


Fig. 4. 20 Nomogramă pentru determinarea M_f și r_1

Variatia razei r_1 si a M_f in raport cu incarcarea
 ($\sigma_{Ha} = 3000 \text{ MPa}$)

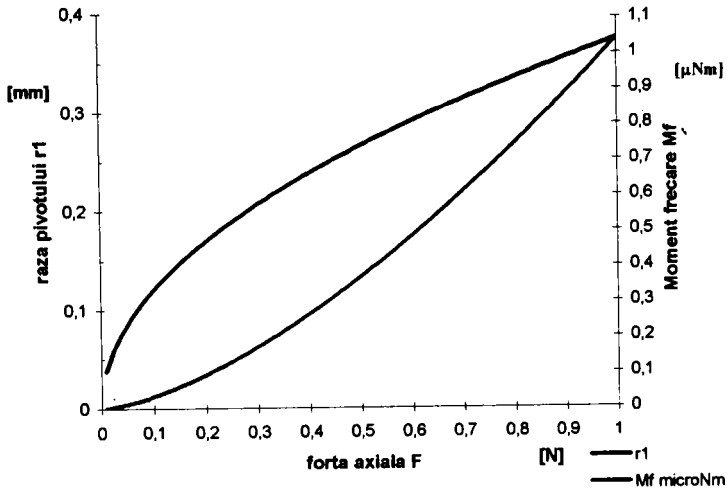


Fig. 4. 21 Nomogramă pentru determinarea M_f și r_1

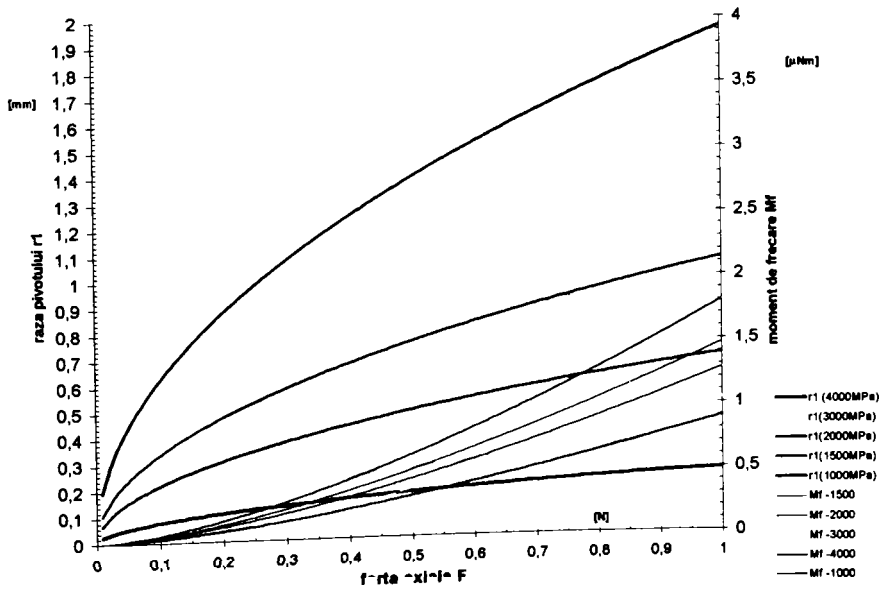


Fig. 4. 22 Nomogramă pentru determinarea M_f și r_1

II. Determinarea razei pivotului r_1 funcție de eroarea de citire

Alegerea raportului razelor prin impunerea razei pivotului este una din problemele delicate, deoarece se află mereu sub semnul dualității: moment de frecare mic în defavoarea erorilor de citire, sau erori mici pentru un moment de frecare mai mare. Deoarece în literatura de specialitate nu se fac aceste precizări, în cele ce urmează se vor face recomandările utile în vederea alegerii optime a raportului razelor, respectiv a razei pivotului.

Eroarea de indicație este o consecință a existenței jocului din lagăr. Acest joc este impus de procesul termic de dilatare liniar. Omiterea acestui fapt poate conduce la compromiterea funcționării lagărelor fie prin înțepenirea echipajului mobil, fie la limită distrugerea fusului sau/și cuzinetului.

Jocul din lagăr, j , depinde de coeficienții de dilatare liniară a materialului fusului respectiv al cuzinetului α_1, α_c de lungimea axului l_0 a axului la temperatura de referință t_0 și de temperatura admisă la funcționare t_{\max} .

Astfel, calculul erorii la acul indicator se determină în urma stabilirii jocului dintre fus și cuzinet. Consecință a jocului axial este așezarea înclinată a axului port ac indicator, figura 4.23

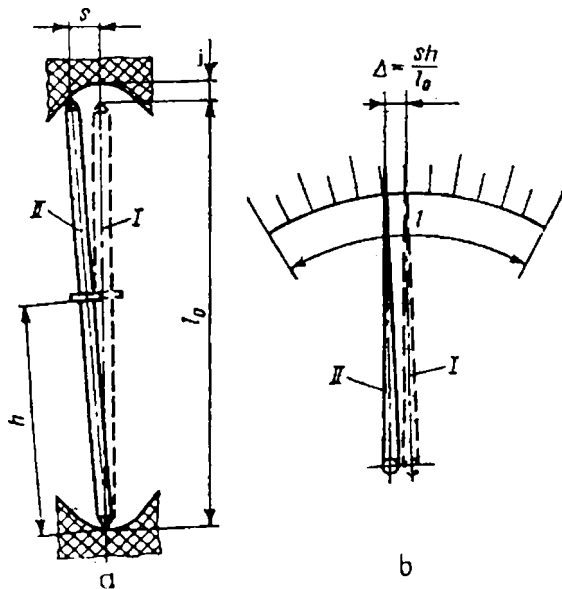


Fig. 4. 23 Eroarea la indicatorul aparatului

a- poziționarea axului. b- deviația acului indicator

Deviația Δ pe scala aparatului este egală cu cea a punctului în care acul

indicator este montat pe ax:

$$\Delta = \frac{s \cdot h}{l_0} \quad (4.54)$$

Eroarea relativă raportată la lungimea scalei l este:

$$\gamma = \frac{2\Delta}{l} \cdot 100 = \frac{2sh}{l_0 l} \cdot 100[\%] \quad (4.55)$$

Pentru stabilirea corectă a relațiilor pentru eroare / deviație, trebuie să se țină cont de zona de contact dintre ax și cuzinet, evitându-se contactul pe zona conică a vârfului (sau a cuzinetului), deoarece acesta modifică condițiile de funcționare, figura 4.24

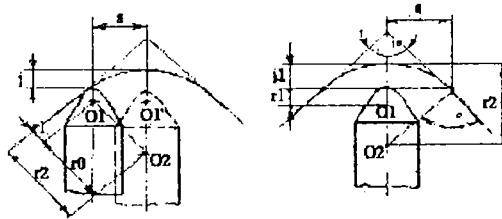


Fig. 4. 24 Jocul din lagăr

Pentru valoarea geometrică a mărimii s , de deplasare a fîsului superior se poate scrie relația:

$$\begin{aligned} r_0^2 &= s^2 + (r_0 - j)^2 \\ s &= \sqrt{j(2r_0 - j)} \end{aligned} \quad (4.56)$$

care prin înlocuire în (4.56) va conduce la:

$$\gamma = \frac{2h\sqrt{j(2r_0 - j)}}{l_0 l} \cdot 100[\%] \quad (4.57)$$

Pentru creșterea preciziei de indicație raportul k trebuie să fie mai mic în lagărul superior decât în cel inferior, figura 4.25. În cazul în care raportul razelor în lagărul superior este mai mare, vârful (superior) este solicitat la șocuri

Pentru exemplificare la o valoare a jocului de 0,1 mm în condițiile geometrice corespunzătoare modelelor experimentale $l_0 = 40$ mm, $h = 20$ mm și coeficienții de dilatare menționați în capitolul 2, rezultă diagrama din figura 4.26. Pe aceeași diagramă s-au trasat și variațiile momentului de frecare în condiția tensiunii de contact admise de 4000 MPa, pentru o încărcare axială de 0,3 N.

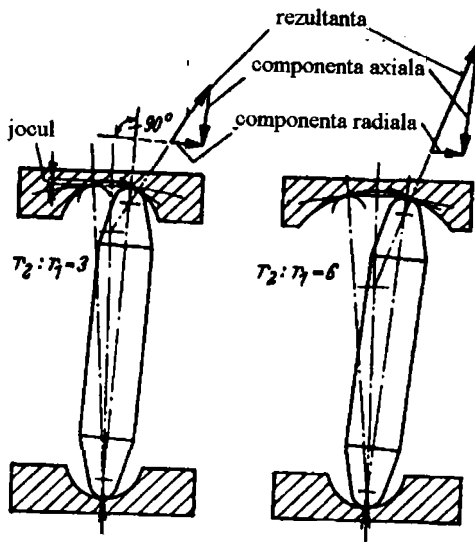


Fig. 4. 25 Influența raportului razelor și a jocului asupra preciziei

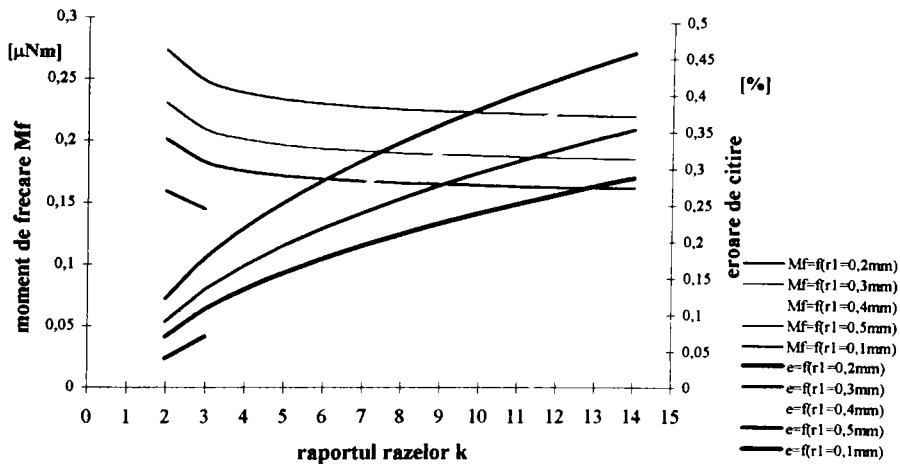


Fig. 4. 26 Variația momentului de frecare și a erorii de citire (teoretice) pentru $j=0,1\text{mm}$

Curbele corespunzătoare razei $r_1 = 0,1\text{ mm}$ s-au trasat doar pentru un domeniu foarte îngust în care tensiunea de contact a fost în domeniul acceptat admis, și anume $(\sigma_H)_{ef} < \sigma_{Ha} = 4000\text{ MPa}$). În figura 4.27 s-a trasat diagrama variației momentului de frecare și a erorii de citire funcție de raportul k al razelor (cu raza pivotului r_1 -

parametru) pentru o încărcare axială minimă de 0,22 N corespunzătoare sarcinii gravitaționale proprii, în condițiile $\sigma_H < 4000$ MPa.

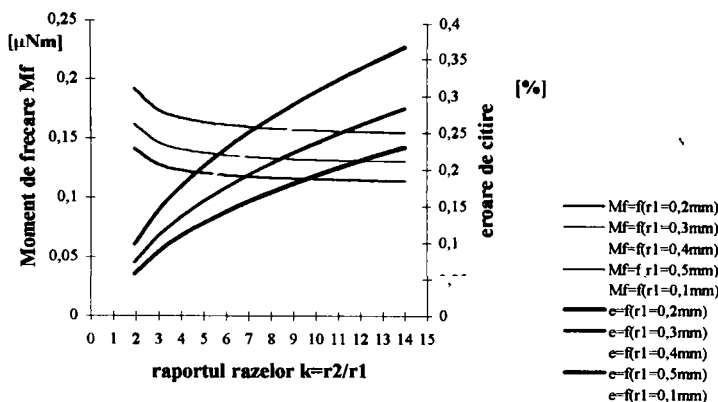


Fig. 4. 27 Variatia momentului de frecare și a erorii de citire (teoretice) pentru $j=0,1$ mm, $F=0,2$ N

În figura 4.28 s-a trasat diagrama variației erorii de citire pentru două valori a jocului axial, ($j = 0,1$ mm respectiv $j = 0,05$ mm) în aceleași condiții de încărcare ($F_{ax} = 0,44$ N).

Pentru o dublare a jocului axial, valoarea erorii de citire crește aproximativ tot de două ori.

Dacă se respectă valoarea jocului axial, atunci eroarea de citire nu variază în raport cu încărcarea.

Variația erorii de citire funcție de jocul axial

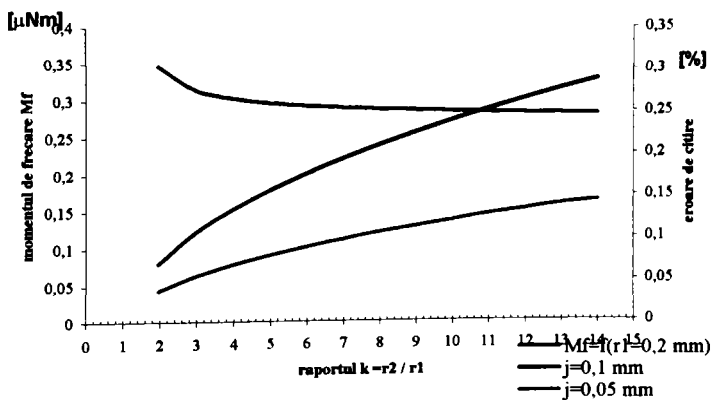


Fig. 4. 28 Variația erorii de citire funcție de jocul axial

In cazul axelor verticale din expresia razei suprafeței de contact punctiforme (4.58), exprimat convenabil prin relația (Hertz) [Z1], se poate determina raza minimă a pivotului, după cum urmează:

$$a^3 = \frac{3}{2} (1 - \nu^2) \frac{r}{E} \cdot F \quad (4.58)$$

unde: r – raza echivalentă

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \Rightarrow r = \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (4.59)$$

E – modulul de elasticitate echivalent [Z1]

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)$$

iar tensiunea de contact conform relației 4.29 este:

$$\sigma_{H \max} = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi \cdot a^2} \Rightarrow a^2 = \frac{3}{2} \frac{F}{\pi \cdot \sigma_{H \max}} \quad (4.60)$$

Cum s-a arătat anterior în paragraful 4.2 expresia momentului de frecare este relația (4.33). Pentru a exprima valoarea razei suprafeței de contact se împarte (4.58) la (4.60) :

$$a = \frac{a^3}{a^2} = \pi \cdot (1 - \nu^2) \frac{r}{E} \cdot \sigma_{H \max} \quad (4.61)$$

In acest caz, relația (4.36) a momentului de frecare devine:

$$M_f = \frac{3}{16} \pi^2 \mu (1 - \nu^2) \frac{r}{E} \sigma_{H \max} \cdot F \quad (4.62)$$

Raportul r/E exprimat prin relația (4.58) asociată relației (4.60) rezultă:

$$\begin{aligned} \frac{r}{E} &= \frac{2}{3} \frac{a^3}{F(1 - \nu^2)} = \frac{2}{3} \frac{1}{F(1 - \nu^2)} \frac{3}{2} \frac{F}{\pi \sigma_{H \max}} \sqrt{\frac{3}{2} \frac{F}{\pi \sigma_{H \max}}} \\ \frac{r}{E} &= \left(\frac{3}{2} \right)^{0.5} \frac{F^{0.5}}{\pi^{1.5} \cdot \sigma_{H \max}^{1.5} \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4.63) \end{aligned}$$

Cu ajutorul relației (4.63) rezultă forma dorită pentru momentul de frecare în care acesta depinde doar de tensiunea maximă, de coeficientul de frecare și de sarcina axială:

$$M_f = \frac{3}{16} \pi^2 \mu (1 - \nu^2) \sigma_{H \max} \cdot F \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^{0.5} \frac{F^{0.5}}{\pi^{1.5} \cdot \sigma_{H \max}^{1.5} (1 - \nu^2)} = 0.407 \mu \frac{F^{1.5}}{\sigma_{H \max}^{0.5}} \quad (4.64)$$

În anumite aplicații, forța axială F este constituită doar de greutatea G a echipajului mobil.

După cum se observă momentul de frecare M_f scade odată cu creșterea tensiunii de contact. Din acest motiv uneori este utilă folosirea valorii admisibile $\sigma_{H \max}$ pentru obținerea razei minime implicit a unui moment de frecare minim.

Din relația (4.64) nu rezultă explicit modul în care elementele geometrice ale lagărului influențează momentul de frecare.

În legătură cu această problemă unii autori postulează, având la bază cercetări experimentale, că raportul razelor k trebuie să fie ≥ 3 [Z1, D1].

Din punctul de vedere al limitării superioare a raportului k părerile diferă foarte mult: astfel Zierman recomandă $k < 4$, Demian $k < 10$, alții autori nu limitează superior acest raport.

Problema studiului influenței geometriei fusului și cuzinetului asupra momentului de frecare și a preciziei de indicație a aparatului rămâne așadar deschisă

Modul în care raza pivotului influențează preluarea sarcinii de către lagăr și modul în care contribuie la formarea tensiunii hertziene maxime poate fi evidențiat dacă din ecuația (4.59) se calculează valoarea minimă a razei pentru un raport al razelor k , admis:

$$\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} = E \left(\frac{3}{2}\right)^{0.5} \frac{F^{0.5}}{\pi^{1.5} \cdot \sigma_{H \max}^{1.5} (1 - \nu^2)} \quad (4.65)$$

și prin introducerea raportului k , (4.65) devine (4.66):

$$r_1 \cdot \frac{k}{k-1} = \left(\frac{3}{2}\right)^{0.5} \frac{1}{\pi^{1.5} \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{E \cdot F^{0.5}}{\sigma_{H \max}^{1.5}} \quad (4.66)$$

Dacă se impune un anumit raport k , din (4.67) rezultă valoarea minimă a razei vârfului:

$$r_1 = \left(\frac{3}{2}\right)^{0.5} \cdot \frac{k-1}{k} \cdot \frac{1}{\pi^{1.5} \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{E \cdot F^{0.5}}{\sigma_{H \max}^{1.5}} \quad (4.67)$$

În figura 4.29 este reprezentată variația razei pivotului r_1 , după relația (4.67), unde s-au adoptat valorile: $\sigma_{Ha} = 4000$ MPa, $\nu = 0,3$, $E = 2,78 \cdot 10^5$ MPa (modul de elasticitate echivalent) și forțele F .

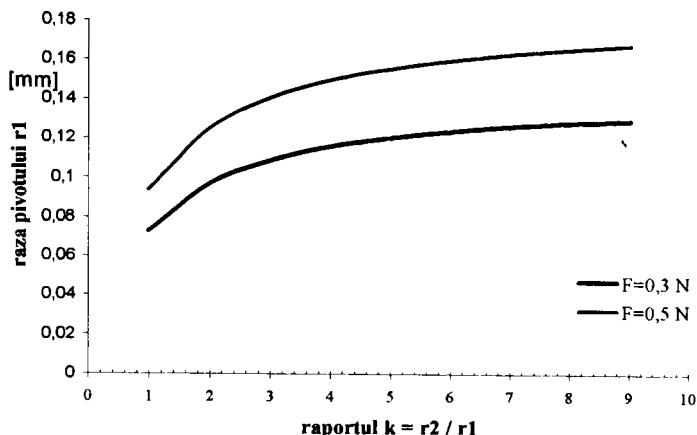


Fig. 4. 29 Dependența razei pivotului r_1 de raportul k (F parametru)

Relația (4.67) poate fi utilizată la predimensionarea razei pivotului în cazul fixării unui raport al razelor cuzinetului / pivotului.

Paragraful 4.2 constituie o analiză teoretică a influenței unor factori asupra frecării și preciziei conferite de lagărele pentru vârfuri încărcate axial.

4.3 Elemente de calcul ale lagărelor pentru vârfuri încărcate complex

Determinarea momentului de frecare într-o situație apropiată realității, se poate face dacă se consideră că asupra vârfului acționează în afara forței axiale F și o forță normală la axa fusului S , de regulă ca o sarcină exterioară.

Forța normală S care acționează asupra vârfului poate fi constantă (a) sau variabilă (b), care provoacă o frecare de alunecare, sau de rostogolire și pivotare, după cum $S > \mu F$, sau $S < \mu F$, unde μ este coeficientul de frecare, figura 4.30.

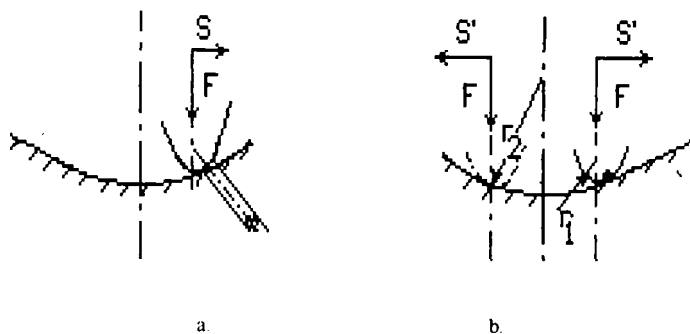


Fig. 4. 30 Modul de acționare al forței exterioare S (a-constantă, b-variabilă)

Forța S , de direcție constantă apare fie datorită arcurilor spirale plane, fie câmpurilor magnetice, montajului defectuos al lagărelor sau altor cauze. Suprafața de contact în astfel de situații se deplasează față de centrul calotei. Considerând forța S constantă și distanța dintre cele două lagăre ale axului foarte mare în raport cu dimensiunile lagărelor, se poate aprecia că noua poziție a axei vârfului OO' s-a deplasat paralel cu poziția sa inițială, figura 4.31. Suprafața de contact, corespunzătoare noii poziții a vârfului se află situată la distanța d de axa acestuia, având centrul în punctul B . Știind că forța normală F_n are punctul de aplicație în B , și că ea se poate descompune în componentele S și S' , în planele corespunzătoare.

În situația S constant ca direcție și sens, vârful se deplasează paralel cu poziția inițială până în punctul B , unde începe deraparea (alunecarea).

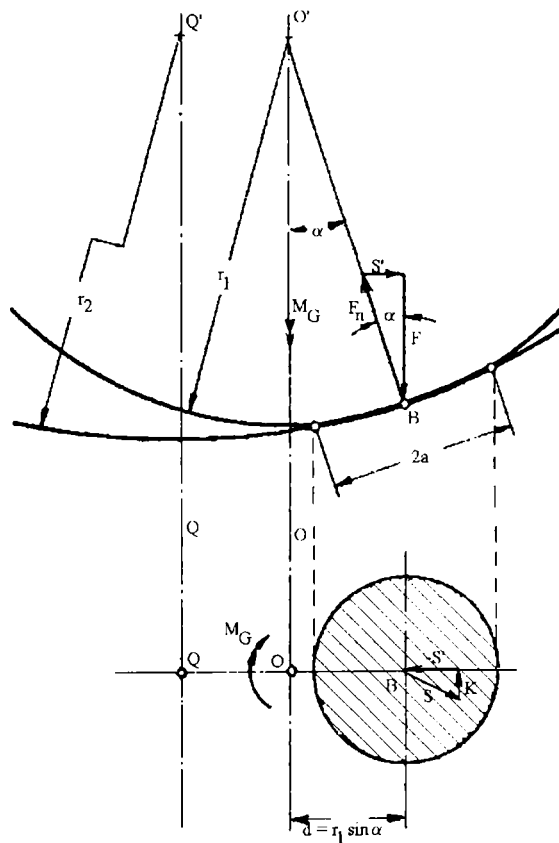


Fig. 4. 31 Deplasarea vârfului sub acțiunea forței exterioare S mai mari decât forța de frecare

(a) cazul $S > \mu F$

Expresia momentului de frecare este:

$$M_f = F \cdot d$$

$$M_f = \mu F_n r_1 \sin \alpha \quad (4. 68)$$

$$\sin \alpha = \frac{S'}{F_n}$$

Conform teoremei lui Pitagora în triunghiul format de forțele S, K (unde $K = \mu F_n$) și S', rezultă pentru S' expresia:

$$S' = \sqrt{S^2 - K^2} = \sqrt{S^2 - \mu^2 F_n^2} \quad (4.69)$$

iar din triunghiul format de forțele F_n , S' și F , rezultă:

$$F_n^2 = F^2 + S'^2, \quad (4.70)$$

din relațiile (4.70) și (4.71), pentru expresia forței S' , se obține succesiv:

$$\begin{aligned} F_n^2 &= F^2 + S'^2 - \mu^2 F_n^2 \\ F_n^2(1 + \mu^2) &= F^2 + S'^2 \\ \mu^2 F_n^2 \left(\frac{1}{\mu^2} + 1 \right) &= F^2 + S'^2 \end{aligned} \quad (4.71)$$

respectiv pentru S' rezultă:

$$S' = \sqrt{S^2 - \frac{F^2 + S^2}{1 + \frac{1}{\mu^2}}} \quad (4.72)$$

iar ținând cont de relația (4.70) pentru momentul de frecare se obține succesiv:

$$M_f = r_1 \sqrt{\mu^2 \left(S^2 - \frac{F^2 + S^2}{1 + \frac{1}{\mu^2}} \right)} \quad (4.73)$$

respectiv:

$$M_f = r_1 \sqrt{\frac{(S^2 - \mu^2 F^2)}{1 + \frac{1}{\mu^2}}} \quad (4.74)$$

Pentru presiunea uniform distribuită pe suprafața de contact și coeficientul de frecare μ constant, când întreaga sarcină F_n va fi concentrată în centrul de greutate B al suprafeței de presiune, rezultă:

$$M_f = \mu \cdot d \cdot F_n \quad (4.75)$$

Relația (4.75) nu redă mărimea reală a momentului de frecare, fapt exemplificat pentru calculul momentului de frecare în punctul O ($d=0$), unde:

$$M_f = \frac{2}{3} a \cdot F_n \cdot \mu \quad (4.76)$$

respectiv forma generală:

$$M_f = \xi \cdot a \cdot F_n \cdot \mu \quad (4.77)$$

În relația (4.77) $\xi = \frac{2}{3}$.

Pentru o suprafață de contact limitată, dependența momentului de frecare în raport cu distanța d , se determină prin considerarea suprafețelor elementare din interiorul suprafeței de contact, față de punctul de rotație O . (figura 4.32)

Această determinare a momentului frecării de pivotare pentru dimensiunile limită ale suprafeței de presiune, îmbunătățește precizia calculului.

Considerând tensiunea $\sigma = \sigma_{med} = \frac{F'_n}{\pi a^2}$, constantă pe suprafață și forțele de frecare concentrate în centrele de masă ale ariilor dA_1 respectiv dA_2 , figura 4.32, rezultă:

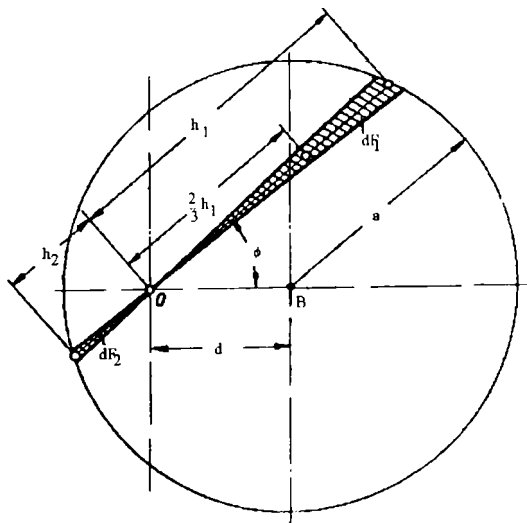


Fig. 4.32 Distribuția presiunilor de contact în lagărul pentru vârfuri, cu forță exterioră constantă

$$dM = dM_1 + dM_2 \quad (4.78)$$

unde:

$$dM_1 = \frac{2}{3} h_1 \cdot dF_1 = \frac{2}{3} \mu h_1 p \cdot dA_1 = \frac{2}{3} h_1 \mu p \frac{1}{2} h_1^2 d\varphi = \frac{1}{3} \mu p h_1^3 d\varphi \quad (4.79)$$

Analog, pentru dM_2 se va obține:

$$dM_2 = \frac{1}{3} \mu p h_2^3 d\varphi \quad (4.80)$$

deci pentru dM , ținând cont de relațiile (4.79) și (4.80) rezultă:

$$dM = \frac{1}{3} \mu p (h_1^3 + h_2^3) d\varphi \quad (4.81)$$

unde:

$$h_{1,2} = d \cos \varphi \pm \sqrt{a^2 - d^2 \sin^2 \varphi} \quad (4.82)$$

Funcție de situația $0 \leq d \leq a$, se obține d_1 pozitiv și d_2 negativ. Relația (4.79) devine:

$$dM = \frac{2}{3} \mu p \sqrt{a^2 - d^2 \sin^2 \varphi} (a^2 - d^2 + 4d^2 \cos^2 \varphi) d\varphi \quad (4.83)$$

iar pentru expresia momentului de frecare se obține, prin integrare, relația:

$$M = \frac{4}{3} \mu p a^3 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \frac{d^2}{a^2} \sin^2 \varphi} \left(4 \frac{d^2}{a^2} \cos^2 \varphi + 1 - \frac{d^2}{a^2} \right) d\varphi \quad (4.84)$$

Soluția integralei (4.84) eliptice de primă speță sub formă canonică [G3] pentru valori numerice [J1] este reprezentată în figura 4.33 .

În figura 4.33 s-a reprezentat pe aceeași diagramă variația coeficientului ξ în funcție de raportul d/a după relațiile (4.76) și (4.84). Se observă că exactitatea rezultatelor date de relația (4.76) scade pe măsură ce raportul (d/a) se micșorează și odată cu creșterea valorii raportului, după relația (4.84), graficul are o alură asimptotică la variația dată de relația (4.76).

Analizând relația (4.75) se constată că cele afirmate nu-și pierd valabilitatea, cu toate că suprafața de contact nu este încărcată uniform. Dacă valoarea unghiului α se micșorează, deci se micșorează valoarea forței S , rezultatele date de această relație devin mai puțin precise, întrucât raportul dintre brațul d și raza cercului de contact va fi mai mic. Frecarea de pivotare apare în cazul $S = 0$ iar frecarea de derapare (alunecare) apare în situația $S \geq \mu F$. Între aceste situații extreme apare un câmp în care

au loc fenomene bazate pe alte legi, neinvestigate până acum.

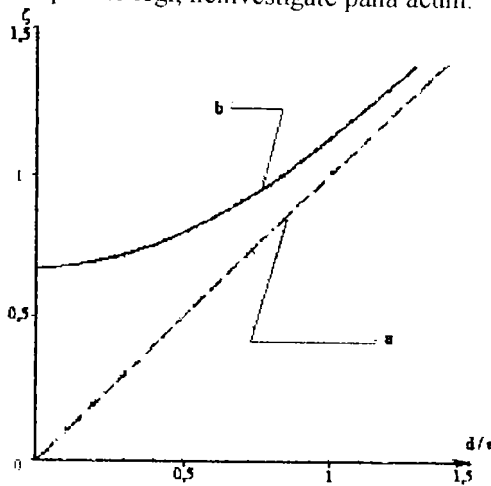


Fig. 4. 33 Variația coeficientului ξ funcție de raportul d/a

a-după relația 4.76. b- după relația 4.84

(b) cazul $S \leq \mu F$

Suprafața de contact a vârfului cu calota lagărului se deplasează, frecarea de derapare (alunecare) dispare și apare frecarea de pivotare cu rostogolire. Pentru studiul acestei situații s-a considerat diagrama din figura 4.34

Când axul vârfului nu este încărcat cu o sarcină radială S , axa de rotație a acesteia OO' trece prin centrul B al suprafeței de contact. Viteza punctelor aflate în contact are valoarea $v_G = v_0$ cu excepția punctului B a cărui viteză este nulă (mișcare de pivotare). Sub acțiunea forței radiale S începe mișcarea pentru "fixarea" vârfului într-o anumită poziție a calotei lagărului. Frecarea de pivotare se micșorează la apariția forței S , deci la apariția mișcării pentru fixare, întrucât progresiv apare o frecare de alunecare și o frecare de rostogolire. Direcția C , după care are loc rostogolirea, rezultă din rotația axei vârfului în lagăr, precum și din geometria suprafețelor celor două elemente și este perpendiculară pe raza ce pleacă din punctul Q . Axa vârfului OO' se deplasează pe periferia unui cerc de diametru QO , în timp ce centrul B al suprafeței de contact se deplasează pe periferia unui cerc de diametru QB . Vitezele care corespund fixării punctului B și axei OO' sunt v_B , respectiv v_O și sunt proporționale cu distanțele față de punctul Q . Dacă suprafața de contact ar cuprinde și punctul O , atunci viteza de derapare (alunecare) ar trebui să fie în acest punct $v_G = v_0$ și să scadă liniar, devenind nulă în punctul B (în B cele două suprafețe în contact se rostogolesc fără

alunecare).

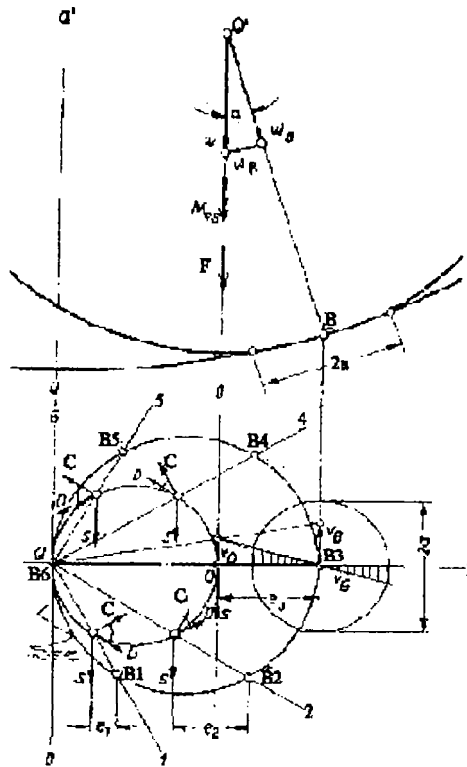


Fig. 4 34 Deplasarea vârfului sub acțiunea forței exterioare S mai mici decât forța de frecare

Se remarcă faptul că în timp ce forța S își păstrează direcția în timpul mișcării, forțele corespunzătoare pentru "fixarea" în lagăr își modifică direcția necontenit. Momentul rezistent rezultat M_{R3} (de rostogolire și pivotare) se obține din însumarea momentelor corespunzătoare mișcării de pivotare respectiv de rostogolire, considerate în raport cu axa OO' . Intrucât M_{R3} este dependent de unghiul α , rezultă că, în domeniul studiat în care apare frecarea de pivotare cu rostogolire, momentul nu poate fi determinat exact, acesta schimbându-și valoarea odată cu poziția vârfului.

Determinarea mărimii forței exterioare este importantă pentru stabilirea valorii momentului de frecare.

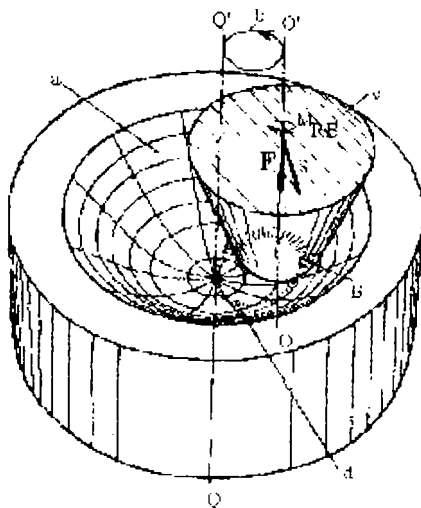


Fig. 4. 35 Deplasarea pivotului în calota cuzinetului. a-calota. b-deplasarea axei pivotului OO' . c-vârful pivotului. rostogolirea vârfului în calotă. B-polul de rostogolire. F-încărcare axială. S-forța exterioară constantă. QQ' -axa calotei. M_{101} -moment de pivotare și rostogolire

Soluția presupune determinarea vitezei de alunecare a suprafeței unitare (infinit mici) din interiorul suprafeței de contact de diametru AC. Viteza unghiulară a vârfului rămâne constantă. Atât timp cât nu apar forțe exterioare (radiale), repartiția vitezei de alunecare pe diametrul AC rămâne cea reprezentată cu linie întreruptă în figura 4.36

Vitezele de alunecare în A și C sunt v_A . Între aceste puncte viteza variază liniar și va fi nulă în polul de rotație B. Această repartiție de viteze se modifică atunci când echipajul mobil (rotativ) va aluneca față de suport cu o viteză de alunecare v_S . Repartiția de viteze pe AC rămâne o dreaptă, paralelă cu cea inițială și va trece prin polul O.

În C viteza de alunecare va fi $v_A + v_S$, în punctul B $-v_S$, în O zero și în A $-v_A - v_S$. Pentru a menține constantă această stare, trebuie determinată valoarea forței S. Pentru aceasta se consideră că suprafața de contact se rotește în jurul polului instantaneu de rotație O, și deci, deoarece toate forțele de frecare cuprinse între arcele GAD și DEG sunt simetrice, rezultanta lor va fi doar de tip moment. Ele nu intervin în valoarea forței S. Numai forțele care apar în suprafața în formă de semilună influențează deplasarea.

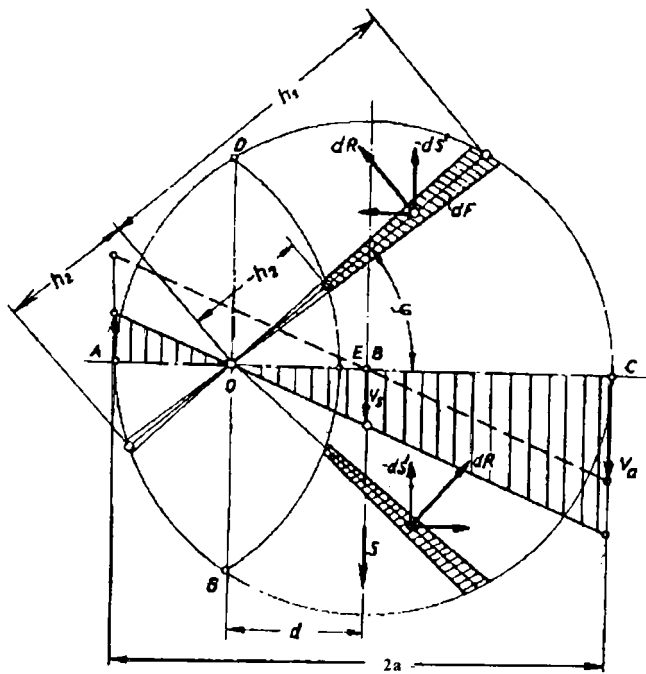


Fig. 4. 36 Schița pentru determinarea mărimii forței exterioare S

Determinarea ariei suprafeței elementare dF

$$dF = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2} d\varphi \quad (4. 85)$$

permite calcului forței de frecare infinit mici dR în mișcarea de rotație, care depinde de mărime și direcție de unghiul φ . Direcția ei este întotdeauna normală pe raza vectorială din O, în timp ce mărimea ei este

$$dR = dF \cdot \sigma \cdot \mu \quad (4. 86)$$

Această forță se descompune după două direcții (una perpendiculară și una paralelă pe direcția forței S). Se pune astfel în evidență că la preluarea forței S participă doar cele paralele cu dS'. Componentele pe direcția paralelă cu AC se vor echilibra datorită simetriei și vor interveni doar în expresia momentului de frecare. Componentele dS' se însumează și echilibrează forța S. Mărimea dS' este dependentă

de φ :

$$dS' = dR \cos \varphi \quad (4.87)$$

Ținând cont de relația (4.83) și de raportul

$$\frac{d}{a} = \frac{v_s}{v_A} \quad (4.88)$$

mărimea forței va fi:

$$S' = -S = \frac{4v_s}{\pi \cdot v_A} N\mu \int_0^{\pi} \cos^2 \varphi \sqrt{1 - \frac{v_s^2}{v_A^2} \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (4.89)$$

Rezultatele sunt cuprinse în figura 4.37

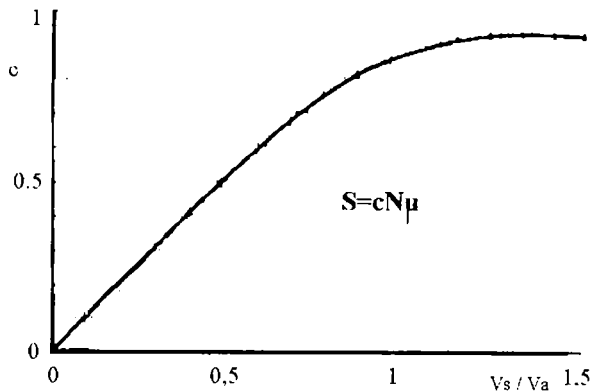


Fig. 4. 37 Influența raportului v_s/v_A asupra forței S

Forța de alunecare (derapare) S este, deci, o funcție de raportul v_s/v_A . Pentru valori mici ale acestui raport, forța S este mică față de forța de frecare normală μN . Odată cu creșterea acestui raport, S crește asimptotic spre μN .

Se deduce astfel că, dacă asupra unui vârf aflat în mișcare de rotație acționează o forță $S < \mu N$, se inițiază și se întretine o mișcare de rotație a axei vârfului față de calota sferică.

Un alt caz de studiu al frecării în lagărele pentru vârfuri (în poziție verticală) este situația când forța radială S își modifică neconținut direcția, executând o mișcare de rotație împreună cu echipajul mobil al aparatului (figura 4.19 b). Această situație apare în sistemele magnetice, la stări de dezechilibru. Forța S' "împinge" vârful în afară, axa acestuia se va deplasa, rotindu-se în jurul axei sistemului QQ'. În timpul mișcării suprafața de contact de pe vârf rămâne aceeași, în timp ce cea de pe calotă se schimbă, deplasându-se cu viteza corespunzătoare mișcării de rotație. În aceste

condiții, momentul datorită frecării de derapare (alunecare) se determină similar cu cel prezentat în cazul forței radiale constante cu precizarea că în locul razei pivotului r_1 cu raza calotei r_2 .

$$M_f = r_2 \sqrt{\frac{S^2 - F^2 \mu^2}{1 - \frac{1}{\mu^2}}} \quad (4.90)$$

Deci, în situația $F < \mu N$ are loc o mișcare complexă. Momentul de frecare total este variabil și deci greu de apreciat calitativ. El este dat de relația:

$$M_{tot} = M_{frecare} - M_{pivotare} \cos \alpha + M_{rostogolire} \sin \alpha \quad (4.91)$$

Rezultă că, momentul de frecare total nu este constant, deoarece intervine unghiul α , variabil, dependent de poziția momentană a axului.

Toate aceste considerații sunt valabile doar când în lagărul superior jocul axial este suficient de mare ca să-i asigure un grad de libertate după această direcție și dacă forța exterioară este mică în raport cu încărcarea. Dacă forța exterioară devine preponderentă atunci calculul se face similar cu sprijinirile orizontale.

La multe aparate de precizie se cere ca momentul de frecare din lagăr să fie constant. Din cele prezentate reiese, că lagărele pentru vârfuri nu sunt recomandabile în asemenea situații sau trebuie utilizate cu multă precauție.

4.4 Considerații finale privind bazele teoretice ale calculului și funcționării lagărelor pentru vârfuri

Pentru proiectarea lagărelor pentru vârfuri se disting 2 căi:

- se admite $\sigma_{\max \text{ admis}}$ și rezultă raza pivotului r_1 respectiv momentul de frecare M_f ;
- se impune eroarea de citire γ (pentru un caz concret) și rezultă raza pivotului r_1 respectiv momentul de frecare M_f .

Parametrii rezultați în urma calculului, r_1 , raportul k , momentul de frecare M_f și eroarea de citire γ conduc la precizarea formei și dimensiunilor pivotului și cuzinetului optim.

Dacă tensiunea maximă este depășită (accidental), atunci toate ipotezele luate în considerație anterior își pierd valabilitatea, deoarece deformațiile nu se mai găsesc în domeniul elastic ci trec în cel plastic. Acest fapt a fost pus în evidență de experimente [K2].

Elementele lagărului trebuie prelucrate îngrijit deoarece în caz contrar erorile de calcul pot crește necontrolat, momentul de frecare devenind mult mai mare decât cel dorit.

S-a constatat practic că cea mai mică impuritate ajunsă în zona de contact poate influența defavorabil comportamentul lagărului.

Incercări [K2] au arătat că momentul de frecare crește în urma oxidării vârfului. Procesul poate afecta în continuare negativ funcționarea lagărului prin faptul că desprinderile de oxizi se depozitează în cavitatea cuzinetului.

Din motive asemănătoare din punct de vedere al comportamentului aceste lagăre nu se ung decât în cazuri deosebite. Cu timpul lubrifiantul din lagăr acționează defavorabil prin:

- deteriorarea calităților lui,
- colectarea și depozitarea particulelor din mediu.

5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE

Analiza comportamentului lagărelor pentru vârfuri a făcut obiectul mai multor cercetări sistematice [D2, F1, P1, K3, S5, H1, T4]. Studiile menționate s-au efectuat pentru regimuri tranzitorii (oprire / pornire). În lucrarea de față se analizează comportamentul lagărelor pentru vârfuri atât în perioada de funcționare în regim stabilizat (§5.4.1) cât și în regim tranzitoriu (pornire / oprire §5.4.2).

Cum s-a remarcat în capitolele anterioare, momentul de frecare este un indicator pentru analiza acestor tipuri de microlagăre.

O schemă de principiu a standului proiectat inițial este prezentată în figura 5.1

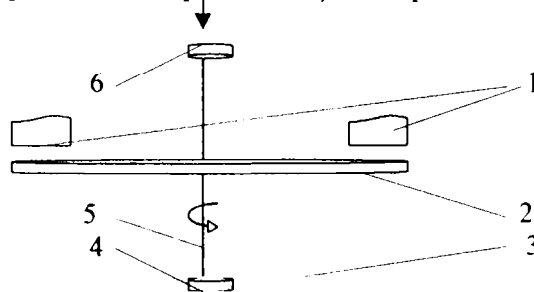


Fig. 5. 1 Schema de principiu pentru măsurarea momentului de frecare pe cale tensometrică

1-sistem de antrenare al discului, 2-disc din aluminiu, 3-traductor, 4-lagăr inferior, 5-ax, 6-lagăr superior

În vederea determinării momentului de frecare din lagărele pentru vârfuri, s-a proiectat și realizat un traductor 3 (figura 5.2), cu elemente elastice, din lamele de oțel arc de grosime 0.1 mm, pe care s-au lipit timbre tensometrice cu baza de 1,5 mm.

Lamelele au fost dispuse echidistant la 120°, și s-a urmărit realizarea unei rigidități mari în direcție axială și minimă față de preluarea momentelor de torsiune (față de aceeași axă).

Cele 4 timbre tensometrice lipite pe două lamele au format o punte completă.

Traductorul este prezentat în figura 5.2.

Sprijinirea pivotului s-a asigurat prin cuzinetul din centrul traductorului. Antrenarea discului s-a proiectat a se realiza prin intermediul unui motor homopolar simetric 1.

Discul în mișcarea sa de rotație provoacă în lagărul inferior 4 un moment de frecare care se transmite traductorului și produce deformarea lamelelor elastice.

Standul a permis modificarea rapoartelor razelor pivotului și cuzinetului, precum și a încărcării axiale.

Intrucât în prima fază nu s-a putut măsura momentul de frecare, s-a încercat mărirea sensibilității traductorului până la limita admisă de rigiditatea axială

Cu toate acestea, semnalul obținut a fost foarte mic, însoțit de un nivel mare de zgomot, motiv pentru care soluția imaginată și realizată a fost abandonată.

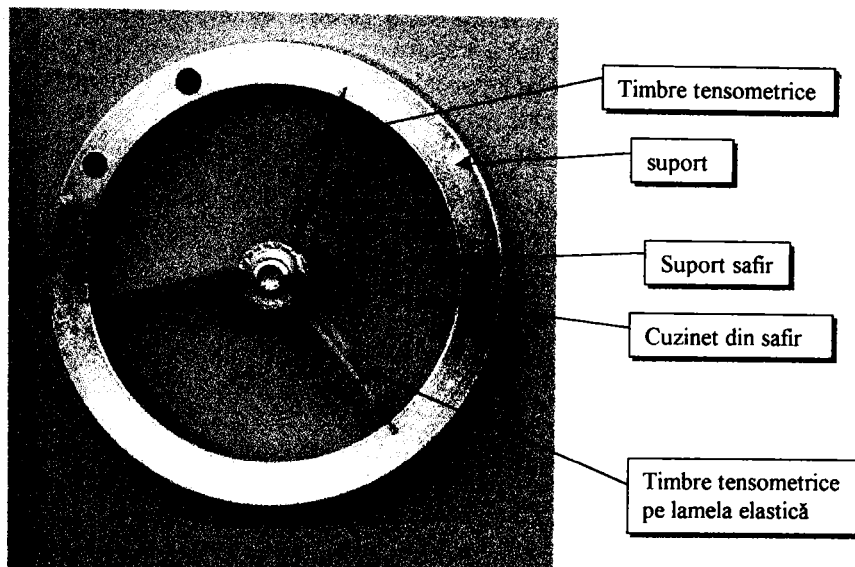


Fig. 5. 2 Traductor cu lamele elastice

S-a constatat că momentul de frecare la aceste lagăre este foarte mic, de ordinul fracțiunilor de μNm motiv pentru care în cadrul programului de cercetări experimentale a fost necesară abordarea altor soluții.

5.1 Instalații experimentale pentru încercări în regim stabilizat

În literatura de specialitate nu sunt prezentate soluții de instalații de încercarea a lagărelor pentru vârfuri în regim stabilizat. În prezenta cercetare, experimentele s-au axat pe direcțiile: -determinării momentului de frecare și -stabilirii (comparativ) perechii de pivot / cuzinet, pentru care pierderea prin frecare este minimă.

5.1.1 Stand pentru determinarea momentului de frecare

Standul este prezentat schematizat în figura 5.3.

Antrenarea discului 1 se face prin intermediul momentului de frecare (moment comutabil) din lagărul inferior 6, care acționează în regim de cuplaj cu fricțiune. Antrenarea cuzinetului lagărului inferior se face prin intermediul platanului unui pick-up. Odată cu rotirea axului, arcul spiral 9 fixat pe axul 1 se deformează datorită sprijinirii pe suportul 8 și nu permite rotirea completă a discului, ci doar o deplasare unghiulară, care pentru o turație constantă se stabilizează la o anumită valoare, care se citește cu ajutorul raportorului 10 fixat corespunzător. Mărimea acestui unghi este proporțională cu pierderile prin frecare în lagărul inferior.

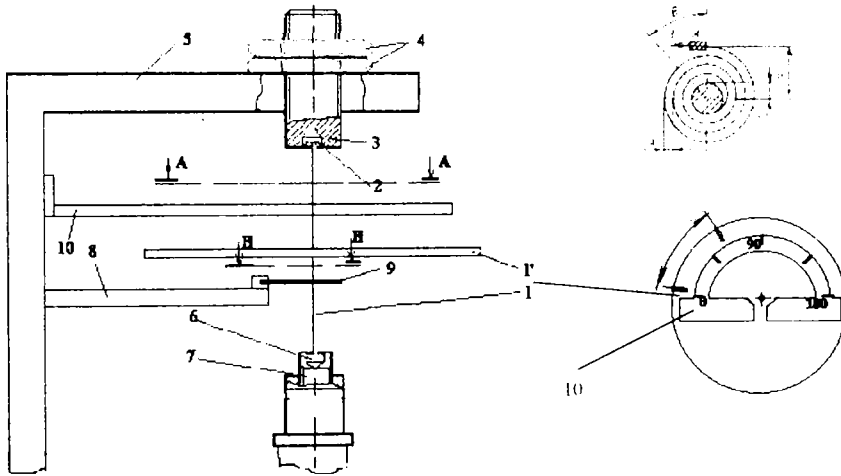
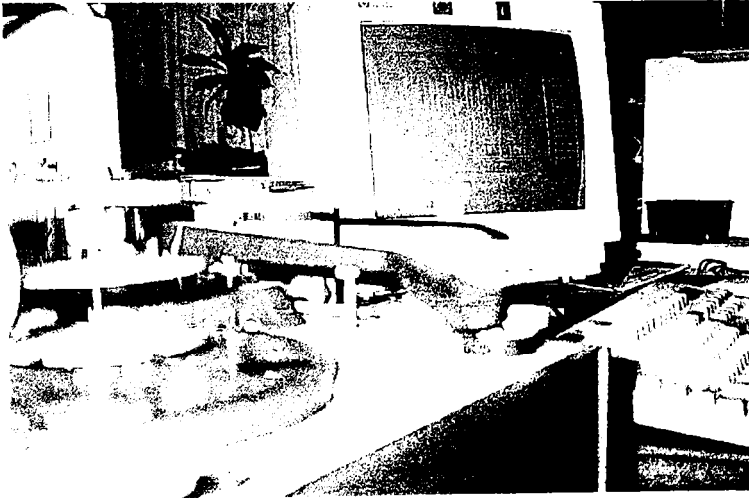


Fig. 5. 3 Stand pentru determinarea momentului de frecare

1 - ax oțel inox; 1' - disc antrenat (Al); 2 - lagăr superior (safir); 3 - suport lagăr superior; 4 - piuliță-contrapiuliță; 5 - cadru suport; 6 - lagăr inferior (safir); 7 - suport lagăr inferior; 8 - suport pentru sprijinire arc; 9 - arc spiral; 10 - raportor).

5.1.2 Stand pentru determinarea raportului optim al razelor (cuzinet/pivot) în regim stabilizat

Standul pentru încercări este prezentat în figura 5.4 a și b, iar schematic în figura 5.5.



a.



b.

Fig. 5. 4 Stand pentru încercări la turație constantă

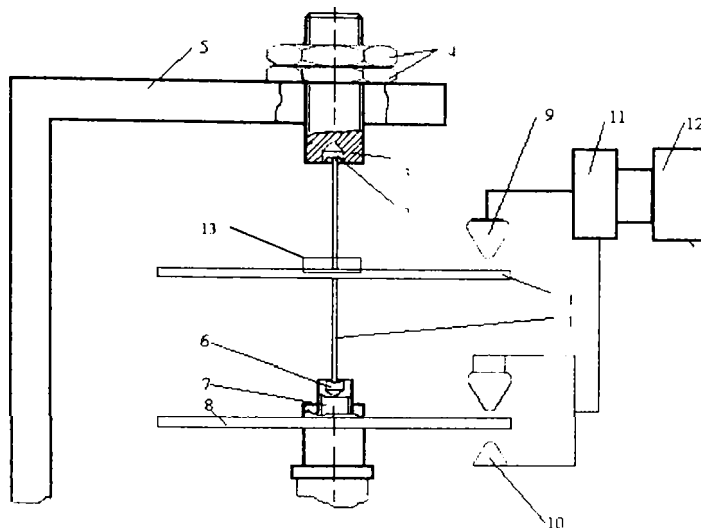


Fig. 5. 5 Schema de principiu a standului de măsurare a pierderilor prin frecare în regim stabilizat

1 - ax oțel inox; 1' - disc antrenat (Al); 2 - lagăr superior (safir); 3 - suport lagăr superior; 4 - piuliță-contrapiuliță; 5 - cadru suport; 6 - lagăr inferior (safir); 7 - suport lagăr inferior; 8 - disc (aluminiu) pentru determinarea turațiilor sistemului de antrenare; 9 - lector optic (prin reflexie); 10 - lector optic (prin transparență); 11 - placă de achiziții; 12 - calculator; 13 - greutate pentru încărcarea axială

Suportul 7 este solidar cu sistemul de antrenare al unui pick-up firma Telefunken AEG, cu 4 trepte de turație, care permite obținerea unei viteze unghiulare constante (fluctuație de viteză mai mică de 0,2 %). Axul 1 cu discul 1' este antrenat în mișcarea de rotație datorită frecării dintre lagărul 6 și vârful inferior al axului 1.

Turația discului 1' este o mărime proporțională cu frecarea din lagărul inferior 6. Cu cât alunecarea (rămânerea în urmă) discului 1' în raport cu mișcarea discului 8, este mai mare cu atât frecarea din lagărul 6 este mai mică.

Mișcarea este evidențiată cu ajutorul lectorilor optici 9 respectiv 10. Citirea semnalelor date de discul 1', se începe după stabilizarea mișcării platanului pick-up-ului (identică cu a discului 8).

O imagine detaliată a discului antrenat este redată în figura 5.6.

Încercările au fost efectuate pentru:

- 4 trepte (standard) de turație (16, 33, 45, respectiv 78 rot/min),
- 5 dimensiuni ale razei fusului axului
- 5 dimensiuni ale razei cuzinetului sferic
- 2 dimensiuni ale razei cuzinetului conic
- 6 trepte de încărcare axială

prin care s-a acoperit întregul domeniu cinematic și geometric uzual.

¹ National Instruments

Lectorul optic 9 este legat la portul de intrare al plăci de achiziții 11, care este conectată cu calculatorul 12. Achiziția datelor și prelucrarea lor preliminară se face cu ajutorul programului VirtualBench².

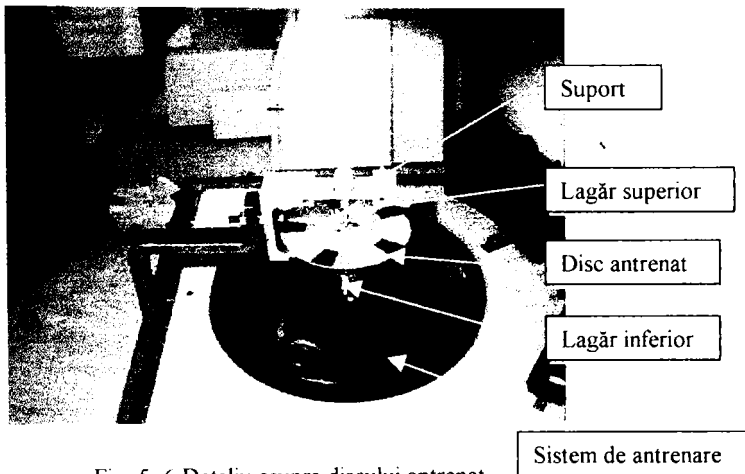


Fig. 5.6 Detaliu esurii discului antrenat

Schema electronică a cititorului optic, prin reflexie, este prezentată în figura 5.7.

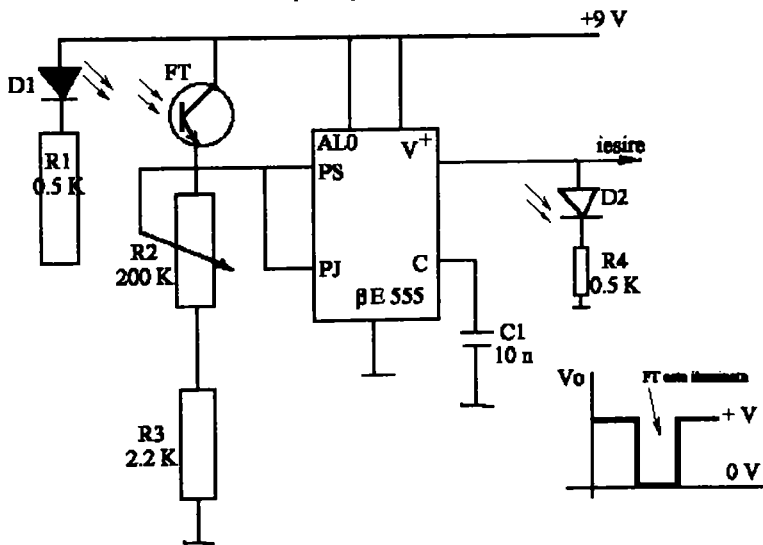


Fig. 5.7 Schema cititorului optic (prin reflexie)

² Program consacrat pentru achiziția și prelucrarea preliminară, a datelor preluate de placa de achiziții

Lectorul optic realizat cu diodă luminescentă D_1 și fototranzistorul FT utilizează circuitul integrat $\beta E 555$ în conexiune de trigger Schmitt. Impulsurile de ieșire realizează semnal treaptă cu fronturi abrupte. Prin inversarea fototranzistorului FT cu ansamblul de rezistențe $R_2 + R_3$, logica se inversează. Cu ajutorul potențiometrului R_2 se reglează sensibilitatea montajului. Intregul ansamblu a fost introdus într-un tub cilindric cu diametrul de 20 mm și lungimea de 100 mm. Montajul funcționează într-un domeniu larg de alimentare, de la +5 ... +15 V fiind compatibil TTL sau CMOS.

Schema de conectare a plăcii de achiziție și imaginea redată cu ajutorul soft-ului VIRTUALBENCH sunt prezentate în figura 5.8.

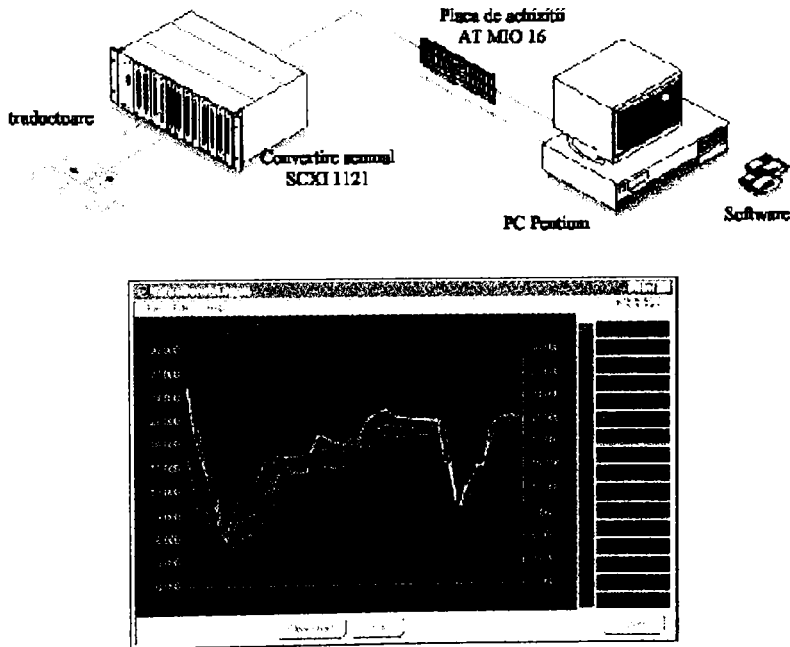


Fig. 5. 8 Principiu de achiziție a datelor

Încărcarea axială a discului, și implicit a lagărului inferior a fost realizată prin intermediul greutateilor 13. Plasarea acestora s-a făcut concentric cu axul în partea superioară a axului prin deșurubarea piuliței 4. Tot prin această manevră se realizează schimbarea probei (a axului 1 cu cele două fusuri). Pentru o funcționare corectă se impune efectuarea unei reglări atente după orice intervenție asupra probei.

Discul 1', are 5 marcaje plasate echidistant pe circumferința sa, iar discul 8 are 6 decupări echidistante.

5.2 Instalația experimentală pentru încercări în regim tranzitoriu

În figura 5.9 este prezentat standul cu ajutorul căruia s-au făcut încercări pentru regim tranzitoriu (pornire / oprire) de funcționare a lagărelor pentru vârfuri.

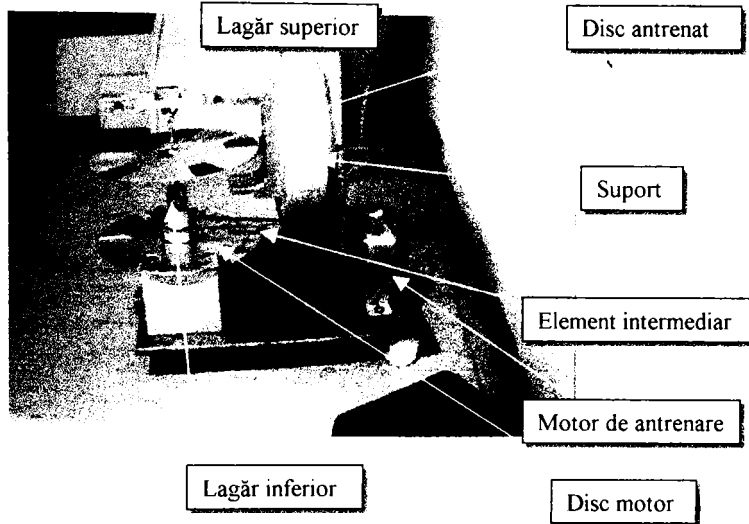


Fig. 5. 9 Stand pentru încercări în regim tranzitoriu

Ca și în cazul precedent, mișcarea imprimată discului condus este rezultatul frecării din lagărul inferior. Acesta este antrenat în mișcarea de rotație de la un motor de curent continuu³ cu ajutorul elementului intermediar. Citirea semnalelor s-a făcut în condiții similare ca și la instalația prezentată la §5.1.2.

Pentru estimarea perechii optime, pivot / cuzinet, în regimul de funcționare tranzitoriu, s-au efectuat încercări prin combinarea a 3 mărimi de cuzineți, 5 raze de pivot pentru 3 valori ale încărcării (0,22; 0,45 respectiv 0,65 N), la turația de 100 rot / min a discului motor.

Schimbarea epruvetelor precum și încărcarea axială s-a făcut în mod identic ca în cazul tratat anterior.

³ de la un casetofon deck. "Electromureș".

5.3 Metoda de investigare

Intrucât se urmărește optimizarea construcției lagărului, respectiv găsirea unei perechi optime pentru pivot și cuzinet s-a convenit la:

-analiza frecării în lagărul inferior precum și influența diverșilor parametri (raze pivot / cuzinet, sarcină axială, turație – la regim constant- și regim tranzitoriu) asupra pierderilor prin frecare;

-analiza influenței raportului razelor asupra preciziei de indicație.

Semnalele prelevate au fost prelucrate convenabil și transformate în așa fel încât să indice intervalul de timp dintre două impulsuri consecutive.

Datorită multitudinii de mărimi ce influențează încercările tribologice și datorită complexității acestora este necesară o planificare și o evaluare atentă a verificărilor.

În etapele convenționale ale verificărilor care se fac în laboratoare se alege o anumită mărime de măsurare sau de încercare (y) funcție de o singură variabilă independentă (x) (ex.: viteza unghiulară, sarcină axială)

Toți ceilalți parametri (și condiții) se mențin constanți. Prin modificarea variabilei independente (x_1) într-o serie de încercări se obține o relație de forma:

$$y = f(x_1) \quad (5.1)$$

În seriile următoare de încercări se vor evidenția influențele altor variabile independente (x_2). În timpul a două succesiuni de încercări se poate pune în evidență o dependență tridimensională între mărimea de măsurare sau de încercare (y) și variabilele independente (x_1, x_2) de forma:

$$y = f(x_1, x_2) \quad (5.2)$$

Avantajul unor asemenea succesiuni de încercări, prin modificarea unei singure variabile independente constă în faptul că influența acestei variabile asupra mării măsurate poate fi pus în evidență foarte clar. Dar astfel efortul experimental pentru a aprecia influența mai multor variabile independente asupra mării măsurate crește considerabil.

În cadrul măsurătorilor efectuate s-a modificat succesiv câte un singur parametru. Volumul de măsurători efectuate este reprezentat în figura 5.10.

Pe axa Ox, s-a reprezentat variația turației (pentru cele 4 valori), pe axa Oy, treptele de încărcare cu forța axială. Spațialitatea (Oz) acestei reprezentări este materializată de o singură modificare a razei pivotului (a vârfului inferior axei 1). În cadrul măsurătorilor, au avut loc 5 modificări ale razei r_1 (a pivotului). Volumul astfel obținut a fost reluat pentru 7 valori ale razei cuzinetului inferior (5 pentru cuzinet sferic și 2 pentru cuzinet conic).

În urma efectuării încercărilor s-au obținut 720 de fișiere. Intrucât o măsurătoare s-a efectuat timp de 1 minut, cu o frecvență a citirilor la intervale de 0,01

secunde, fiecare fișier conține 6000 valori. Pentru a face o analiză corectă, fiecare măsurătoare s-a reluat de 3 ori.

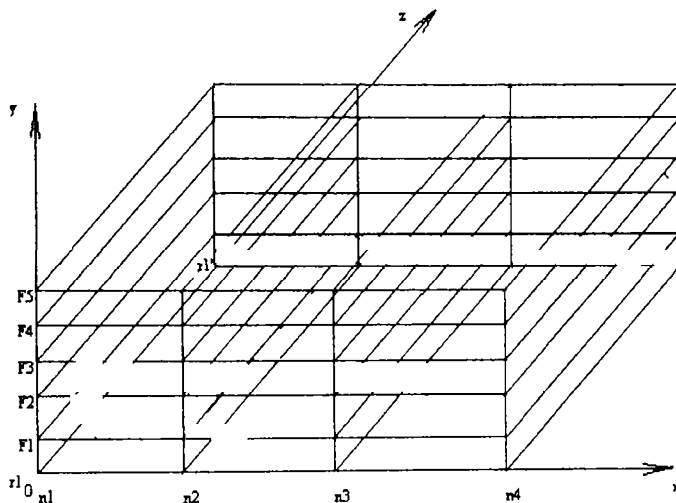


Fig. 5. 10 Matrice de efectuare a măsurătorilor

5.4 Prelucrarea rezultatelor

5.4.1 Incercări în regim stabilizat

A – determinarea momentului de frecare

Cu ajutorul standului din figura 5.3 s-au efectuat măsurători pentru:

- 2 tipuri de cuzinet (cu razele $r_2 = 0.75\text{mm}$, $r_2 = 1.7\text{mm}$)
- 2 mărimi de pivot (cu razele $r_1 = 0.3\text{mm}$, $r_1 = 0.5\text{mm}$)
- 2 trepte de turație (16 rot/min și 33 rot/min)
- o treaptă de încărcare ($F=0,22\text{ N}$)

Arcul spiral 9 (figura 5.3) fixat pe axul 1 (prin lipire) a fost etalonat în prealabil. În figura 5.11 este prezentată dreapta de etalonare.

Etalonarea s-a realizat prin măsurarea deviației unghiulare a capătului liber al unui arc spiral încărcat cu greutăți etalonate.

În tabelul 5.1 sunt prezentate valorile obținute în cadrul măsurătorilor pentru

diverse valori ale raportului razelor, și valoarea momentului de frecare determinat cu ajutorul dreptei de etalonare.

Etalonarea arcului

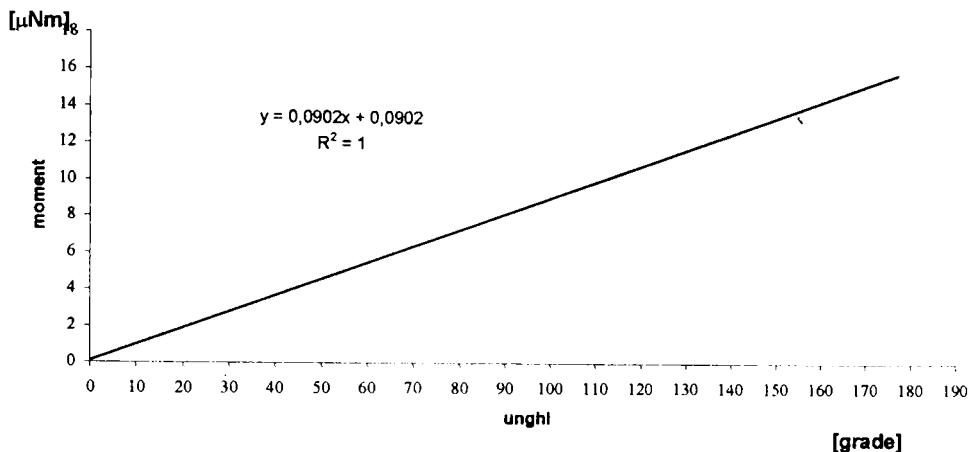


Fig. 5. 11 Etalonarea arcului spiral

Tabelul 5. 1

Raportul razelor k	Pereche cuzinet/pivot	Unghi deviație θ_{16} [grade]	Moment de frecare M_{f16} [μNm]	Unghi deviație θ_{33} [grade]	Moment de frecare M_{f33} [μNm]
3.4	2-05	55	5.5	50	5.0
5.66	2-03	50	5	48	4.8
2.5	1-03	58	5.8	52	5.2

Se constată că momentul de frecare determinat experimental este cu un ordin de mărime mai mare decât cel teoretic, considerat în condiții ideale, forță de încărcare centrat în punctul minim al cavității cuzinetului. În realitate fenomenele prezentate în § 4.3 au o influență remarcabilă, ca și starea suprafețelor § 4.5 respectiv ale mediului ambiant.

B - determinarea raportului optim al razelor

Semnalele prelevate de la lectorul optic 9 (figura 5.2) sunt semnale tip treaptă, figura 5.12.

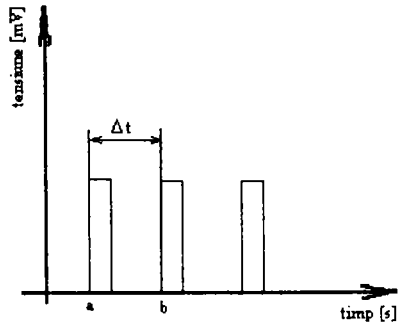


Fig. 5.12 Alura semnalului tip treaptă

Deoarece montajul electronic al circuitului cititorului optic nu permite o descărcare instantanee, semnalul tip treaptă este deformat, astfel că o înregistrare are forma din figura 5.13.

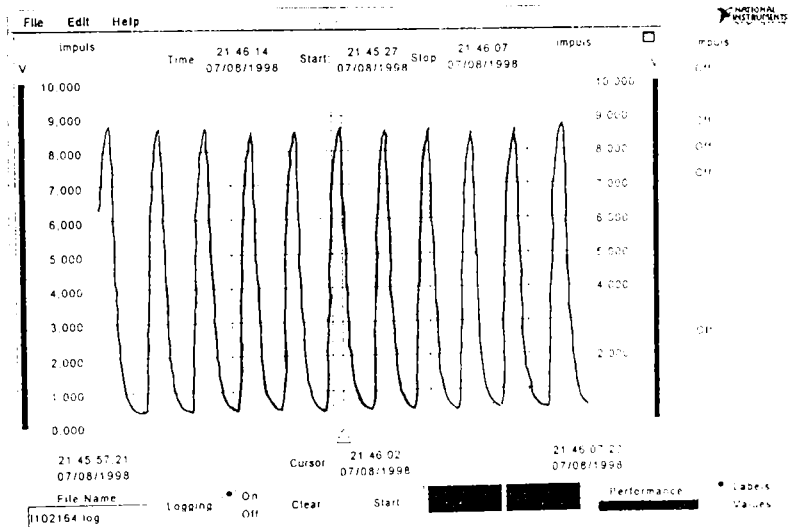


Fig. 5.13 Forma ecranului pentru o fracțiune dintr-o măsurătoare

In partea inferioară, în caseta corespunzătoare denumirii fișierului s-a trecut, pentru ușurința prelucrărilor datelor, un cod format din 6 cifre, figura 5.14 (și prefixul “1” pentru cazul cuzinetului din safir lustruit), care reprezintă:

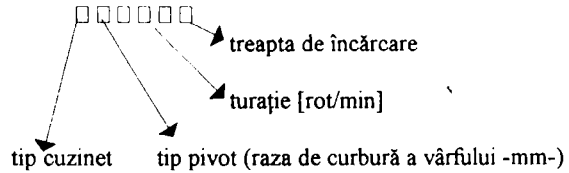


Fig. 5.14 Simbolizare a fișierelor prelucrate

In figurile 5.15 ÷ 5.18, sunt prezentate 8 înregistrări, pentru cuzinetul 1 și 2 (cu razele $r_2 = 0,75$ respectiv $r_2 = 1,7$ mm) în combinație cu pivoții cu razele r_1 de 0,2 și 0,3 mm la turațiile de 16, 33 și 45 rot/min pentru treptele de încărcare 0, 2 și 3 (respectiv 0,22 N, 0,39 N și 0,46 N).

In figura 5.19 este prezentat un exemplu de fișier creat prin programul Virtual Bench în urma achiziției de date.

In urma studierii atente a înregistrărilor, se constată o scădere a intervalului de timp dintre două semnale în cazul:

- creșterii încărcării axiale (figura 5.15b față de 5.15a, 5.16 b față de 5.16a)
- creșterii turației (figura 5.16a față de figura 5.15a, figura 5.17b față de 5.17a, figura 5.18b față de 5.18a)
- creșterii razei pivotului (figura 5.17a față de 5.18a, figura 5.17b față de 5.18b).

Această analiză pune în evidență faptul că pierderile prin frecare (experimentale) în lagărele pentru vârfuri sunt influențate de raportul razelor, de viteza unghiulară și de încărcarea axială, fapt pus în evidență din punct de vedere teoretic în cap. 4.

Pentru determinarea turației discului condus, din fișierele obținute, s-au “citit” valorile timpului pentru momentele “a”, “b”, șamd, conform figurii 5.11., și prelucrate conform organigramei din figura 5.20.

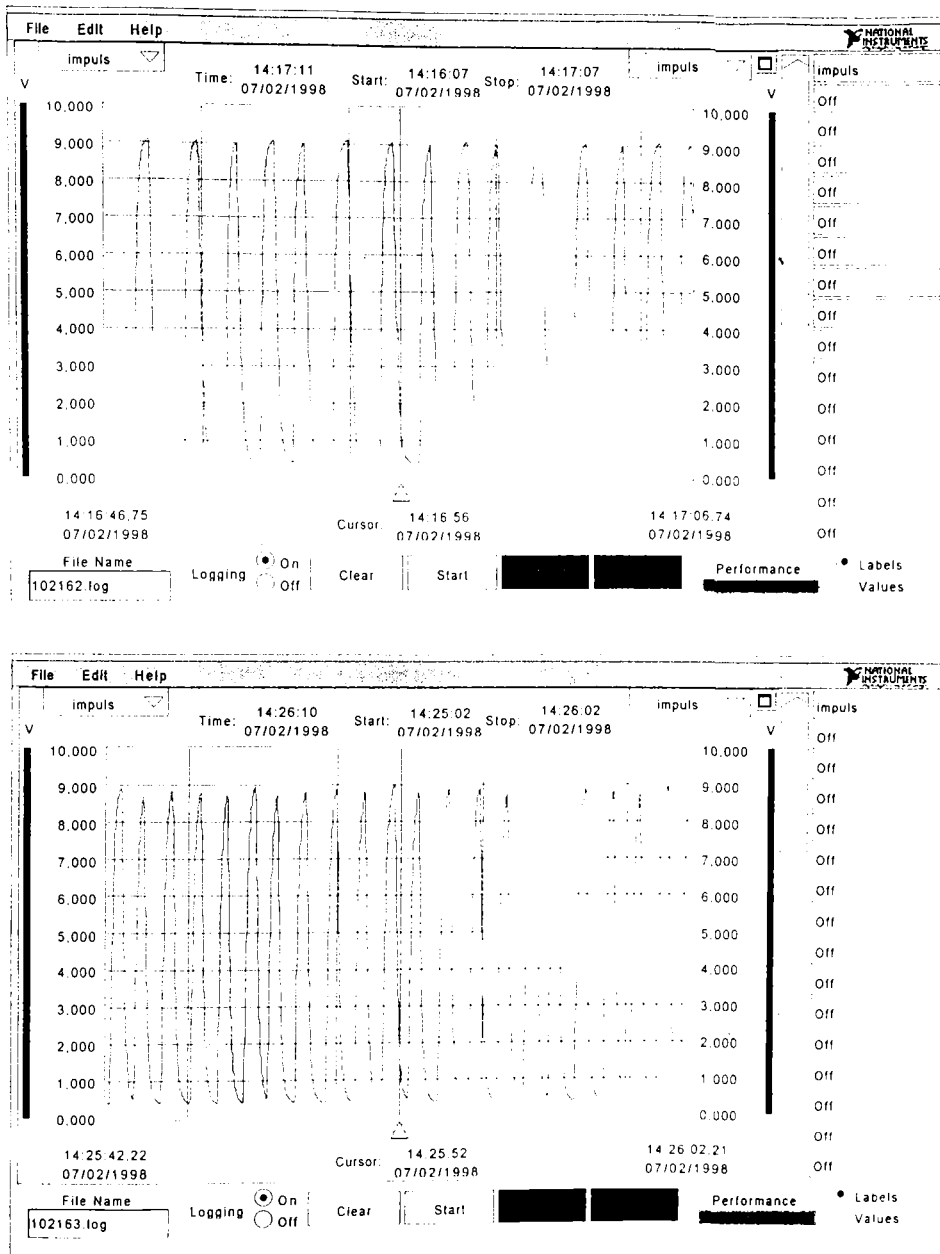


Fig. 5. 15 Inregistrări la turația de 16 rot/min pentru cuzinetul 1, pivotul cu raza de 0,1mm la treapta 2 și 3 de încărcare; a-102162 b-102163

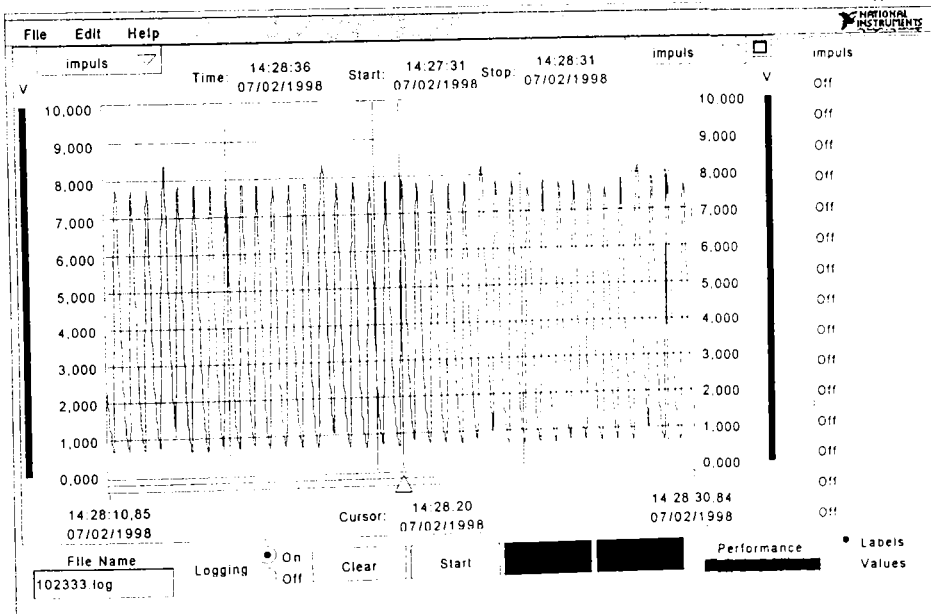
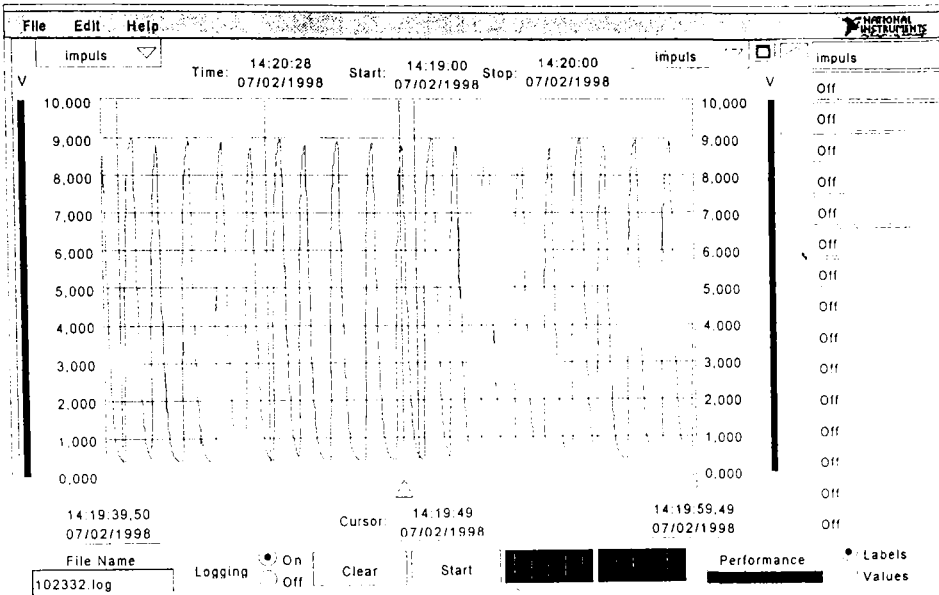


Fig. 5. 16 Înregistrări la turația de 33 rot/min pentru cuzinetul 1, pivoții cu razele de 0,2mm și 0,3mm la treptele 2 și 3 de încărcare; a-102332 b-102333

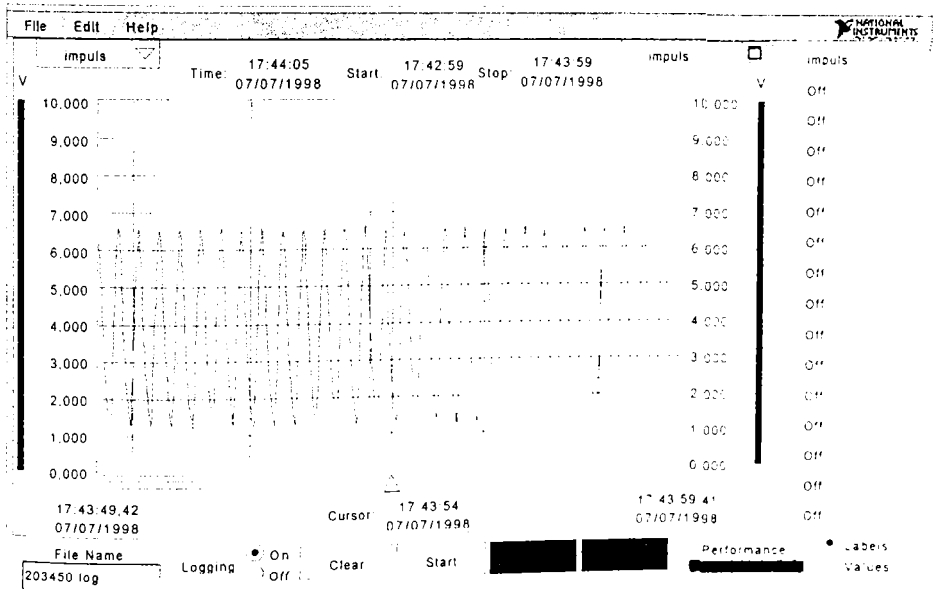
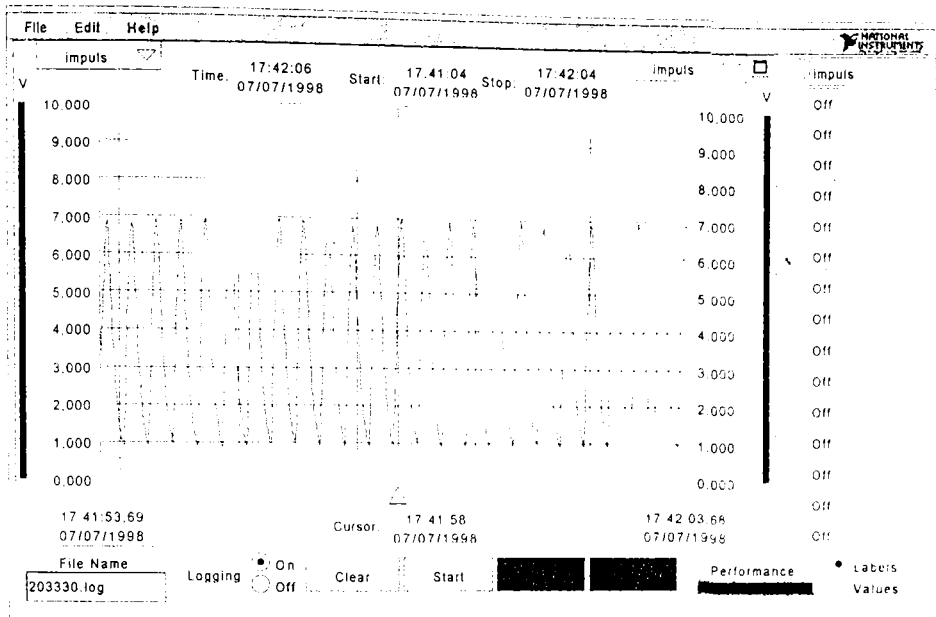


Fig. 5.17 Inregistrări la turația de 33 rot/min și 45 rot/min pentru cuzinetul 2, pivotul cu raza de 0,2mm la treapta 0 de încărcare; a-202330 b-202450

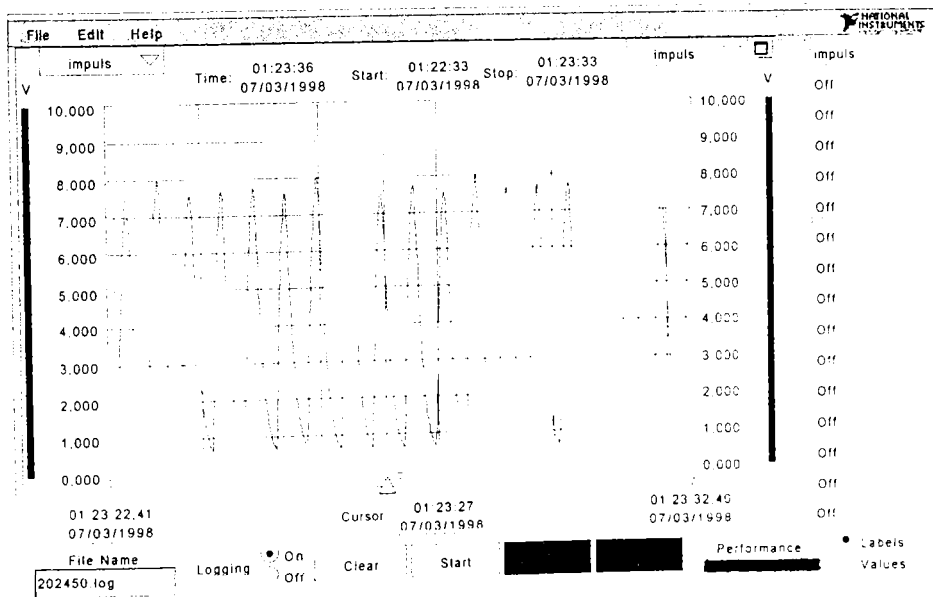
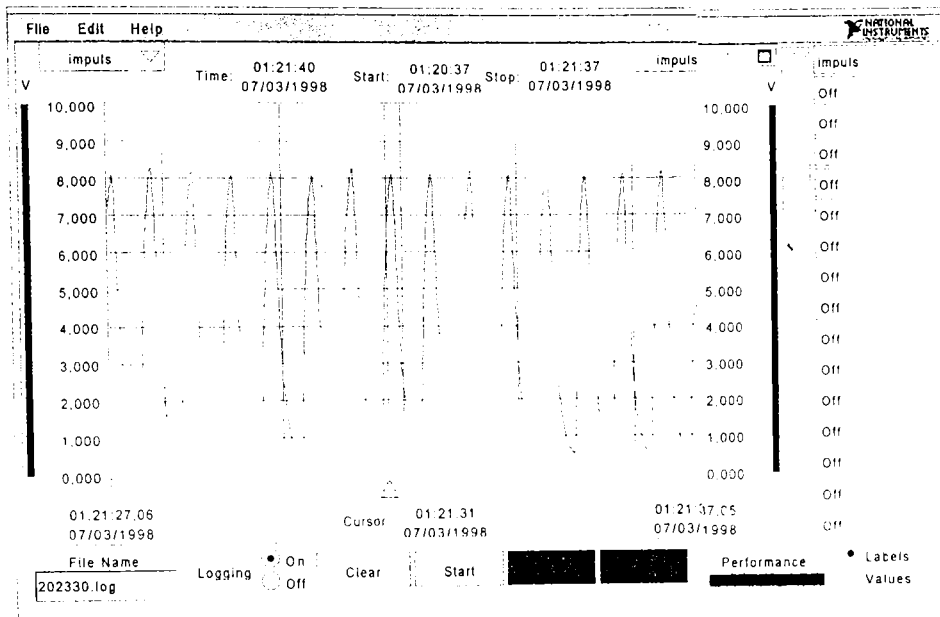


Fig. 5.18 Inregistrări la turația de 33 rot/min și 45 rot/min pentru cuzinetul 2, pivotul cu raza de 0,2mm la treapta 0 de încărcare; a-202330 b-202450

VIRTUALBENCH-LOGGER 2.1 REPORT

NATIONAL INSTRUMENTS

DATE CREATED 11:57:06 06/20/1998

FILE NAME 305335.log

USER Andreea Dobra

START COMMENT

Masurarea turatiei discului antrenat prin inregistrarea unui tren de impulsuri date de 5 marcaje de pe disc, la trecerea prin dreptul unui lector optic -prin reflexie-
END COMMENT

START DATA

Date	Time	impuls (V)
06/20/1998	11:57:09.00	1,141
06/20/1998	11:57:09.01	1,064
06/20/1998	11:57:09.02	0,995
06/20/1998	11:57:09.03	0,975
06/20/1998	11:57:09.04	1,346
06/20/1998	11:57:09.05	1,962
06/20/1998	11:57:09.06	2,633
06/20/1998	11:57:09.07	3,285
06/20/1998	11:57:09.08	3,889
06/20/1998	11:57:09.09	4,438
06/20/1998	11:57:09.10	4,931
06/20/1998	11:57:09.11	5,374
06/20/1998	11:57:09.12	5,769
06/20/1998	11:57:09.13	6,123
06/20/1998	11:57:09.14	6,439
06/20/1998	11:57:09.15	6,721
06/20/1998	11:57:09.16	6,974
06/20/1998	11:57:09.17	7,201
06/20/1998	11:57:09.18	7,363
06/20/1998	11:57:09.19	7,372
06/20/1998	11:57:09.20	7,223
06/20/1998	11:57:09.21	6,723
06/20/1998	11:57:09.22	6,123
06/20/1998	11:57:09.23	5,523

06/20/1998	11:58:08.41	4,953
06/20/1998	11:58:08.42	5,394
06/20/1998	11:58:08.43	5,788
06/20/1998	11:58:08.44	6,140
06/20/1998	11:58:08.45	6,455
06/20/1998	11:58:08.46	6,736
06/20/1998	11:58:08.47	6,988
06/20/1998	11:58:08.48	7,211
06/20/1998	11:58:08.49	7,336
06/20/1998	11:58:08.50	7,297
06/20/1998	11:58:08.51	7,110
06/20/1998	11:58:08.52	6,811
06/20/1998	11:58:08.53	6,440
06/20/1998	11:58:08.54	6,029
06/20/1998	11:58:08.55	5,602
06/20/1998	11:58:08.56	5,177

END DATA

Fig. 5. 19 Fișier VirtualBench pentru turaj constantă

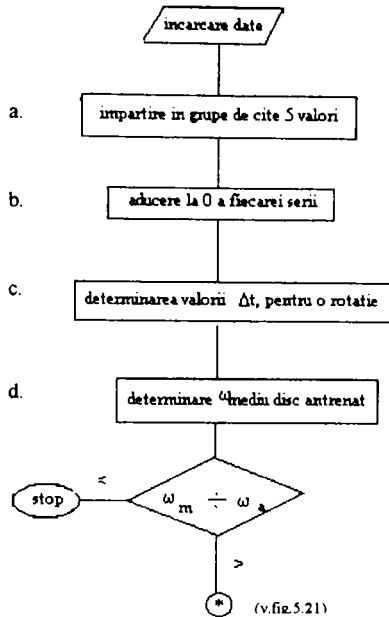


Fig. 5.20 Organigrama pentru determinarea turajiei discului antrenat

În tabelul 5.1 este prezentat un exemplu de prelucrare, pentru tipul de lagăr 203451 (cuzinet tip 2, raza $r_2=1,7$ mm; pivot cu raza de curbură $r_1=0,3$ mm, turajie 45 rot/min, încărcat cu prima treaptă de forță $F=0,22$ N).

a. Impărțirea numărului total în 5 serii de valori s-a făcut pentru a elimina eventualele erori date de inexactitatea echidistanței dintre marcajele de pe discurile antrenate.

b. Prin aducere la zero a fiecărei serii s-a asigurat inițializarea fiecărei serii astfel încât să se poată considera că pe discul antrenat se află un singur marcaj (un semnal pentru o rotație completă). Între valorile obținute pentru timpul necesar efectuării unei rotații se face media aritmetică.

c.,d. Valorile obținute permit calcularea timpului mediu de efectuare a unei rotații și astfel se poate determina și valoarea vitezei unghiulare medii a discului antrenat. Pentru trasarea diagramei vitezei unghiulare s-au calculat și valorile acesteia corespunzătoare fiecărei rotații (tabel 5.2 și figura 5.16).

Tabelul 5. 2

I	II	III	IV	V	Media	t_{mediu}	ω_{mediu} disc
0	0	0	0	0	0		
2.14	2.14	2.14	2.16	2.16	2.148	2.148	2.925
5.3	5.29	5.29	5.29	5.3	5.294	2.146	2.927
6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	6.44	2.146	2.927
8.58	8.57	8.57	8.58	8.58	8.576	2.136	2.941
10.72	10.71	10.71	10.72	10.72	10.716	2.14	2.936
12.86	12.86	12.86	12.87	12.86	12.862	2.146	2.927
15	15	15.99	15.01	15.01	15.002	2.14	2.936
17.15	17.14	17.14	17.14	17.14	17.142	2.14	2.936
19.29	19.28	19.28	19.29	19.29	19.286	2.144	2.930
21.43	21.42	21.42	21.43	21.43	21.426	2.14	2.936
23.57	23.57	23.57	23.58	23.58	23.574	2.148	2.925
25.73	25.73	25.74	25.76	25.77	25.746	2.172	2.892
27.91	27.91	27.91	27.93	27.94	27.92	2.174	2.890
30.09	30.09	30.1	30.11	30.11	30.1	2.18	2.882
32.26	32.26	32.26	32.28	32.29	32.27	2.17	2.895
35.43	35.43	35.44	35.45	35.46	35.442	2.172	2.892
36.6	36.6	36.61	36.62	36.62	36.61	2.168	2.898
38.76	38.76	38.77	38.78	38.79	38.772	2.162	2.906
40.93	40.93	40.93	40.93	40.94	40.932	2.16	2.908
43.08	43.08	43.08	43.09	43.08	43.082	2.15	2.922
45.22	45.22	45.22	45.23	45.23	45.224	2.142	2.933
47.37	47.36	47.36	47.36	47.36	47.362	2.138	2.938
49.51	49.5	49.5	49.51	49.5	49.504	2.142	2.933
51.64	51.63	51.63	51.63	51.64	51.634	2.13	2.949
Valoarea turatiei (m)=		45 [rot/min]			t mediu [s]=		2.1526

După cum se remarcă, valoarea vitezei unghiulare nu este riguros constantă, deoarece axul nu se rotește perfect centric în lagărul inferior, ci execută o mișcare de rostogolire cu pivotare, respectiv una de alunecare, cf. Cap. 4. Diferențele față de turația motoare sunt proporționale cu pierderile prin frecare. Este important de precizat că nu s-a urmărit determinarea valorii momentului de frecare, ci comparativ, precizarea perechii pivot / cuzinet pentru care valoarea acesteia este minimă, în diferite condiții de încărcare respectiv turație. Rezultatele care vor fi obiectul prelucrării ulterioare au fost trecute în tabelul 5.3

Tabelul 5. 3

tip lagăr	timp mediu t_m [s]	omega motor ω_m [rad/s]	omega disc ω_d [rad/s]
2/03-45-1	2.1526	5.71	2.92

și deoarece este îndeplinită inegalitatea $\omega_d < \omega_m$, s-a trasat variația vitezei unghiulare a discului antrenat, figura 5.21. (linie continuă), iar cu linie întreruptă valoarea vitezei unghiulare a discului motor.

variația vitezei unghiulare
2/03-45-1

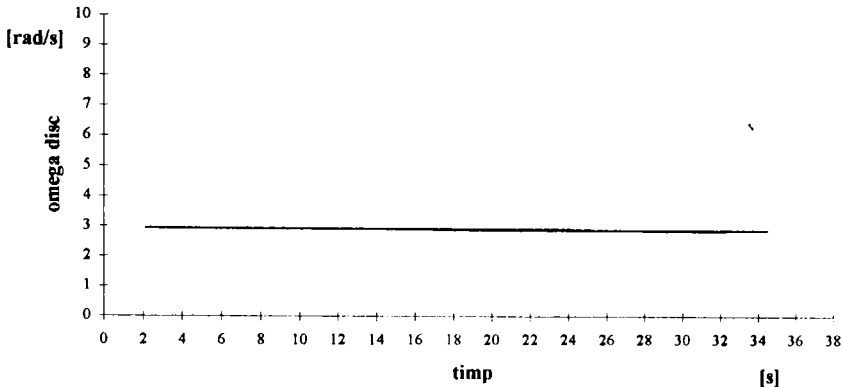


Fig. 5.21 Variația vitezei unghiulare a discului antrenat

În cadrul acestei etape preliminare se desprinde concluzia că pentru o turație motoare mică (ex. 16 rot / min), discul condus are o turație comparabilă ca mărime cu cea motoare, ceea ce se explică prin faptul că la turații mici, frecarea este mai mare, (coeficient de frecare ridicat). Pentru treptele de viteză mai mari, se constată o creștere a defazării discului antrenat în raport cu discul motor, pentru menținerea invariabilă a treptei de încărcare.

În cazul cuzineților lustruiți, s-a constatat că valorile vitezelor unghiulare sunt mai mari decât în situația când s-au utilizat cuzineții șlefuiți.

Acest procedeu a fost aplicat tuturor măsurătorilor. Din numărul total de valori obținute s-au eliminat cele care au avut o abatere mai mare de 3 % față de valoarea medie.

Prelucrarea datelor a continuat cu determinarea pantei drepte de regresie a fiecărei perechi pivot - cuzinet, la fiecare treaptă de încărcare și pentru o creștere succesivă a vitezei unghiulare motoare (a platanului).

Procedeul de calcul a pantei drepte de regresie s-a parcurs conform oganigramei din figura 5.22

etapa (a) se face pentru toate măsurătorile referitoare la o pereche pivot / cuzinet.

etapa (b) se efectuează în sens crescător al forței (pe orizontală) și în sens crescător al vitezei unghiulare (pe verticală), tabelul 5.4

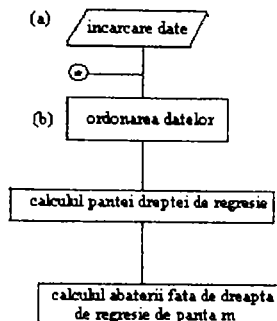


Fig. 5.22 Organigrama de determinare a pantei dreptei de regresie

Tabelul 5.4

forta	0	1	2	3	4	5
ω_{motor}	$\omega_{\text{disc antrenat}}$	$\omega_{\text{disc antrenat}}$	$\omega_{\text{disc antrenat}}$	$\omega_{\text{disc antrenat}}$	$\omega_{\text{disc antrenat}}$	$\omega_{\text{disc antrenat}}$
0	0	0	0	0	0	0
1.745	1.414	1.288	1.387	1.406	1.413	1.668
3.490	2.669	2.432	2.489	3.212	2.632	2.943
5.712	3.599	3.227	3.351	3.461	3.592	3.787
8.168	6.126	5.876	5.473	5.239	5.810	6.278
m:	0.546	0.595	0.604	0.636	0.709	0.756
R2	0.999	0.989	0.997	0.960	0.997	0.996

unde prin m - s-a notat panta dreptei de regresie, iar prin $R2$ – coeficientul de corelație al dreptei de regresie în raport cu șirul de valori pentru care se determină dreapta de regresie.

Semnificația treptelor de forță este dată în tabelul 5.5

Tabelul 5.5

treapta de forta	0	1	2	3	4	5
forța [N]	0,223	0,309	0,394	0,479	0,568	0,651

În figura 5.23 este prezentată variația vitezei unghiulare a discului antrenat, în condițiile prezentate anterior. Cu linie punctată s-a reprezentat prima bisectoare.

Semnificația primei bisectoare în acest caz, este aceea că dacă punctele experimentale s-ar găsi pe această dreaptă $\omega_{\text{disc antrenat}} = \omega_{\text{disc motor}}$, întregul moment motor s-ar transmite prin moment de frecare discului antrenat. De aici se poate concluziona că, cu cât panta dreptei de regresie a vitezelor unghiulare ale discului motor este mai mică, cu atât frecarea este mai mică, deci perechea pivot - cuzinet se poate considera varianta optimă pentru condiții similare de încărcare și turație.

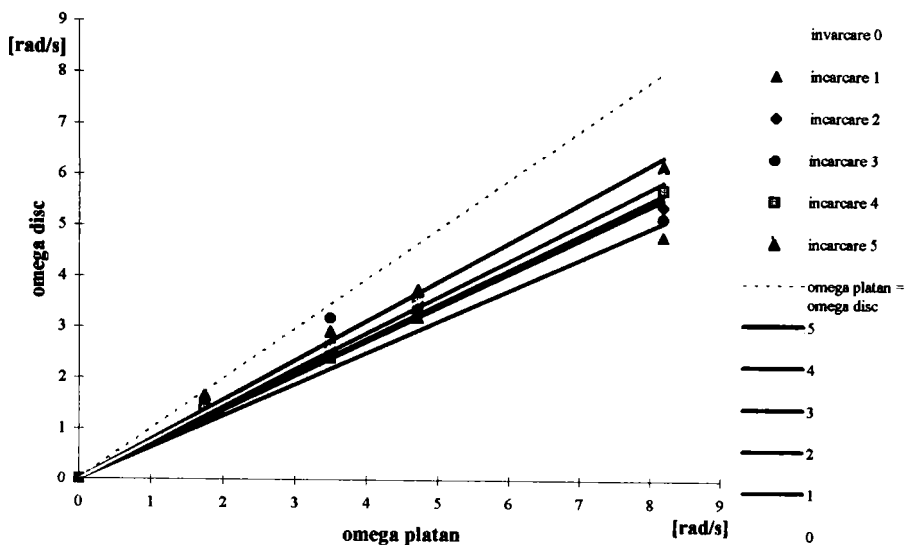


Fig. 5.23 Variația pantelor de regresie pentru diferite trepte de încărcare și cele 4 trepte de turație

Tabelul 5.6

1-01	0.18217	0.189784	0.2865	0.2966533	0.141537	0.126205
1-02	0.45532	0.544572	0.262504	0.6002433	0.470795	0.629062
1-03	0.47014	0.304713	0.437832	0.3662611	0.339785	0.414249
1-04	0.68696	0.624387	0.662992	0.6564229	0.648988	0.620994
1-05	0.66304	0.796064	0.632096	0.8473885	0.821885	0.841974
2-01	0.53011	0.589245	0.524745	0.4655856	0.426293	0.417946
2-02	0.46049	0.417298	0.444013	0.2022808	0.316106	0.452421
2-03	0.49799	0.41019	0.565677	0.6188103	0.480131	0.554431
2-04	0.61248	0.638611	0.653385	0.6466316	0.731986	0.64405
2-05	0.88835	0.863275	0.82022	0.8353881	0.833592	0.817988
3-01	0.64882	0.443761	0.446646	0.6040156	0.687809	0.328053
3-02	0.31277	0.417969	0.390909	0.3636432	0.318296	0.381912
3-03	0.32101	0.344765	0.39061	0.3892117	0.382466	0.311814
3-04	0.38387	0.375056	0.413378	0.4081534	0.39493	0.377669
3-05	0.56723	0.571043	0.59685	0.5478829	0.481395	0.560934
11-01	0.34849	0.506592	0.572991	0.6831939	0.718513	0.67878
11-02	0.77038	0.604635	0.465567	0.5809602	0.595067	0.549942
11-03	0.58193	0.446762	0.591489	0.7624381	0.734566	0.548873
11-05	0.851718	0.8618734	0.8015977	0.8260807	0.816966	0.916108
12-01	0.636145	0.595369	0.570362	0.5032445	0.441661	0.450117
12-03	0.54773	0.615422	0.652329	0.6895592	0.568783	0.563914
12-04	0.67009	0.701089	0.722379	0.7274435	0.736775	0.699939
12-05	0.91939	0.878367	0.897071	0.9542834	0.911885	0.805047

În tabelul 5.6 sunt prezentate valorile obținute pentru panta dreptelor de regresie, pentru cuzineții cu cavitate sferică.

În cazul cuzineților cu cavitate conică, panta dreptei de regresie s-a confundat în proporție de 90 % cu prima bisectoare, suprafața de frecare fiind mai mare, motiv pentru care nu a mai prezentat interes pentru prezenta cercetare.

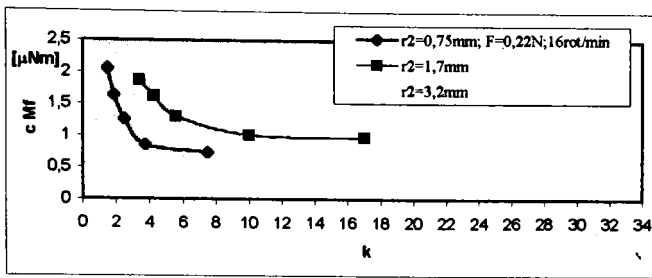
Intrucât valoarea efectivă a momentului de frecare este dificil de determinat, s-a convenit la reprezentarea sugestivă a variației acesteia în raport cu raportul razelor. Pentru aceasta s-a calculat diferența dintre viteza unghiulară motoare și cea a discului antrenat și s-a raportat la viteza discului motor. Pentru reprezentare s-a considerat inversul valorii astfel obținute, ceea ce reprezintă o mărime proporțională cu momentul de frecare. În diagramele următoare această mărime s-a notat cu "c Mf" în ordonată, iar în abscisă s-au trecut valorile pentru raportul razelor.

În figurile 5.24 și 5.25 s-au reprezentat diagramele rezultate finale obținute în urma măsurătorilor efectuate pentru determinarea perechii pivot / cuzinet care în funcționarea în regim stabilizat prezintă pierderile minime, la încărcarea minimă $F=0,22$ N respectiv cea maximă $F=0,65$ N, pentru cele patru trepte de turație (a-16 rot/min; b-33 rot/min; c-45 rot/min; d-78 rot/min).

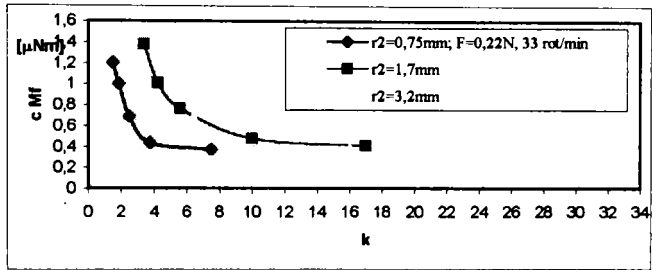
În figura 5.26 s-au reprezentat diagramele corespunzătoare încărcării de 0,46N.

În figurile 5.27 – 5.30. Sunt prezentate câteva dintre variațiile momentului de frecare pentru diverse:

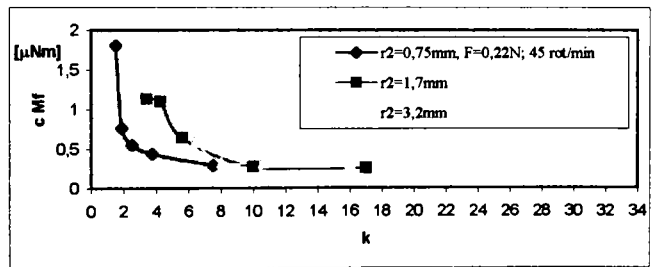
- perechi de pivot / cuzinet,
- viteze unghiulare,
- aceeași sarcină axială ($F=0,46$ N).



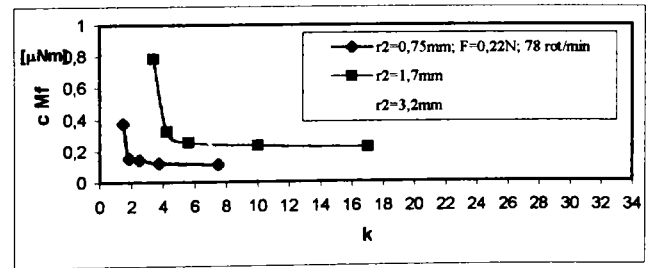
a



b

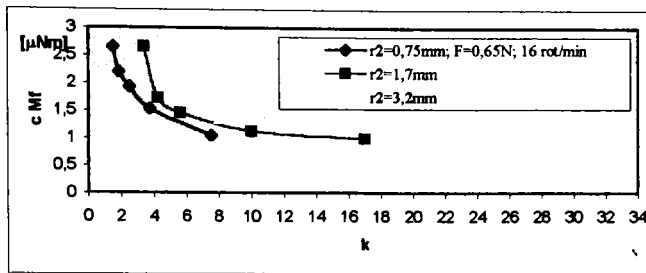


c

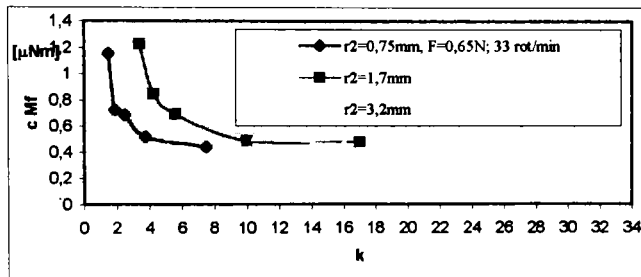


d

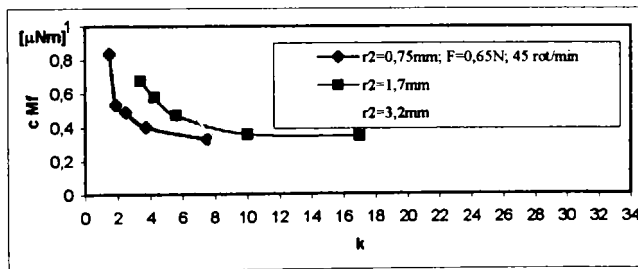
Fig. 5.24 Variația momentului de frecare experimental funcție de raportul razelor pentru încărcarea cu $F=0.22 N$ pentru treptele standard de turație (a-16 rot/min; b-33 rot/min; c-45 rot/min; d-78 rot/min)



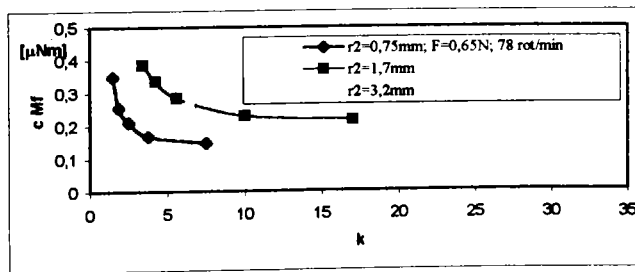
a



b

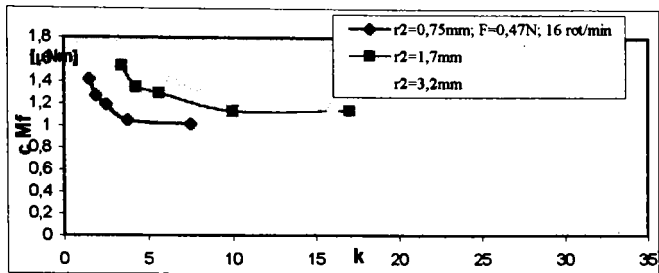


c

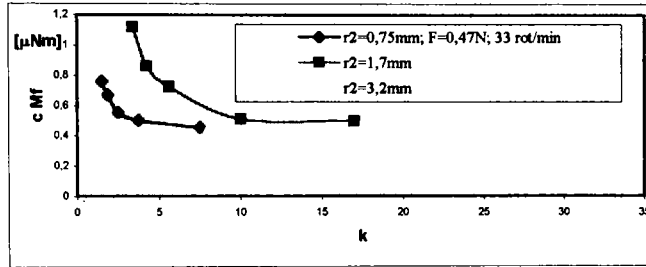


d

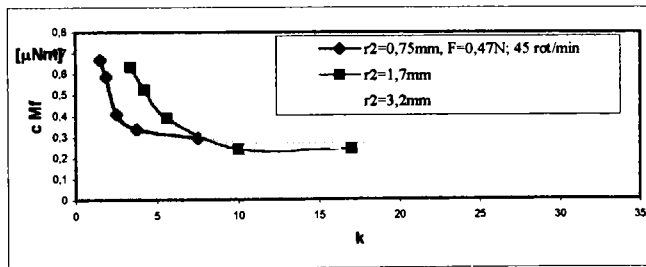
Fig. 5. 25 Variația momentului de frecare experimental funcție de raportul razelor pentru încărcarea cu $F=0.65\text{ N}$ pentru treptele standard de turație (a-16 rot/min; b-33 rot/min; c-45 rot/min; d-78 rot/min)



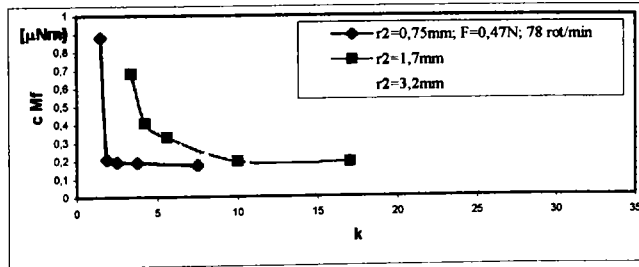
a.



b.



c.



d.

Fig. 5. 26 Variația momentului de frecare experimental funcție de raportul razelor pentru încărcarea cu $F=0,47 N$ pentru treptele standard de turație (a-16 rot/min; b-33 rot/min; c-45 rot/min; d-78 rot/min)

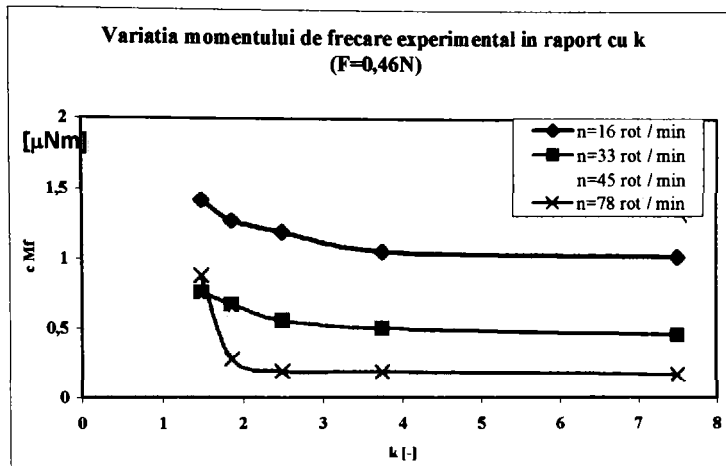


Fig. 5.27 Variația momentului de frecare experimental ($r_2 = 0,75$ mm)

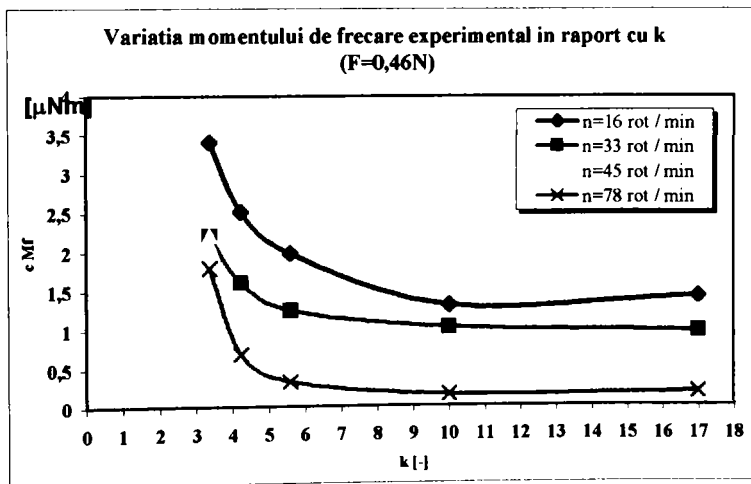


Fig. 5.28 Variația momentului de frecare experimental ($r_2 = 1,7$ mm)

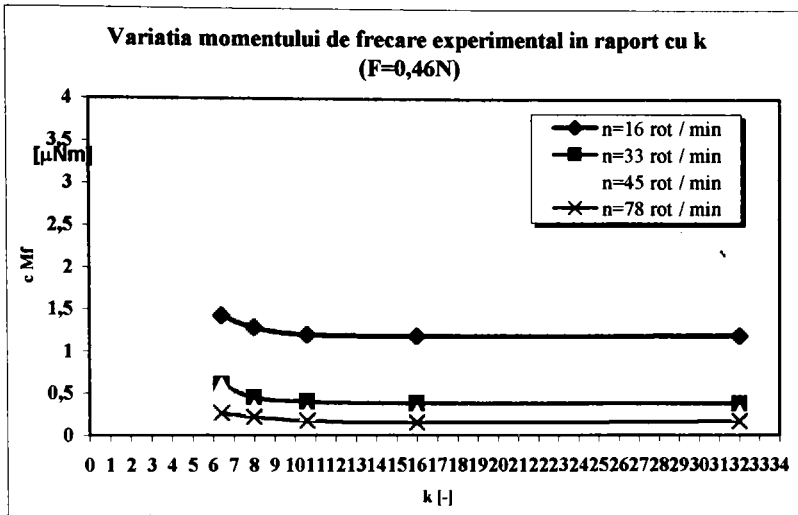


Fig. 5. 29 Variația momentului de frecare experimental ($r_2 = 3,2$ mm)

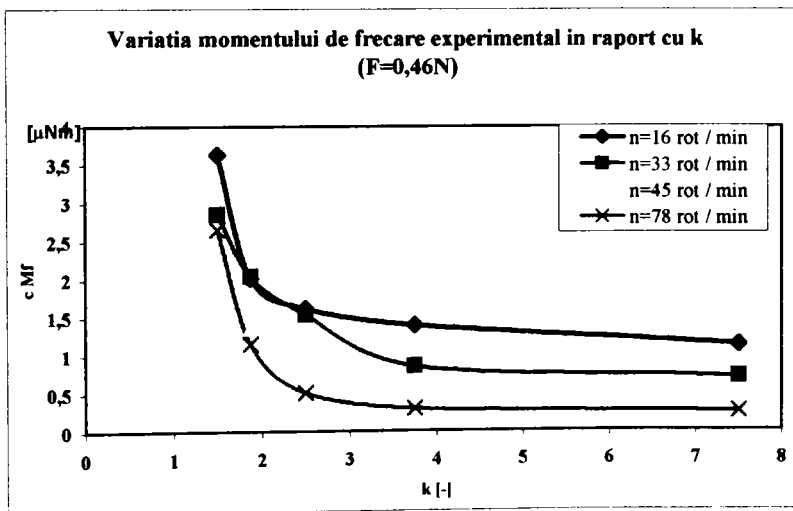


Fig. 5. 30 Variația momentului de frecare experimental (cuzinet lustruit cu $r_2 = 0,75$ mm)

Analiza curbelor și valorilor obținute conduce la concluzia că valorile minime ale momentului de frecare se obțin pentru cuzinetul tip 1 ($r_2 = 0,75$ mm) pentru cuzinet șlefuit. Dacă suprafața cavității sferice a cuzinetului este lustruită, valoarea momentului de frecare este mai mare decât în cazul anterior. Aceasta se datorează unei suprafețe efective mai mari de contact. O frecare redusă se observă și la valori

ridicate pentru raportul razelor, valoare care nu prezintă interes deoarece în acest caz (cum s-a arătat în capitolul 4) precizia de indicație scade foarte mult.

Corelând rezultatele de la paragraful 5.4.1.A se poate afirma că valoarea coeficientului “c” al momentului de frecare este cuprins în intervalul [3 ... 4.5], dependent de perechea de pivot – cuzinet, încărcare și viteză unghiulară. Astfel se pot determina valorile momentului de frecare pentru încercările comparative efectuate în vederea determinării perechii optime de cuzinet/pivot din punctul de vedere al frecării.

5.4.2 Incercări în regim tranzitoriu

Analiza lagărelor pentru vârfuri în regim tranzitoriu s-a efectuat pentru a avea o imagine complexă asupra comportamentului acestor tipuri de lagăre în vederea unor utilizări optime.

Experimentele s-au efectuat cu ajutorul standului prezentat în figura 5.8 asupra lagărelor cu cele 3 variante de cuzinet și tot 3 variante de fus ($r_1 \in \{0.1; 0.3; 0.5\}$ mm) pentru încărcare minimă (0,23 N) și maximă (0,65 N).

Pentru a putea compara valorile obținute pentru momentul de frecare, aceleași variante au fost experimentate și la oprire (a), și la pornire (b).

(A) OPRIRE

Încercările au avut la bază metoda încetirii (detaliată în capitolul 3). Discului i s-a imprimat o mișcare de rotație, după care a fost lăsat să se oprească, înregistrându-se cu aceeași configurație semnalele date de cele 5 marcaje de pe disc.

În figura 5.31 este prezentat un exemplu de fișier obținut cu ajutorul programului VirtualBench, pentru încercări prin încetinire.

Înregistrările astfel obținute au fost prelucrate prin determinarea timpului dintre două semnale succesive. În vederea determinării pierderilor prin frecare pentru fiecare pereche pivot / cuzinet, s-a conceput o machetă de calcul care a permis și vizualizarea imediată a variației vitezei unghiulare, accelerației unghiulare, a momentului de frecare în raport cu timpul respectiv cu viteza unghiulară.

Fiecare măsurătoare s-a reluat de 5 ori, astfel că valorile de intrare pentru macheta de calcul sunt valorile medii ale timpului dintre două impulsuri.

VIRTUALBENCH-LOGGER 2.1 REPORT

NATIONAL INSTRUMENTS

DATE CREATED 11:36:23 07/09/1998

FILE NAME 303-5op.log

USER Andreea Dobra

START COMMENT

Inregistrarea unui tren de impulsuri date de 5 marcaje de pe disc, la trecerea prin dreptul unui lector optic -prin reflexie- pentru determinarea acceleratiei unghiulare de incetinire

END COMMENT

START DATA

Date	Time	motor (V)	impuls (V)
07/09/1998	11:36:27.1	0,231	2,149
07/09/1998	11:36:27.2	0,229	2,149
07/09/1998	11:36:27.3	0,229	2,149
07/09/1998	11:36:27.4	0,231	2,149
07/09/1998	11:36:27.5	0,233	2,149
07/09/1998	11:36:27.6	0,234	2,149
07/09/1998	11:36:27.7	0,234	2,149
07/09/1998	11:36:27.8	0,234	2,149
07/09/1998	11:36:27.9	0,234	2,149
07/09/1998	11:36:28.0	0,234	2,149
07/09/1998	11:36:28.1	0,234	4,461
07/09/1998	11:36:28.2	0,233	7,527
07/09/1998	11:36:28.3	0,234	8,556
07/09/1998	11:36:28.4	0,233	8,645
07/09/1998	11:36:28.5	0,232	6,169
07/09/1998	11:36:28.6	0,230	6,358
07/09/1998	11:36:28.7	0,228	6,817
07/09/1998	11:36:28.8	0,227	7,028
07/09/1998	11:36:28.9	0,227	7,968
07/09/1998	11:36:29.0	0,226	6,486
07/09/1998	11:36:29.1	0,226	8,241
07/09/1998	11:36:29.1	0, ---	7,777
07/09/1998	11:36:29.2	0,226	5,916
07/09/1998	11:36: 9.3	0,225	7,171
07/09/1998	11:36: 9.4	0,225	
07/09/1998	11:36:29.5	0,225	
07/09/1998	11:36:29.6	0,225	
07/09/1998	11:36:29.7	0,22-	
1998	11:36:29.8	0,	
	11:36:30.9		

		0,227	2,146
07/09/1998	11:36:50.6	0,227	2,146
07/09/1998	11:36:50.7	0,227	2,146
07/09/1998	11:36:50.8	0,228	2,146
07/09/1998	11:36:50.9	0,227	2,146
07/09/1998	11:36:51.0	0,227	2,146
07/09/1998	11:36:51.1	0,227	2,146
07/09/1998	11:36:51.2	0,227	2,146
07/09/1998	11:36:51.3	0,227	2,146
07/09/1998	11:36:51.4	0,228	2,146

END DATA

Fig. 5. 31 Fişier VirtualBench pentru încercări prin încetinire

VIRTUALBENCH-LOGGER 2.1 REPORT

NATIONAL INSTRUMENTS

DATE CREATED 10:37:48 07/12/1998

FILE NAME 305-3pornire.log

USER Andreea DOBRA

START COMMENT

Inregistrarea unui tren de impulsuri date de 5 marcaje de pe disc, la trecerea prin dreptul unui lector optic -prin reflexie- pentru determinarea acceleratiei unghiulare, când antrenarea se realizeaza prin frecare in lagarul inferior.

END COMMENT

START DATA

Date	Time	motor (V)	impuls (V)
07/12/1998	10:37:50.0	0,150	9,100
07/12/1998	10:37:50.1	0,150	9,100
07/12/1998	10:37:50.2	0,149	9,100
07/12/1998	10:37:50.3	0,149	9,100
07/12/1998	10:37:50.4	0,149	9,100
07/12/1998	10:37:50.5	0,149	9,100

07/12/1998	10:37:54.8	3,612	9,100
07/12/1998	10:37:54.9	4,495	9,100
07/12/1998	10:37:55.0	5,540	9,100
07/12/1998	10:37:55.1	3,089	9,190
07/12/1998	10:37:55.2	5,392	9,100
07/12/1998	10:37:55.3	4,452	9,100
07/12/1998	10:37:55.4	3,742	9,100
07/12/1998	10:37:55.5	5,370	9,100
07/12/1998	10:37:55.6	5,250	7,423
07/12/1998	10:37:55.7	4,790	4,155
07/12/1998	10:37:55.8	4,354	2,831
07/12/1998	10:37:55.9	5,620	2,364
07/12/1998	10:37:56.0	3,842	2,198
07/12/1998	10:37:56.1	4,914	2,138
07/12/1998	10:37:56.2	2,019	2,
07/12/1998	10:37:56.3	,	
07/12/1998	10:37:56.4	3,978	
07/12/1998	10:37:56.5	3,907	
07/12/1998	10:37:56.6	5,083	
07/12/1998	10:37:56.7	5,8	
2/1998	10:37:56.8		
98	10:37:56.9		

07/12/1998	10:38:07.4	4,169	2,415
07/12/1998	10:38:07.5	4,143	6,696
07/12/1998	10:38:07.6	5,633	8,288
07/12/1998	10:38:07.7	3,336	6,478
07/12/1998	10:38:07.8	4,626	3,715
07/12/1998	10:38:07.9	5,632	2,659
07/12/1998	10:38:08.0	3,924	2,295
07/12/1998	10:38:08.1	4,579	4,119
07/12/1998	10:38:08.2	5,642	7,432
07/12/1998	10:38:08.3	4,581	8,535
07/12/1998	10:38:08.4	4,222	5,912
07/12/1998	10:38:08.5	5,540	3,443
07/12/1998	10:38:08.6	3,020	2,583
07/12/1998	10:38:08.6	5,280	3,172

END DATA

Fig. 5. 32 Fişier VirtualBench pentru încercări prin accelerare

Un exemplu este redat în figurile 5.33, 5.34 și 5.35, pentru cuzinetul tip 2 ($r_2 = 1,7 \text{ mm}$), pivot cu $r_1 = 0,3 \text{ mm}$ și încărcare axială de $0,65 \text{ N}$. Pe graficele astfel obținute s-au marcat punctele experimentale.

Viteza și accelerația unghiulară în raport cu timpul

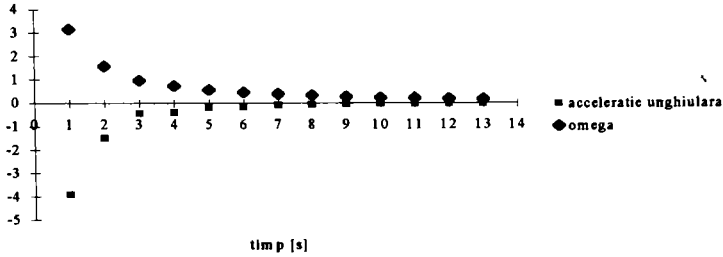


Fig. 5.33 Variația vitezei și accelerației unghiulare în raport cu timpul

Moment de frecare experimental în raport cu timpul

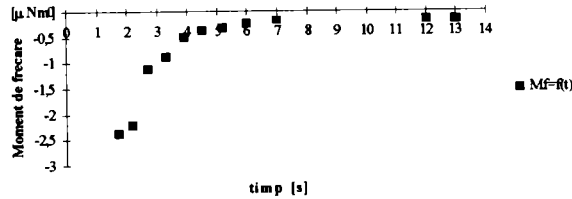


Fig. 5.34 Variația momentului de frecare în raport cu timpul

Moment de frecare în raport cu viteza unghiulară

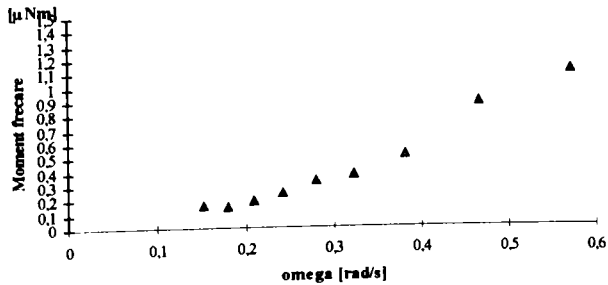


Fig. 5.35 Variația momentului de frecare în raport cu viteza unghiulară

Rezultatele finale ale acestui experiment sunt cuprinse sugestiv în graficul din figura 5.36.

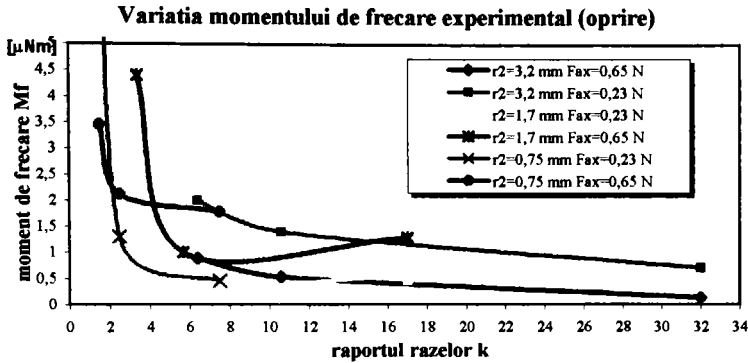


Fig. 5. 36 Variația momentului de frecare (la oprire)

Se remarcă pierderile mici în cazul cuzinetului cu raza de 0,75 și o încărcare de 0,23 N în cazul unui raport al razelor în domeniul $2,5 < k < 5$. În defavoarea preciziei însă se poate opta și pentru un raport mai mare al razelor.

(B) PORNIRE

Standul cu ajutorul căruia s-au efectuat încercări este prezentat în figura 5.8. Antrenarea discului motor (respectiv a cuzinetului inferior) s-a realizat cu un motor (de curent continuu) de la un casetofon prin intermediul elementului intermediar.

Inregistrarea s-a început în momentul pornirii motorului, astfel s-au făcut simultan două înregistrări: pentru discul motor și pentru discul antrenat, în cadrul aceluiași fișier, exemplificat în figura 5.32.

Pe parcursul experimentelor s-a avut grijă ca la pornire un marcaj să se afle în dreptul lectorului optic prin reflexie.

Și în acest caz, similar cu cel tratat la oprire, fiecare măsurătoare s-a reluat de 5 ori, iar în macheta de calcul s-au introdus valorile medii pentru timpii obținuți.

O astfel de variație este prezentată în figura 5.35, pentru cuzinetul tip 3 ($r_2 = 3,2$ mm, $r_1 = 0,3$ mm) pentru o încărcare de 0,65 N.

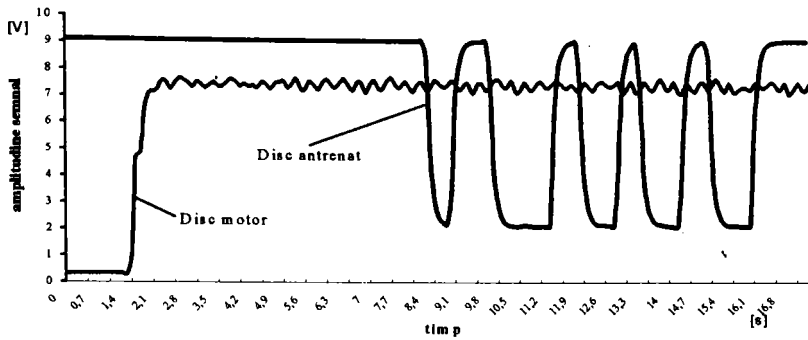


Fig. 5. 37 Exemplu de înregistrare a unei măsurători (pornire)

Centralizarea rezultatelor obținute este prezentată sugestiv în diagrama din figura 5.38.

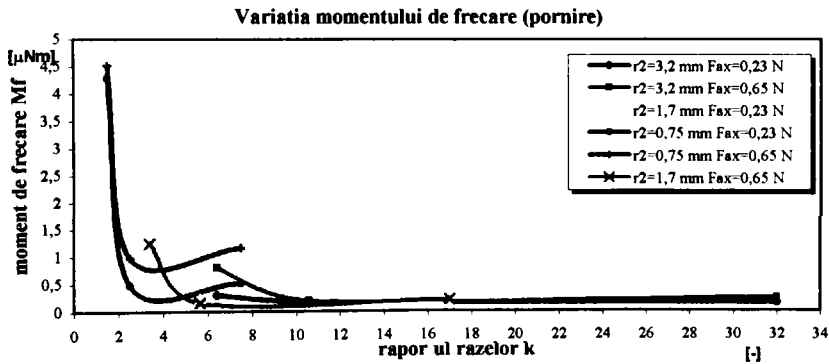


Fig. 5. 38 Variația momentului de frecare (la pornire)

Din analiza atentă a rezultatelor experimentale, corelată cu elementele de calcul (cap. 4) se constată că pierderile prin frecare sunt mai mici la rapoarte mai mari.

5.5 Analiza preciziei experimentale de indicație

În capitolul 4 s-au făcut referiri asupra variației erorilor de citire funcție de raportul razelor, și din diagrama 4.21 s-a constatat cu ușurință că un raport mai mic al razelor este convenabil din punct de vedere al preciziei de citire, dar prezintă inconvenientul unei frecări mai mari în lagăre.

Pentru determinarea preciziei de citire, cu ajutorul standului prezentat în § 5.2, s-au făcut măsurători pentru determinarea deviației axului față de poziția verticală, funcție de jocul axial din lagărul superior. Pentru citire acestea, s-a utilizat o lupă Brinell L, figura 5.39

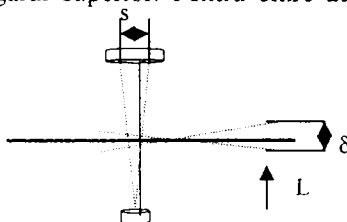


Fig. 5. 39 Schema de principiu pentru măsurarea deviației

Jocul în lagărul superior s-a realizat prin deșurubarea (și blocarea) suportului cuzinetului superior cu 1/4 spiră respectiv 1/2 spiră, ceea ce a asigurat un joc de 0.1875mm respectiv 0.375mm.

S-au efectuat 150 citiri pentru diverse rapoarte al razelor (prin modificarea razei pivotului $r_1 \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5\}$ mm pentru aceeași rază a cuzinetului $r_2=1.7$ mm).

În tabelul 5.7 sunt prezentate valorile medii ale deviației discului obținute în urma eliminării celor care au avut o abatere mai mare cu 5% decât valoarea medie:

Pentru deviații mici, orice aproximație poate conduce la valori afectate de erori. Pentru evitarea introducerii unor astfel de erori, s-a elaborat un program⁴ pentru determinarea valorii s , figura 5.38.

Tabelul 5 7

Raportul razelor K	deviația discului δ [mm]	
	Jocul $j=0.1875$ mm	Jocul $j=0.375$ mm
3.4	0.66	1.098
4.25	0.0705	1.205
5.66	0.753	1.26
8.5	0.804	1.355
17	0.8945	1.44

⁴ În limbajul C, program utilitar MANA

```

;PROGRAM DE DETERMINARE A DEVIATIEI
IN LAGARUL SUPERIOR;

r1=0.66      r2=0.705
r3=0.753    r4=0.804
r5=0.8945   r6=1.098
r7=1.205    r8=1.26
r9=1.355    r10=1.44
;r(i1)=valorile deviatiei masurate;
;i1=variabila intreaga pentru
      incrementare in ciclul DO - WHILE;
i1=1
;i2=variabila care defineste numarul
      de valori masurate;
i2=10
p0=xy/0,0
l1=lv/0
p1=xy/0,20
fr/p0
do
  p2=xy/45,20-r(i1)/2.
  c2=pr/p0,20
  l2=pc/p2,c2,rt
  l3=pt/p0,l2
  c2=pr/p0,40
  p23=lc/l3,c2,y1
  gt/p23
  i1=i1+1
while i1<=i2
end

```

Fig. 5. 40 Program pentru determinarea deviației în lagărul superior

În urma rulării programului s-au obținut valori mediate cu ajutorul cărora s-a trasat diagrama din figura 5.40

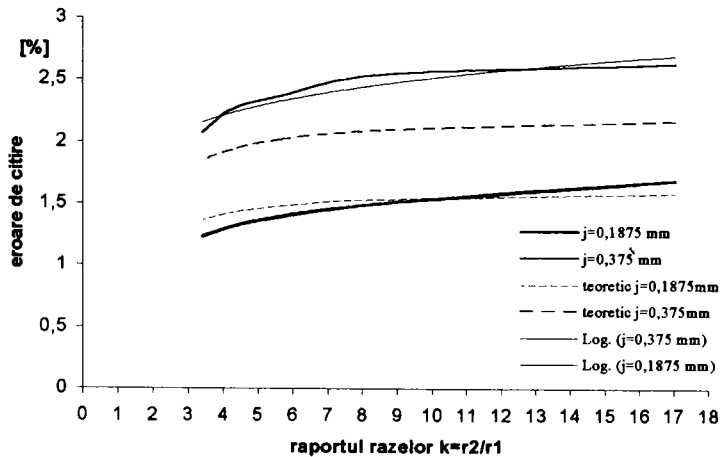


Fig. 5. 41 Diagrama de variație a erorii de citire funcție de raportul razelor

Din figura 5.41 rezultă o diferență relativ mică, admisibilă între curbele teoretice și cele experimentale.

Printre punctele experimentale s-a trasat o curbă de regresie cu un coeficient ridicat de concordanță. Ecuațiile acestor curbe sunt (5.1) pentru $j_1 = 0,1875$ mm și (5.2) pentru $j_2 = 0,375$ mm:

$$y_1 = 0.2843 \ln(x) + 0.9007 \quad (5.1)$$

$$y_2 = 0.3443 \ln(x) + 1.744 \quad (5.2)$$

Cu ajutorul acestor ecuații s-a analizat influența creșterii (sau scăderii) raportului razelor asupra preciziei de indicație. Pentru o mai bună evaluare s-a trasat pe aceeași diagramă variația momentului de frecare teoretic pentru o încărcarea $F=0,44$ N (și aceeași rază a cuzinetului $r_2 = 1.7$ mm ca în măsurătorile efectuate pentru determinarea deviației), a cărei ecuație de regresie este redată în (5.3), figura 5.42.

$$y_3 = 0.0005x^{-0.3908} \quad (5.3)$$

O reprezentare sugestivă a influenței creșterii (scăderii) raportului razelor asupra preciziei de indicație și a momentului de frecare teoretic este redată în diagramele din figurile 5.43 (pentru un joc axial de 0.1875 mm) și 5.44 (pentru un joc axial de 0.375 mm).

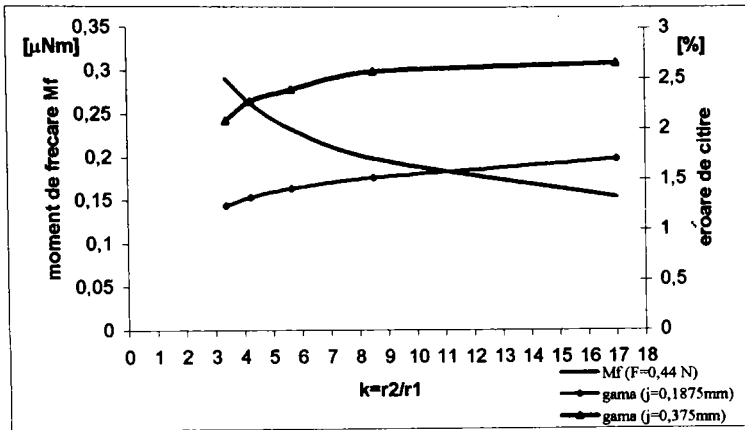


Fig. 5.42 Variația momentului de frecare teoretic și a erorii de citire experimentale

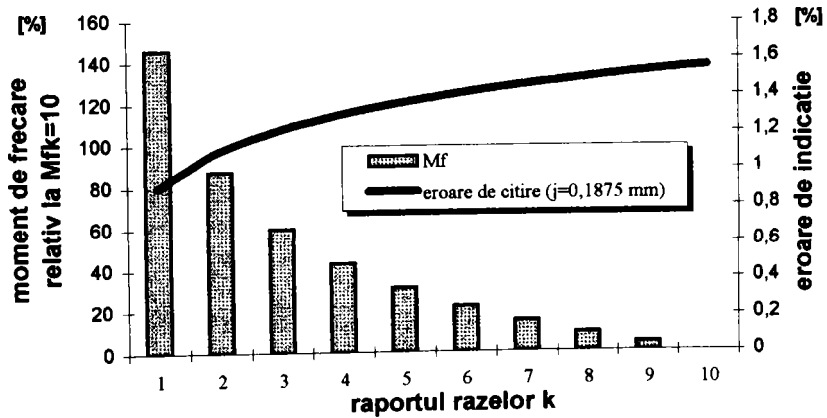


Fig. 5.43 Variația momentului de frecare relativ la valoarea limită pentru k=10 și a erorii de indicație funcție de raportului razelor pentru jocul în lagărul superior de 0.1875 mm

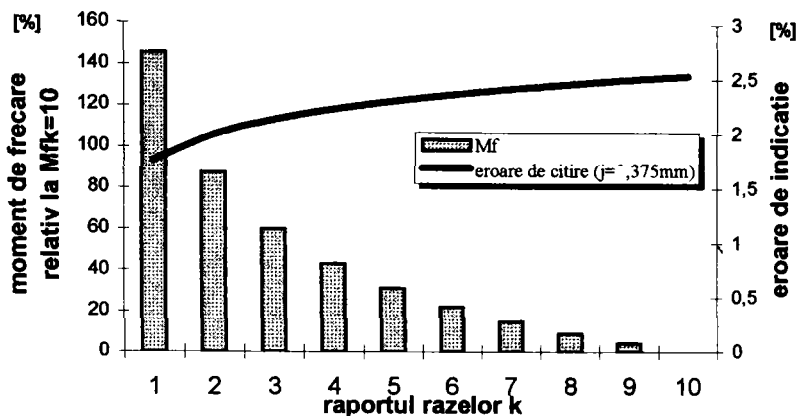


Fig. 5. 44 Variația momentului de frecare și a erorii de citire în raport cu modificarea raportului razelor pentru jocul în lagărul superior de 0.375 mm

În urma analizei se constată că raportul razelor $k=3$ este optim pentru o precizie de indicație convenabilă. Dacă se consideră $k=4$ rezultă (față de valorile corespunzătoare pentru $k=3$) o scădere a momentului de frecare cu 17%, dar și o creștere a erorii de indicație cu 0,08% (pentru $j=0.1875\text{mm}$) respectiv 0,09% (pentru $j=0.375\text{mm}$). Iar pentru o creștere la $k=5$, față de $k=3$ rezultă pentru momentul de frecare o scădere cu 29% iar eroarea crește cu 0,15% (pentru $j=0.1875\text{mm}$) respectiv 0,17% (pentru $j=0.375\text{mm}$).

Dacă se micșorează raportul razelor, spre exemplu de la valoarea 3 la $k=2$, rezultă o creștere a momentului de frecare cu 27% și o reducere a erorii cu 0.11% (pentru $j=0.1875\text{mm}$) respectiv 0,13% (pentru $j=0.375\text{mm}$).

Acestea conduc la concluzia că pentru o bună precizie a indicației, raportul razelor nu trebuie să depășească valoarea $k=3$, fiind de preferat valori chiar inferioare acestuia, dar nu mai mici de $k=2$ deoarece frecarea crește sensibil.

6. CONTRIBUȚII ȘI CONCLUZII

6.1 Contribuții

- ↳ s-a elaborat un studiu bibliografic orientat în direcțiile:
 - comportamentului tribologic al contactului forțat safir/oțel;
 - investigării procesului disipativ din lagărele pentru vârfuri;
 - modelelor de calcul specifice domeniului lagărelor pentru vârfuri;
- ↳ s-a pus în evidență influența proprietăților fizice ale safirului asupra procesului de frecare
- ↳ s-a întocmit un studiu privitor la principalele proprietăți fizico-mecanice ale safirului pe baza informațiilor puse la dispoziție de cele mai importante firme producătoare din lume;
- ↳ în cadrul studiului efectuat privind procedeele de creștere ale cristalului s-a analizat influența perturbațiilor în procesele tehnologice asupra apariției defectelor structurale;
- ↳ s-a realizat un studiu asupra principiilor și soluțiilor instalațiilor experimentale pentru investigarea proprietăților fizico-mecanice și tribologice ale contactului safir/oțel;
- ↳ s-au proiectat, realizat și adaptat instalații experimentale pentru cercetarea comportamentului lagărelor pentru vârfuri în regim de funcționare stabilizat și tranzitoriu;
- ↳ s-a analizat critic metodologia actuală de calcul referitoare la variația momentului de frecare în funcție de raportul razelor;
- ↳ s-a elaborat o nouă metodologie de alegere a razei pivotului bazată pe teoria elasticității aplicată contactului hertzian punctiform;
- ↳ pentru aplicarea operativă a metodologiei de alegere a razei pivotului s-au întocmit nomograme a căror utilizare este condiționată de valoarea admisă a tensiunii de contact;

-
-
- ↳ s-a studiat comportamentul lagărelor pentru vârfuri încărcate complex, cu forțe exterioare, constante sau variabile;
 - ↳ din analiza corelată a preciziei de indicație a instrumentelor de măsurat și a momentului de frecare din lagăr, s-au stabilit recomandări privitoare la alegerea raportului razelor funcție de acuratețea dorită,
-In acest scop s-a derulat un program de măsurători optice de poziționare axială și s-a întocmit un program de calcul adecvat. -
 - ↳ s-a menționat importanța influenței mediului asupra comportamentului tribologic al lagărelor pentru vârfuri;
 - ↳ s-a conceput metodologia de investigare pentru utilizarea sistemului de achiziție de date bazat pe soft-ul VIRTUALBENCH pentru analiza cinematică în regim stabilizat și tranzitoriu;
 - ↳ s-au proiectat și realizat traductoarele și senzorii necesari pentru prelevarea informațiilor cinematice și măsurarea mărimilor cinetostatice;
 - ↳ s-a efectuat un program experimental pentru determinarea raportului optim al razelor cuzinetului / pivotului și pentru determinarea momentului de frecare real. Volumul experimentelor a depășit $2 \cdot 10^6$ puncte măsurate.
 - ↳ s-a pus în evidență faptul că momentul de frecare experimental este în unele situații mai mare cu un ordin de mărime decât cel teoretic.

6.2 Concluzii

Este pe deplin justificat interesul privitor la studiul lagărelor pentru vârfuri deoarece în ultimul timp se constată o lărgire semnificativă a aplicațiilor în construcția aparatelor de măsurat mai ales în domeniul contorizării energiei electrice și termice, a consumului apei, a debitmetrelor pentru combustibili, etc.

Este motivată aprofundarea metodelor și recomandărilor privitoare la calculul lagărelor pentru vârfuri în scopul soluționării favorabile a dualității precizie – pierderi prin frecare.

Investigațiile experimentale în domeniu, întâmpină reale dificultăți dată fiind valoarea extrem de mică a momentelor de frecare la nivelul ordinului μNm .

Pe baza cercetărilor proprii s-a ajuns la concluzia că pentru soluționarea favorabilă a corelației precizie – proces disipativ, raportul razelor trebuie să se

încadreze în limitele de (2,5 ... 5 (chiar 6)).

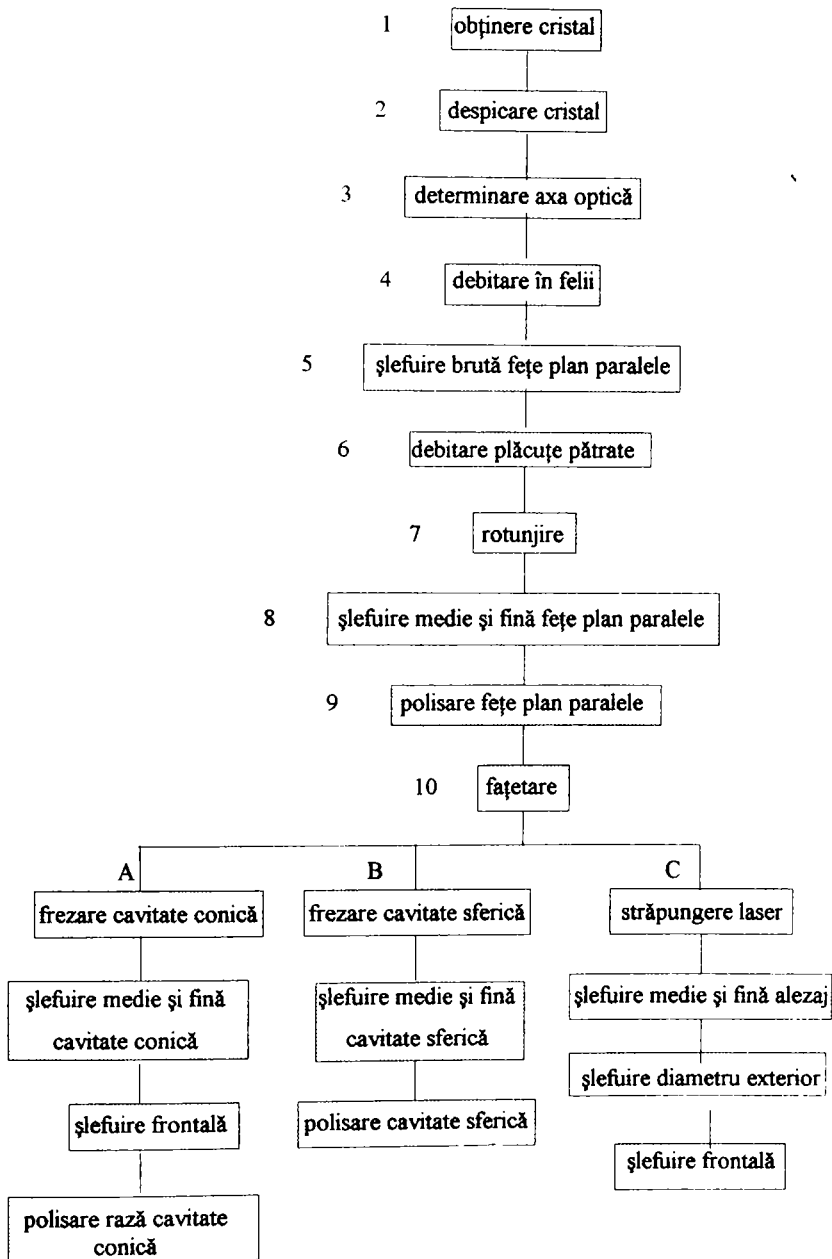
Programul experimental a evidențiat faptul că momentul de frecare efectiv a depășit în unele cazuri cu până la un ordin de mărime valoarea calculată teoretic. Explicația acestui fapt se datorește mișcării reale complexe a pivotului în calota sferică a cuzinetului (rostogolire cu pivotare și alunecare -derapare-) față de mișcarea de pivotare pur axială considerată teoretic.

În toate cazurile se impune protejarea zonei lagărului (eventual capsulare) deoarece orice impuritate (chiar de dimensiuni microscopice) conduce la modificarea comportamentului, fenomenul chimic apărut la nivelul contactului depășind influența elementelor mecanice. Ipotezele hertziene de calcul își pierd valabilitatea și apare riscul unei imposibilități de funcționare în domeniu, cu performanțele dorite.

S-a constatat că prin micșorarea razei pivotului scade momentul de frecare în schimb crește tensiunea efectivă de contact concomitent cu micșorarea durabilității. Cu toate că în general durabilitatea la aceste lagăre este ridicată, un studiu efectuat în acest domeniu ar fi pe deplin justificat.

Pe baza încercărilor s-a putut evidenția faptul că șlefuirea asigură rezultate favorabile din punct de vedere tribologic. Prin efectuarea operației de lustruire a cuzinetului efectele obținute sunt, contrar așteptărilor, defavorabile deoarece conduc la creșterea frecării.

A1 Tehnologii de obținere a cuzinetului lagărelor pentru vârfuri



1 Obținerea cristalului

Piatra sintetică este un material cristalin care are aceleași proprietăți fizice și chimice ca și piatra naturală dar este mai pură ca aceasta. Corindonul este un oxid de aluminiu, Al_2O_3 ; safirul alb este alumina fără alte impurități, rubinul are în componență alumina și oxid de crom. Materia primă este alaiunul amoniacal, $Al_2(SO_4)_3(NH_4)_2SO_4 \times 24H_2O$. După ce se adaugă colorantul, se deshidratează materialul în capsule de porțelan apoi se supune calcinării în cuptoare speciale. După cernere, alumina obținută se introduce în bucărele mașii nii de creștere sau în creuzet.

Monocristalele de safir și rubin sunt materiale cu temperaturi înalte de cristalizare (peste $2000^\circ C$). De aceea creșterea acestora este o problema foarte dificilă din punct de vedere tehnic cât și al conducerii procesului de cristalizare.

Pentru producția de lagăre, cristalele de safir se obțin prin tragere din topitură, prin metodele:

- ↳ ① Czochralski
- ↳ ② Verneuil (a fuziunii în flacăra).

Tragerea cristalelor din topitură în domeniul temperaturilor înalte impune luarea în considerare a următoarelor probleme legate de procesul creșterii:

- a) aspectul fizico-chimic legat de starea și interacțiunea topiturii cu mediul înconjurător, care comportă două grupuri de reacții:
- b) aspectul cristalografic privind natura apariției defectelor în cristal și dependența lor de condițiile de creștere.

Intensitatea interacțiunii topitură-particulă străină, depinde de:

- dimensiunea particulelor străine
- vâscozitatea topiturii
- proprietăți fizico-chimice ale peliculei de topitură.

Parametrii fundamentali de cristalizare, în cazul tragerii din faza topită sunt:

1. puritatea chimică a materialului și forma creuzetului
2. viteza de creștere a cristalului
3. gradul de stabilizare a creșterii
4. gradienții de temperatură
5. forma frontului de cristalizare
6. direcția cristalografică de creștere

Optimizarea acestor parametri se face în sensul minimizării defectelor din cristal care conduc inevitabil la modificările caracteristicilor fizice, strâns legate de comportamentul tribologic al "viitorului" cuzinet.

În cazul tehnicilor de creștere prin metodele de tragere din topitură, se elimină orice contact al suprafeței laterale a cristalului cu pereții creuzetului sau incintei în care crește. Caracteristica fundamentală este cristalizarea cu orientare predestinată în condițiile în care interfața solid-lichid rămâne fixă.

Forma și mărimea cristalului sunt determinate de existența forțelor capilare ce produc un menisc în regiunea limită a interfeței.

Cristalizarea depinde de:

- transferul de masă și căldură în sistemul cristal-topitură
- forțele capilare la interfața cristal-topitură

Legătura între dimensiunea secțiunii transversale a cristalului și poziția frontului de cristalizare se poate obține din soluția ecuației capilarității a lui Laplace cu condițiile la limită corespunzătoare.

Simplist tragerea cristalului din topitură se poate reduce la problema cuplării unei fețe a solidului cu suprafața liberă a fazei lichide din care provine.

Intrucât suprafața solidului ce vine în contact cu faza lichidă este întotdeauna mai mică decât aceasta, cuplarea acestora se va face printr-o coloană de lichid, la formarea căreia participă forțele de inerție (legate de curgerea topiturii), forțele de capilaritate și forțele de greutate.

① Metoda CZOHRALSKI

Procedeu de lucru este prezentat în Figura A.1-2

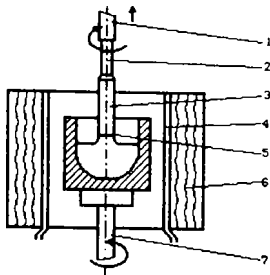


Fig. A. 1.2 Metoda Czohralski

1 -tija suport, 2 -amorsa, 3 -cristal, 4 -sistem de răcire cu apă, 5 -interfață cristal-topitură, 6 -cuptor, 7 -suport creuzet.
unde: 1 -tija suport, 2 -amorsa, 3 -cristal, 4 -sistem de răcire cu apă, 5 -interfață cristal-topitură. 6 -cuptor, 7 -suport creuzet.

Oxidul de aluminiu sub formă de pulbere este topit într-un creuzet, de obicei cu ajutorul unui generator de înaltă frecvență, într-o atmosferă inertă, la o presiune normală. Amorsa (2) se scufundă în topitură și se trage suficient de încet asigurându-se înaintarea și rotirea simultană pentru a obține atât simetria termică cât și agitarea topiturii.

Procesul de creștere prin această metodă comportă fazele:

- se umple creuzetului cu pulbere de oxid de aluminiu
- se fixează germenele de cristalizare pe tija suport, în centrul ei (se controlează prin pornirea mecanismului de rotire)

- se alimentează generatorul de înaltă frecvență
- se începe alimentarea cu gaz protector.

După un interval de timp, pulberea din creuzet se topește. Germenele de cristalizare trebuie ținut în acest interval de timp la câțiva centimetri deasupra creuzetului ca să nu se topească.

Temperatura produsă de generatorul de înaltă frecvență este puțin peste temperatura de topire. În momentul în care pulberea din creuzet s-a topit începe rotirea tijei suport (respectiv a germenului de cristalizare). Tija se rotește cu 30...150 rot/min și este coborâtă până ce germenele de cristalizare este la o distanță de 2...5 mm față de suprafața topiturii. După o pauză de 2...3 minute se stabilește o temperatură de echilibru, iar germenele este coborât în continuare până ce vine în contact cu suprafața topiturii.

Dacă temperatura (T) la care are loc procesul, este stabilită corect, atunci topitura udă germenele. Dacă $T < T_{\text{optim}}$, atunci apar mici cristale parazite pe suprafața topiturii care pornesc de la germenele de cristalizare. Dacă $T > T_{\text{optim}}$, atunci la scufundarea germenului în topitură acesta este topit parțial. În cazul când temperatura este optim aleasă, în 1...2 minute începe tragerea propriu-zisă. Viteza de tragere determinată experimental este 1...5 cm/h.

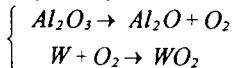
Tragerea poate fi continuă sau periodică. Odată cu scăderea cantității de topitură din creuzet se modifică continuu și distribuția temperaturilor din sistem. Din acest motiv, la creșterea unei bare de secțiune constantă, temperatura topiturii este modificată gradat. Pentru a putea crește cristale de formă cilindrică cu o lungime ~ 1000 mm, între viteza de tragere și temperatura la care are loc topirea pulberii, trebuie să fie o corelație perfectă. Astfel, pentru o scădere mai rapidă a temperaturii topiturii, sau o viteză de tragere mai scăzută se obțin bare cu diametru mai mare. Prin ridicarea temperaturii topiturii sau mărirea vitezei de tragere se obțin cristale cu diametru mai mic.

La creșterea cristalelor se utilizează toată masa de topitură. În general, se evită rămânerea topiturii în creuzet, deoarece solidificarea ei poate distruge creuzetul. Când s-a epuizat cantitatea de topitură, se oprește încălzirea creuzetului iar curgerea gazului protector se continuă până sistemul a fost răcit la temperatura camerei. În final cristalul se taie cu grijă de pe suport. Cristalul are aceeași orientare cristalografică ca cea a germenului de cristalizare.

Densitatea defectelor care apar la cristalele obținute prin această metodă crește odată cu creșterea curbării frontului de solidificare. Cu cât interfața lichid-solid e mai apropiată de forma plană, cu atât perfecțiunea structurală și omogenitatea optică este mai mare. Când rata de tragere este prea mare, (interfața lichid-solid devine concavă) atunci se observă apariția unor centri de nucleație spontană necontrolată care introduc defecte în cristal.

Cu toate că apar neomogenități legate de interacțiunea topiturii cu creuzetul și de condițiile de creștere nestaționară, cristalele crescute prin această tehnică au calități optice superioare, dar nu și cele fizice. Cristalele de

corindon trase din creuzete de wolfram sau molibden prezintă incluziuni metalice provenite din impuritățile metalice ce apar în topitură în urma reacției cu creuzetul.



Cele două tipuri de creuzete pot fi utilizate cu succes dacă tragerea are loc în vid. În cazul acestei tehnici cel mai bun material pentru creuzete este iridiul.

Problema incluziunilor este strâns legată de puritatea atmosferei de protecție. Din studiul influenței atmosferei protectoare asupra calității monocristalului s-a constatat că deși are o puritate foarte înaltă (99,9995% Ar), gazele nu sunt destul de inerte la temperatura de topire, ionizându-se și având un grad relativ mare de disociație, ceea ce conduce la o contaminare a topiturii cu particule și reducerea calităților optice ale cristalelor. Utilizarea He în loc de Ar, are avantajul că acesta are un grad de disociație de trei ori mai mic.

Acțiunea gazelor disociate poate fi micșorată prin aplicarea în direcția de creștere a unui câmp electric corespunzător.

Avantajele utilizării tehnicii Czochralski în tragerea cristalelor de safir și rubin sunt:

- obținere de cristale de dimensiuni mari (gradientii de temperatură mai mici decât în tehnica Verneuil)
- densitate de dislocații scăzută ($<10^4 \text{ cm}^{-2}$)
- cristalele nu prezintă structuri de blocuri de mozaic
- tensiunile remanente sunt mici
- timpul de creștere destul de scurt
- posibilitatea controlului mărimii și diametrului cristalului
- control riguros al atmosferei de creștere
- posibilitatea de a menține stabilă temperatura frontului de cristalizare.

Dezavantajele provin de la pericolul impurificării topiturii în urma interacțiunii acesteia cu materialul creuzetului (Ir, Mo, W). Pentru a evita aceasta și a prelungi durata de utilizare a creuzetelor (1...3 ani) se realizează captușirea lor cu oxizi refractari de tipul MgO, ZrO₂ sau ThO₂.

② Metoda VERNEUIL

În anul 1902, Verneuil a propus și apoi a elaborat o metodă de creștere a cristalelor prin topirea substanțelor în flăcără. Cu ajutorul acestei metode, se pot obține cristale de safir cu diametrul ≈ 75 mm. Datorită cererii ridicate de asemenea cristale și prezenței sursei ieftine de hidrogen, metoda concurează cu altele mai riguroase dar și mult mai scumpe.

Cu toată larga aplicare a metodei Verneuil, nu s-au elaborat prea multe studii deoarece se dispune de o cantitate neînsemnată de date privind măsurătorile la temperaturi mai mari de 2000°C, ale următoarelor caracteristici: vâscozitatea topiturii, tensiunea superficială la suprafața liberă a topiturii și la contactul cu faza solidă, conductibilitatea termică și capacitatea calorică a substanței cristalizate aproape de punctul de topire.

Principial, schema instalației de creștere a cristalelor prin metoda Verneuil este prezentată în Figura A1-3. Alimentarea cu oxigen se face prin conducta 1, iar cu hidrogen prin conducta 9. Pulberea este depozitată în buncărul 3, prevăzut cu sita 4. Alimentarea se face intermitent datorită loviturilor ritmice ale ciocanului 5, care este acționat cu ajutorul unei came. Oxigenul conduce materia primă în pasajul central 7, al arzătorului vertical 8. Pasajul central are o formă conică pentru a limita numărul particulelor de pulbere care ajung în flacăra oxihidrică. Hidrogenul este introdus prin conducta 9 într-o cameră circulară de distribuție 10, de unde este condus spre partea inferioară a arzătorului vertical, prin mai multe canale 11, care înconjoară canalul central prin care circulă oxigenul. Flacăra oxihidrică se dezvoltă în partea inferioară a arzătorului în cuptorul 17. Particulele de pudră, trecând prin această flăcără se topesc și cad pe germenii de cristalizare 14. Acesta are forma unui ac subțire încastrat pe un suport ceramic 12 care e montat pe tija verticală 13. Bara de monocristal care crește, trebuie coborâtă controlat, astfel încât frontul cristalizării să fie în permanență în miezul flăcării oxihidrice. Pentru aceasta, tija 13 este prevăzută cu o cremalieră 16, care angrenează cu pinionul 15. Pinionul este acționat mecanic prin intermediul unui motor electric.

Germenii de cristalizare, după ce a fost montat pe tija verticală, este adus la punctul de topire, fiind introdus în nucleul flăcării oxihidrice. Creșterea bulei de cristal începe prin depunerea de pudră topită pe germenii de cristalizare topit. Când se ajunge la diametrul maxim realizabil pentru condițiile date, (moment sesizabil prin manifestări de instabilitate a zonei topite - clocotire; tendința de scurgere) începe faza de creștere a cristalului, prin reglarea corespunzătoare a debitului de pudră și a temperaturii flăcării. Temperatura flăcării trebuie să crească continuu din cauza pierderilor de căldură care progresează pe măsura creșterii cristalului.

Când se atinge lungimea maxim realizabilă (moment sesizabil tot prin manifestări de instabilitate a zonei) se oprește alimentarea cu pudră, iar după câteva minute se închid brusc admisiile de O_2 și H_2 spre a asigura o solidificare rapidă a zonei topite. Ultima fază constă în menținerea cristalului în cuptor, un timp convenabil spre a evita răcirea bruscă și deci tensionarea.

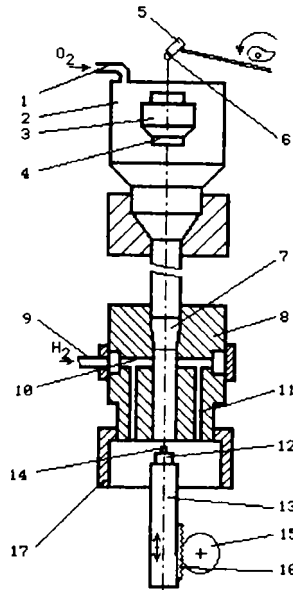


Fig. A. 1.3

Pentru a crește cristale de safir de dimensiuni mai mari, au fost elaborate diferite variante ale acestei tehnici, spre exemplu: tragerea orizontală.

Așezând germenele cristalin perpendicular pe axul arzătorului, rotindu-l și deplasându-l ușor în jos se obține discul monocristalin (suprafața maximă 180 mm^2). Partea superioară a instalației (alimentarea și flacăra oxihidrică) este identică cu cea din Figura A.1.3.

La pornirea instalației din Figura A.1.4, alimentarea cu pulbere este oprită. După ce flacăra oxihidrică topește germenul de cristalizare, se deblochează alimentarea cu pulbere. Pulberea topită se depune pe germenul de cristalizare topit. Acesta se rotește progresiv, astfel încât pulberea topită, să se depună pe toată suprafața lui exterioară, iar apoi este deplasat în jos pentru ca suprafața exterioară a discului (13 a) să se afle permanent în nucleul flăcării. Cuptorul 1 este confecționat dintr-un material refractar și e montat în partea inferioară a arzătorului. Rotirea tijei 13 se obține prin transmisia cu lanț 1. Arborele 2, pe care e montată roata de lanț 3, este fixat în consolă pe suportul vertical 4. Lăgăruirea este asigurată de rulmenții 5. Pentru a se obține mișcarea de translație progresivă a tijei 13, suportul vertical 4 este prevăzut cu o cremalieră 16, care angrenează cu un pinion 15. Tija 13 este acționată de arborele 2, prin intermediul cuplajului 6. Pe suportul 7 este montat ecranul de protecție 8, care protejează orificiul 14. Datorită acestei acțiuni electromecanice creșterea se face în formă de disc. Grosimea discului depinde de lungimea germenului de cristalizare. Pentru a obține discuri groase, pe lângă rotire și deplasare verticală, germenului trebuie să i se imprime o mișcare de oscilație.

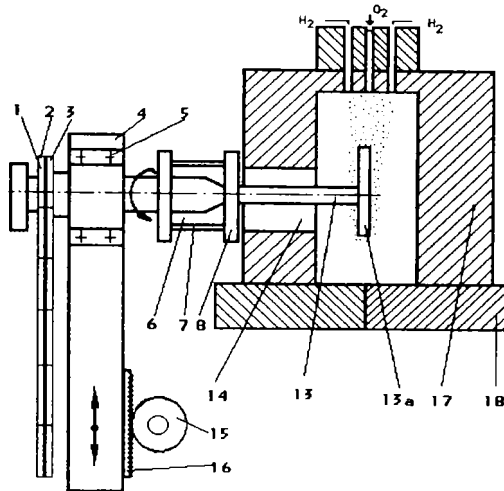


Fig. A1.4

Orientarea cristalografică finală este determinată de orientarea cristalografică a germenului de cristalizare. Experimental s-a arătat că se preferă ca axa optică să fie perpendiculară pe axa de creștere.

Urmărind calitatea cristalelor de safir (rubin) crescute prin metoda Verneuil se constată că pentru realizarea unei creșteri stabile, trebuie asigurată stabilizarea:

- ratei de alimentare cu pulbere
- ratei de tragere a cristalului
- ratei de ardere a gazelor.

Pulberea de oxid de aluminiu se caracterizează prin: grad de puritate ridicat, densitate mică, granulație foarte fină. Impuritățile prezente sunt nedorite pentru că generează apariția unor defecte în monocristalul final. Densitatea redusă și granulația fină sunt necesare pentru a asigura topirea instantanee a pulberii. Oxidul de aluminiu se obține din alauon amoniacal sare dublă de sulfat de aluminiu și sulfat de amoniac. Alauonul se supune calcinării, cu scopul de a elimina componentele volatile, obținându-se oxidul de aluminiu. Calcinarea are loc la o temperatură de 1200°C, iar odată cu creșterea temperaturii are loc topirea alauonului, urmată de dizolvarea în propria sa apă de cristalizare, ceea ce conduce la obținerea unei omogenități ridicate.

Fenomenele ce au loc în timpul alimentării cu pudră sunt deosebit de complexe. Rata de alimentare cu pudră depinde de:

- a. cantitatea de pulbere din buncăr
- b. tendința de aglomerare a pulberii, dependentă de:
 - forma buncărului
 - dimensiunile particulelor
 - proprietățile electrostatice ale particulelor

În procesul alimentării în urma electrizării pudrei, pot apărea depozite de pulbere pe pereții interiori ai sistemului de alimentare. La un moment dat sub acțiunea propriei greutate aceste depozite se desprind și cad pe pelicula de topitură de la suprafața cristalului. Din cauza timpului scurt de topire și a grosimii mici a frontului de cristalizare, particule de pudră incomplet topite ajung la interfața solid-topitură și vor fi înglobate în cristal sub formă de incluziuni.

Viteza de coborâre a cristalului (care crește) trebuie să fie corelată cu rata de alimentare, astfel încât frontul de cristalizare să fie menținut constant în nucleul flăcării oxidhidrice. Instalațiile Verneuil, moderne pot fi dotate cu sisteme de tragere automată; poziția frontului se poate controla cu doi senzori fotoelectronici (pentru mecanismul de alimentare și pentru mecanismul de coborâre).

Pentru menținerea presiunii constante a celor două gaze, instalațiile moderne sunt dotate cu regulatoare automate.

Mărirea diametrului cristalului se obține prin mărirea puterii flăcării. La putere constantă, diametrul acestuia rămânând neschimbat. Pentru micșorarea pierderilor calorice legate în principal de iradiere, procesul cristalizării are loc într-o camera specială de cristalizare. În afara parametrilor variabili de bază trebuie luată în considerare influența reciprocă dintre flacăra de gaz, camera de cristalizare și cristalul propriu-zis. Pentru ca în cristal să existe gradațiile necesare de temperatură este necesar să se asigure într-un fel aducerea căldurii spre cristal. Așezarea radială a temperaturii pe suprafața cristalului acoperit cu topitura poate să varieze pe suprafețe largi schimbând construcția arzătorului și intensitatea fluxului de gaz. Încălzirea suprafeței cristalului este îngreunată din cauza mișcării fluxului de gaz spre suprafață. Gazul care arde vine spre vârful cristalului, își pierde aici o mare parte din energie, se abate de la direcția inițială și se mișcă spre cristal.

Prin interstițiul dintre cristal și perete, flacăra orizontală a gazului se deplasează măbind temperatura peretelui. Din cauza influenței radiației și a conductibilității termice a materialului refractar al camerei, temperatura în zona cristalizării se mărește treptat. Cu cât interstițiul este mai mic cu atât transmiterea energiei calorice de la flacăra la perete este mai bună și deci mai multă căldură se emite peretelui în partea dinspre cristal (schimbul de căldura între pereți și cristal se face prin radiație 90% și prin convecție 10%). Dacă în acest fel nu se obțin gradientii necesari de temperatură de-a lungul cristalului, trebuie să se asigure o încălzire suplimentară a pereților camerei, să se îmbunătățească izolarea lor calorică sau să se schimbe geometria fluxului de gaz.

Un dezavantaj al flăcării oxihidrice este valoarea mică a coeficientului de radiație termică. Ca urmare, în regiunea superioară a cristalului, căldura va fi dispersată prin radiație; ceea ce face ca sub pelicula de topitură, temperatura să scadă brusc, conducând la un gradient de temperatură axial foarte abrupt. Gradientul radial de temperatură este aproximativ același. Forma flăcării oxihidrice influențează forma secțiunii cristalului (dacă flacăra are o secțiune radială eliptică). Inconveniențele introduse de gradientii de temperatură foarte abrupti pot fi reduse prin optimizarea construcției arzătorului oxihidric sau înlocuirea acestuia cu un arzător cu plasmă.

Dacă se respectă regimul de căldură determinat, care depinde de intensitatea fluxului de gaz și de o anumită legătură a componentelor în amestecul de hidrogen-oxigen, pot fi obținute cristale de corindon cu o formă care este foarte apropiată de echilibru. Forma de echilibru a cristalului este aceea formă care la volumul dat posedă o energie superficială minimă. Forma de creștere a cristalului real este cu atât mai apropiată de cea de echilibru cu cât este mai lent procesul de cristalizare.

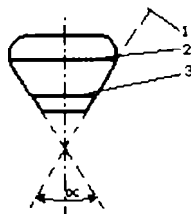


Fig. A.1.5

Creșterea cristalului se realizează prin creșterea intensității fluxului de H_2 . Astfel se asigură pătrunderea topiturii dincolo de muchia cristalului, unde topitura se cristalizează (Figura A.1.5), unde: 1 - direcția în care se produce creșterea, 2 - linia nivelului la care se formează la un moment dat, ridicătura pe suprafața laterală a cristalului, 3 - front de separare cristal-topitură.

Teoria de creștere a cristalelor trebuie să analizeze mecanismul fenomenului de transfer în topitură pe baza analizei bilanțului termic al sistemului. Forma vârfului cristalului este determinată de dinamica fluxului de gaz și de căldura care vine spre acesta de la flacăra și de la pereții camerei. Creșterea cristalului se realizează prin adăugare de material, vârfului topit al cristalului în mod continuu. Astfel, trei parametri variază independent (Figura A.1.6) R-raza cristalului, h-poziția frontului de cristalizare, l-poziția interfeței lichid-vaporii.

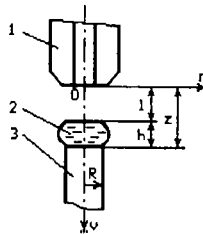


Fig. A.1.6

unde 1 - arzător, 2 - topitură, 3 - cristal

Se alege un sistem de referință cilindric (z, r). Axa Oz coincide cu axa de simetrie a arzătorului și a cuptorului și e orientată spre germene.

În condiții de creștere stabilă, lungimea cristalelor ajunge la 500 mm.

Metoda Verneuil, prezintă următoarele avantaje:

- absența cuzinetului, aparatură simplă din punct de vedere constructiv,
- cristalele sunt ieftine chiar dacă randamentul de obținere este de 50...60% iar randamentul de conversie al pudrei în cristal de aproximativ 60%.

În prezent s-au adus multe îmbunătățiri tehnicii și instalației, astfel că pulberea poate ajunge la o densitate de 20 de ori mai mică decât a cristalului, iar dimensiunea particulelor poate ajunge la 80 milimicroni, astfel principala dezavantaj fiind problema răcirii. Deformația plastică și fisurarea cristalelor sunt provocate de gradientul axial și radial de temperatură. Un alt dezavantaj constă în faptul că perturbarea formării cristalului este sesizată de operator doar după ce cristalul s-a dezvoltat într-o neregularitate mai mare. Defectul apărut nu mai poate fi remediat. Cristalul astfel obținut va prezenta imperfecțiuni cristalografice deoarece este aproape sigur că malformațiile macroscopice ale bulei în creștere sunt legate de imperfecțiunile structurii interne. Cristalele sub formă de bulă sau disc sunt puternic tensionate, prezentând structuri de mozaic, limite de granule, dislocații, incluziuni, bule de gaze și alte defecte care înrăutățesc calitățile mecanice și optice. Cu toate progresele realizate privind tragerea cristalelor prin alte metode, tehnica Verneuil va satisface multă vreme cerințele industriale de cristal de safir și rubin.

Defectele apărute la creșterea cristalelor care nu mai pot fi remediate în timpul creșterii sunt:

defecte

cauze

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • subțierea cristalului în partea superioară • supratopire într-o parte • unghiul sămburelui nu se potrivește cu cel al cristalului ($\pm 5^\circ$) • defect în formă de ace de brad • partea superioară a cristalului prezintă concavitate • partea superioară a cristalului este convexă • cristalul prezintă suprafață strălucitoare alunecoasă • ocluziuni pe circumferință • ocluziuni sub formă de straturi | <ul style="list-style-type: none"> -se oprește admisia de O_2, -conducele sunt înfundate, -oxigenul se elimină prin partea superioară -din duză materialul cade neuniform, -duza nu e bine strânsă sau se înfundă -există o înclinare a sămburelui, centrul flăcării și centrul de cădere al materialului nu sunt coliniare, -cristalul vibrează sau variază cu temperatura -defectul este transmis de la sămbure, -sămburele este topit neuniform, -creșterea este prea rapidă / încetă -diametrul orificiului duzei este prea mic, -raportul H_2 / O_2 nu este bun, de obicei oxigenul este în exces Presiunea oxigenului este prea mică -dacă toată suprafața exterioară este lucioasă / strălucitoare, atunci raportul H_2 / O_2 nu este bun, flacăra este prea sus sau temperatura maximă este coborâtă sub nivelul topirii; -dacă suprafața exterioară este doar parțial strălucitoare, atunci temperatura este neuniformă datorită uzării instalației Cristalul conține mult potasiu Creșterea se face prea repede și materialul nu se mai topește |
|--|---|

- ocluziuni împrășiate
 - înclinarea cristalului
 - cristallul prezintă noduri pe suprafața exterioară
 - supratopire uniformă în partea superioară
 - gătuire simetrică
 - ocluziuni în formă de linii
 - în interiorul cristalului apare un alt monocristal
 - lipsește o bucată din cristal
 - crăpături
 - ocluziuni grupate în șir
 - prezintă strat netopit
- în timpul calcinării, materialul a fost murdărit
 -centrul de cădere nu corespunde cu centrul de cădere,
 -flacăra este înclinată
 -presiunea oxigenului nu este bine stabilită,
 -robinetul este infundat
 -debitul de oxigen crește brusc,
 -căderea materialului nu este constantă în timp
 Pasta pentru suport este prea moale, conține prea mult caolin
 Materialul conține particule oxidate desprinse din rezistența cuptorului sau din sită
 Materialul ajunge în apropierea temperaturii de topire și temperatura coboară brusc, cristallul se contractă și rezultă o tensiune internă mare
 -temperaturile de formare pe diferite direcții nu sunt egale (apare în zona cu temperatura mai scăzută),
 -sâmburele este cu un unghi prea mare
 -materialul este impurificat cu Si, Ca, Mg,
 -sunt pierderi de gaze unghiul sâmburelui este prea mic
 -material este murdărit cu conținut de $Al_2(SO_4)_3$ care se descompune și rezultă SO_3 , care rămâne inclus în masa topiturii
 = brusc prea mult material, sita este ruptă

2 Despicare cristal

Monocristalele se pot despică (fisura) de-a lungul unor plane cristalografice, dând naștere la așchii cu suprafețe lucioase. Formarea suprafețelor lucioase este legată de structura atomică particulară a cristalului, adică prezența în cristal a direcțiilor de-a lungul cărora legăturile chimice sunt slabe. Această despicare este considerată a fi clivajul cristalului.

Clivajul este proprietatea cristalelor de a se desface după plane mai mult sau mai puțin perfecte și rigurose orientate, sub influența lovirii sau presiunii. Clivajul se datorește faptului că în structura reticulară a cristalului, forța de coeziune are valori diferite în funcție de direcții, adică este repartizată în mod anizotrop. Clivajul este totdeauna perpendicular pe direcția minimului de coeziune și astfel din punct de vedere structural reprezintă direcții bine definite. Planul format prin clivaj este o față cristalografică cu indicele mic. În acest plan, densitatea particulelor constitutive este mare în raport cu alte plane reticulare. Din aceasta rezultă că în planul de clivaj distanța dintre particule este cea mai mică, deci coeziunea maximă. Clivajul are indici de clasificare: perfect, bun - dacă reflectă bine lumina, dar fără reflexe sidefoase, potrivit, imperfect - dacă planul rezultat nu are o suprafață perfect plană, și cu totul imperfect. [11]

Dacă așchiile lucioase sunt imperfecte și apar în urma deformațiilor plastice sau a concentrării de impurități, atunci despicarea este un fenomen de spargere.

Monocristalele de safir și rubin clivează în urma unei loviri ușoare. Suprafața lucioasă a așchiilor atinge uneori valori de 1500 mm^2 , fiind perfect netedă.

Măsurătorile energiilor de despicare în cristalele de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ au arătat că pentru clivarea după planul care conține axele: optică și cea de creștere este necesară energia minimă de 60 J/m^2 iar pentru ruperea după un plan perpendicular pe axa optică, energia necesară depășește 400 J/m^2 . [C1]

3 Determinarea axei optice

Această operație este necesară, deoarece axa geometrică a lagărelor trebuie orientat în raport cu axa optică. funcție de solicitarea mecanică în exploatare. Caracteristicile mecanice ale cristalului se modifică, deasemeni, după orientarea față de axa optică.

Operația de determinare a axei optice se realizează cu ajutorul unui microscop cu polarizare.

4 Debătare în felii sau plăcuțe

Această operație se execută cu ajutorul unei scule compusă dintr-un set de discuri diamantate (cu diametrul de aproximativ 140 mm și grosime de 0,35 mm) distanțate prin membrane cu înălțimea corespunzătoare grosimii feliei debitate. Turația sculei este de (aproximativ) 5000 rot/min; răcirea realizându-se cu petrol lampant. [D4]

5 Șlefuire brută fețe plan paralele

Această operație se realizează prin procedeul rodării libere cu disc de fontă și carbură de siliciu cu granulație 150 mm. Blocarea pieselor pe placa de sticlă a dispozitivului se face cu un strat fin de șelac și colofoniu. [D4]

6 Debătare plăcuțe pătrate

Tăierea la unghiuri drepte, după formă pătrată sau tăierea semifabricatelor în alte forme, este identică cu procesul de tăiere în plăci. [D4]

7 Rotunjirea

Această operație impune alinierea plăcuțelor (3), pe un cuțit (2) din carburi metalice. Discul abraziv (1), este din oțel (având diametrul de aproximativ 175 mm) cu o manta de cupru impregnată cu granule abrazive (cu dimensiuni 250...180 mm). Piesele sunt antrenate în mișcare de rotație de discul (4) din cauciuc. Figura A.1.7

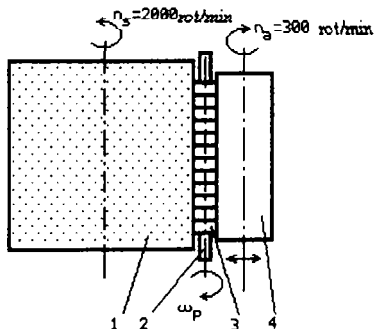


Fig.A.1.7

Rotunjirea se realizează în două etape, cu schimbarea granulației discului abraziv: inițial 250 μm, în final 180 μm. Între cele două faze se execută operația de control și sortare a lagărelor pe grupe de dimensiuni după diametrul exterior pentru micșorarea adaosului de prelucrare la finisare. Piesele trec printr-un cilindru de oțel 1 și 2 înclinați cu un unghi mic. Piesele rulează printr-un cilindru până când distanța dintre ei coincide cu diametrul piesei și acesta cade în sertărașul corespunzător dimensiunii sale reale. [7]

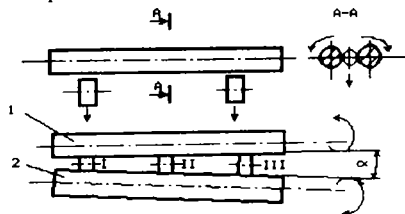


Fig.A.1.8

8 Șlefuire medie și fină

În cadrul acestei operații se folosește ca abraziv micropulbere de carbură de bor M20. [7]

9 Polisarare fețe plan paralele

Procedeul este identic ca cel de la șlefuire, cu specificația că se utilizează ca abraziv micropulbere de agat. [D1]

10 Fașetarea

Această operație se execută prin tobare. [D1]

În urma acestor etape, se obțin lagăre plane. Pentru alte tipuri de lagăre (cu cavitate conică sau sferică, respectiv străpunse) se necesită prelucrări ulterioare.

11 (A,B) Frezare cavitate sferică

Frezarea cavității se face cu sculă cu monogranulă de diamant ascuțită cu conicitate dublă, cu înălțimea vârfului dependentă de raza cavității R.

Scula are o turație de 15000 rot/min.

Piesa are o turație de 3000 rot/min, în sens invers față de rotația sulci.

Verificarea formei cavității se face prin imersarea piesei într-un vas cu iodură de metilen ($\text{CH}_2\text{-I}_2$) și compararea imaginii apărute pe ecranul unui proiector cu profilul teoretic. [D1]

12 (A,B) Șlefuirea medie și fină a cavității

Această prelucrare se execută cu scule profilate diamantate având turația de 22500 rot/min. Piesa are o turație de 4000 rot/min. [D1]

13 (A,B) Polisararea razei cavității

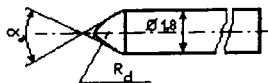


Fig. A.1.9

Pentru această prelucrare se folosește un dorn conic din oțel (Figura A.1.9) și o pastă de rodare cu carbură de bor MI-2.

BIBLIOGRAFIE

- A1 ACZEL, O., NICOARA, I., *Formarea defectelor de structură în procesul de creștere a cristalelor*. Monografia de fizică, Timișoara, 1989
- A2 ATTINGER C., *Industrial Diamond Review*, 12,136, 1952
- A3 ARAMAKI, H., CHENG, H.S., *The contact between rough surfaces with longitudinal texture (part I)*, ASME, *Journal of Tribology*, 115, p 419-424, July 1993
- B1 BUBERT, J. - *Betrachtungen über die vertikale Spitzenlagerung bei elektrischen Zeigermeßgeräten Feinwektechnik*, Organ der VDI, november 1962, p.393 – 407
- B2 BUSH, A., W., GIBSON, R.D., *The elastic contact of a rough surface*, *Wear*, 48, p15-34, 1978
- B3 BERTHE, D., MICHAU, D., *Surface roughness effects in lubrication: effect of roughness ratio and Hertzian pressure on micropits and spalls in concentrated contacts*. Proc of the Leeds- Lyon Symposium, 1977
- B4 BAILEY, D.M., SAYLES, R.S., *Effect of roughness and sliding friction on contact stresses*, ASME, *Journal of Tribology*, 113, p 729-738, October 1991
- C1 CIUHANDU, A., BIRAU, O., *Safirul și rubinul*, Editura Facla, Timișoara, 1986
- C2 COFFIN, L.F., *Trans. Am. Soc. Lubrication Engrs*, 1, 108, 195
- C3 CHANG, W.R., ETISON, I., *An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces*, ASME, *Journal of Tribology*, 109, p 257-263, 1987
- D1 DEMIAN T., *Contribuții la studiul și încercarea lagărelor pentru vârfuri*, Teza de doctorat, București, 1969 ianuarie
- D2 DEMIAN T., *Elemente constructive de mecanică fină*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985
- D3 DUWELL, E.J. *Friction and Wear of single Cristal Sapphire Sliding on Steel*, *Journal of Applied Physics*, vol.33, nr.9, 1962, sept.,
- D4 DIACONESCU, Gh., *Tehnologia mecanicii Fine și Microtehnicii*, vol.II, Editura Tehnică, București, 1985
- D5 DENAPE, J., PARIS, J.Y., PETIT, J.A., *Changement de regime de lubrification dans les contacts rugueux acier - ceramiques*, *Materiaux & Techniques* nr. 3-4, 1995
- D6 DOBRA, Andreea – *Influența modului de elasticitate a safirului asupra momentului de frecare teoretic din lagărele pentru vârfuri*. Simpozion Național PRASIC 98, Ediția

- D7 DOBRA, Andreea – *Microlagăre cu pietre semipreţioase cu utilizare frecventă*, Analele Universităţii Oradea, 1992
- D8 DOBRA, Andreea - *Pierderi prin frecare în lagărele cu contact teoretic punctiform*, Simpozion MTM , Universitatea Tehnică Timişoara, 1992
- D9 DOBRA, Andreea, *Cercetări experimentale ale pierderilor prin frecare în lagărele pentru vârfuri*, Revista Română de Mecanică Fină şi Optică – Supliment nr.2/1998 COMEFIM, 275-279
- D10 DOBRA, Andreea, *Influenţa dimensiunilor fusului respectiv cuzinetului asupra momentului de frecare din lagărele pentru vârfuri*, Revista Română de Mecanică Fină şi Optică – Supliment nr.2/1998 COMEFIM, 271-275
- F1 FISCHER, E., *Untersuchungen der betriebsbedingten Eigenarten von Spitzenlagern*, Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Dresden - 6 - 1956/1957, p1215-p1226
- F2 FISCHER, E., *Die Bewegungsvorgänge und Reibverhältnisse in Spitzenlagern mit vertikaler und horizontaler Achsanordnung*, *Feinwerktechnik*, Organ der VDI – Fachgruppe Feinwerktechnik, dezember 1957, 417-425
- F3 FICHTER R . M , MAURER P. – *A propos de la contribution à l'étude des causes d'inexactitude des compteurs à courant alternatif*. Revue générale de l'Electricité , 13 fevrier 1932 (p 224-226)
- G1 GODET, M., *The third body approach: a mechanical view of wear*, Wear, 100, pp437-452, 1984
- G2 GRUNBERG M . G. – *Emploi de pivots en saphir dans les compteurs d 'électricité* , Revue générale de l 'électricité section industrielle , 2 Juillet 1938 .
- G3 GLIGOR, O., RADULESCU, C., - *Bazele proiectării şi designul produselor*, Editura MIRTON, Timişoara 1998
- G4 GROBNER, HOFREITER, *Unbestimmte Integrale*. Springer Verlag 1949 p. 59- 71
- H1 HILDEBRAND, A., *Feinmechanische Bauelemente*, VEB, Verlag Technik, Berlin, 1980
- H2 HAMILTON, G.M., GOODMAN, L.E., *The stress field created by a circular sliding contact*, ASME, Journal of Applied Mechanics, 33, p 371-376, 1966
- I1 IMREH, I, *Cristalografie*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1966
- J1 JANKE, EMDE, *Tafeln höherer Funktionen*. B.C. Teubner Verl. Leipzig 1952 p. 53 –
-

- K1 KIMURA, Y., J. SIGIMURA, *Micro-geometry of sliding surfaces and wear particles in lubricated contact wear*, Wear 100 pp 33 - 45, 1984
- K2 KRAGELSKI I.W., MIKHIN N.M., *Handbook of Friction units of Machines*, ASME PRESS - New York, 1988
- K3 KÖLZNER, Renate, *Beitrag zum Problem des Reibungsverhaltens fester Körper bei extrem kleinen Berührungsflächen - Anlagen zur Dissertation*, Technischen Universität Dresden, 1965
- K4 KRAUSE W., *Konstruktions - Elemente der Feinmechanik*, Carl Hanser Verlag, München Wien 1989
- L1 LACEY, P., TORRANCE, A.A., J.A.FITZPATRICK, *The relationship between the friction of lubricated rough surfaces and apparent normal pressure*, ASME. J of tribology, 111, 1989
- L2 LANCE, B.J., SADEGHI, F. *The normal approach and stick-slip phenomena at the interface of two rough bodies*, ASME, Journal of Tribology, 115, p 445-452, July 1993
- L3 LEE, S.C., CHENG, H.S, *On the relation of load to average gap in the contact between surfaces with longitudinal roughness*, Tribology Transaction, 35, p523-529, 3.1992
- M1 MC COOL, J.I., *Comparison of models for the contact of rough surfaces*, Wear, 107, p37-60, 1986
- N1 NICOARA, I., 1989 *Formarea defectelor de structură în cristale în procesul de creștere*, Monografie
- N2 NAYAK, P.R., *Random process model of rough surfaces*, ASME, Journal of Lubrication Technology, 93, p 398-407, 1971
- P1 PERJU, D., CRUDU, M., sa, *Studiul teroetic și experimental privind îmbunătățirea funcționării echipajului mobil și a mecanismului totalizator*- Protocol - Beneficiar AEM, 1974
- P2 POPINCEANU, I., *Probleme fundamentale ale contactului de rostogolire*, Editura Tehnică, București, 1985
- R1 RICHTER v. VOSS, *Bauelemente der Feinmechanik*, VDI Verlag GmbH Berlin, 1938
- S1 STEIJN, R.P., *On the Wear of Sapphire*, Journal of Applied Physics, vol.32, nr.10, 1961, oct.
- S2 SMITH, J.D., *A new diagnostic technique for asperity contact*, Tribology International,

26 (1) pp25-27, 1993

- S3 STERN, W., *Industrial Diamond Review*, 12,nr.137, 1952
- S4 STOLT, K.J., T.G.KING, *Analytical techniques in surface topography and their application to the running in experiment*, Wera 43 pp 99 - 115, 1977
- S5 STOTT, V., *An investigation of problems relating to the use of pivots and jewels in instruments and meters*, Journ. Instr. Electr. Engineers 1931, 751-756
- S6 SHOTTER , G . F – *Recherches expérimentales et probemés relatifs aux systèmes de pivotage des compteurs d'énergie électrique*. The Journal of the Instituton of electrical engineers , dec . 1934 (p 754-784)
- T1 TAKADOUM, J., *Doctorat d'Etat thesis*, Orsay, 1986
- T2 TAKADOUM, J., *Tribological behaviour of alumina sliding on several kinds of Materials*, WEAR 170, p285-290, 1993
- T3 TAKADOUM, J., PIVIN, J.C., *Journal Materials Scients* nr. 20, p 480, 1985
- T4 TAGG, G.F., *Nomographic Representation of the Elastic Contact Conditions between Steel Pivot and Sapphire Jewel*. Journal of Scientific Instruments, 1947, 244-248
- T5 TAGG, G. F., *The Maximum Pressure between Pivot and Jewel in an Instrument*. Instruments Practice, 1957, 130-131
- V1 VAINSTEIN, B.K., *Cristalografie modernă*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1989
- W1 WANG F.X.,LACEY P.,R.S GATES, S.M.HSU, *A study of the relative surface conformity between two surfaces in sliding contact*, ASME J of tribology, 113 pp 755 - 761, 1991,oct
- W3 WACHSMANN , F – *Recherches sur les frottements dans les compteurs d ' énergie électrique, particulièrement dans les cas de variation des valeurs de frottements au cours d'un longue durée de service*, Revue général de l'Electricité, 26 mars 1938 (p 392-395)
- Y1 YAMADA, K., TAKEDA, N., *Mechanisms of elastic contact and friction between rough surfaces*, Wear, 48, p15-34, 1978
- *1 <http://www.bahvnagar.com/jewels>
- *10 <http://www.gemstone.org/sapphire.html>
- *2 <http://www.swiss-jewel.com/material.htm>
- *3 <http://www.generalruby.thomasregister.com>
- *4 <http://www.birdprecision.com>
- *5 <http://www.ltdceramics.com>
- *6 Catalog de produse AEM - SA Timișoara 1995
- *7 C. GieseKG Industrie - Edelsteine- Germany
- *8 http://www.csem.ch/instrum/princ_tribo.html
- *9 <http://www.chatam.com/rubies.htm>