

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

Nr. Inv. 625.157
Dulap 181 Lit. 0

LA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
ULTATEA DE MECANICĂ

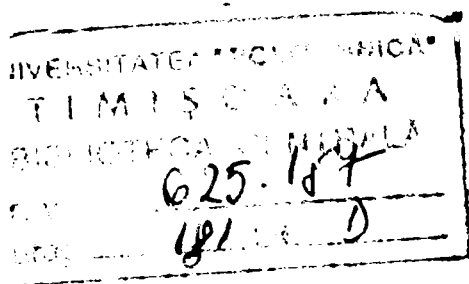
TEZA DE DOCTORAT

CONSIDERATIILE ASUPRA COMPORTAMENTULUI
TRIBOLOGIC AL CONTACTELOR
ELECTRICE ALUNECATOARE

elaborată de
inginer Anca Sorana Popa

Conducător științific:
prof. dr. ing. Marcu Balekics

1999



Cuvânt înainte

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Lucrarea de față reprezintă rodul muncii pe o perioadă de cinci ani, tratând problema transferului curentului prin intermediul elementelor constructive de tip comutator, inel alunecător și perie, acestea reprezentând părți esențiale ce intră în compunerea mașinilor electrice și instalațiilor de măsurare.

Cunoștințele teoretice și experimentele efectuate în cadrul prezentei lucrări pot servi atât firmelor producătoare cât și beneficiarilor, respectiv tuturor celor care exploatează în practică aceste produse.

Finalizarea acestei teze reprezintă o etapă necesară și firească în evoluția mea de cadru didactic și de cercetător și doresc să îmi exprim pe această cale recunoștința față de persoanele care mi-au oferit sprijinul lor pe tot parcursul perioadei de elaborare a tezei de doctorat.

Calde mulțumiri și recunoștință domnului profesor doctor inginer Marcu Balekics pentru competența și exigenta îndrumare, pentru contribuția domniei sale la evoluția mea ca și cadru didactic în cadrul Universității "Politehnica" din Timișoara.

Țin să mulțumesc de asemenea referenților pentru bunăvoința de a accepta să facă parte din Comisia de analiză a tezei și pentru efortul depus la elaborarea referatelor de apreciere.

Mulțumesc familiei pentru înțelegerea și răbdarea de care am avut parte în toată această perioadă.

Timișoara,
iunie, 1999

Autoarea

CUPRINS

Cuvânt înainte

Capitolul 1. Stadiul actual al construcției și utilizării contactelor electrice alunecătoare.....5

- 1.1. Definierea, clasificarea, descrierea contactului electromecanic mobil.....5
- 1.2. Cuplul de materiale folosite în construcția contactelor electrice alunecătoare.....13
- 1.3. Soluții constructive din domeniul curenților slabi și tari.....23

Capitolul 2. Bazele teoretice ale contactelor electromecanice mobile.....34

- 2.1. Bazele teoretice ale contactelor mobile din punct de vedere electric.....34
- 2.2. Bazele teoretice ale contactelor mobile din punct de vedere chimic și termic.....54
- 2.3. Bazele teoretice ale contactelor electrice alunecătoare din punct de vedere al frecării, uzării și ungerii acestora.....63

Capitolul 3. Considerații teoretice privind calculul contactului liniar.....94

- 3.1. Contactul liniar. Deformații elastoplastice.....94
- 3.2. Cavitația zonei marginale a contactului.....103
- 3.3. Contactul cuplei cu straturi subțiri depuse.....103
- 3.4. Distribuția presiunii reale dintre asperități la cuplele de frecare.....106
- 3.5. Lubrifiția cu gaze în regim turbulent.....108
- 3.6. Problema mecanoenergetică a contactului.....111

Capitolul 4. Instalații, echipamente experimentale și metodica de cercetare folosite la studiul comportamentului contactelor alunecătoare.....118

- 4.1. Instalații și echipamente experimentale.....118
- 4.2. Metodica de cercetare.....130

Capitolul 5. Încercări experimentale.....137

- 5.1. Obiectivele cercetării experimentale.....137

<i>5.2. Etalonarea dinamometrelor standului de încercări.....</i>	<i>138</i>
<i>5.3. Măsurarea rugozității.....</i>	<i>138</i>
<i>5.4. Căderea de tensiune și rezistența joncțiunii contactelor alunecătoare..</i>	<i>140</i>
<i>5.5. Procese disipative mecanice și electrice la contactele alunecătoare.....</i>	<i>160</i>
<i>5.6. Contactul alunecător perii din grafit – argint / inele din argint.....</i>	<i>166</i>
Capitolul 6. Concluzii și contribuții.....	172
Bibliografie.....	177

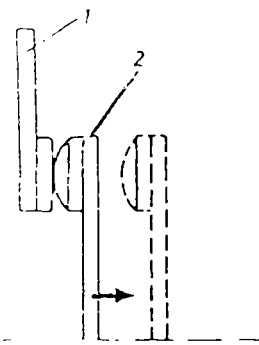
CONSIDERATII ASUPRA COMPORTAMENTULUI TRIBOLOGIC AL CONTACTELOR ELECTRICE ALUNECATOARE

Capitolul 1. Stadiul actual al construcției și utilizării contactelor electrice alunecătoare

1.1. Definierea, clasificarea, descrierea contactului electromecanic mobil

Contactul electric reprezintă ansamblul compus din două piese metalice prin al căror contact forțat se stabilește conducția electrică. Cele două piese sunt elementele de contact (figura 1.1). Practic atingerea se realizează prin apăsarea cu ajutorul unei forțe a unui element contra celuilalt.

Forța de apăsare poate fi creată în general prin intermediul unui element elastic tensionat sau cu componente constructive de îmbinare.



Contactele se clasifică în următoarele grupe: contacte fixe permanente (siguranțe fuzibile de mare putere), contacte amovibile, cele ale aparatelor de comutație (contactoare, rele electromagnetice, separatoare, întrerupătoare de putere) și contacte mobile (alunecătoare permanente sau intermitente și prin rostogolire). Contactele electrice pot fi folosite în cazul curenților slabi sau tari. În figura 1.2 se propune o clasificare a contactelor electrice din punct de vedere al particularităților constructive, funcționale și ale mediului de lucru.

Fig.1.1. Contactul electric
(1- element fix; 2- element mobil)

Contactele electrice suferă pe durata funcționării solicitări termice datorate încălzirii în regim normal, în regim de suprasarcină și uneori în regim de scurtcircuit. În aceste situații încălzirea nu are voie să depășească supratemperaturi prescrise de standarde pentru fiecare regim menționat în parte. Contactele sunt supuse de asemenea acțiunii arcului electric ce se manifestă prin tensiunile induse și aplicate între elementele de contact la separarea acestora. Între elemente poate apare și uzura electrică (migrația de material de pe un element pe

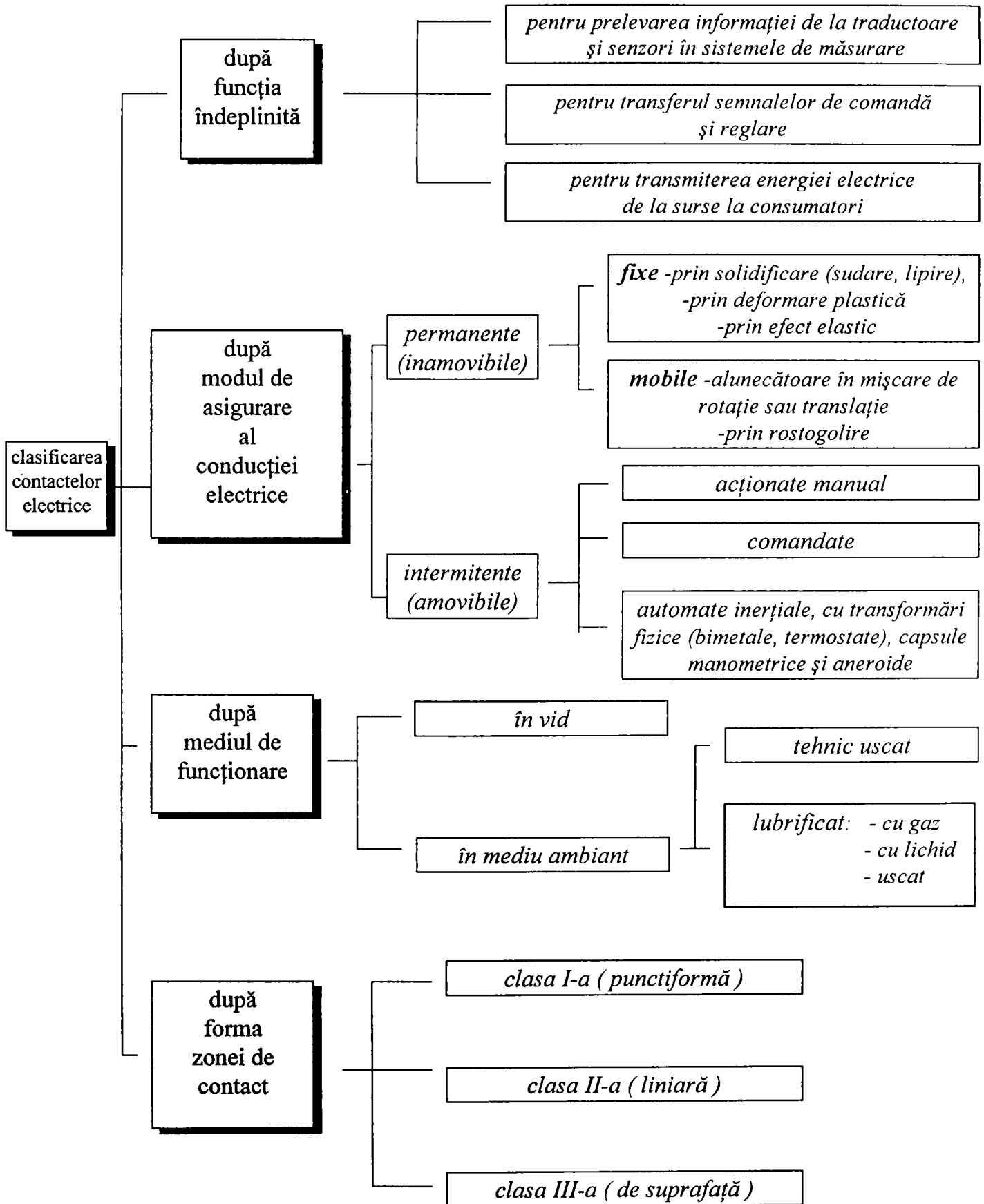


Fig. 1.2. Clasificarea contactelor electrice.

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

celălalt sub acțiunea arcului electric). Uzarea tribochimică intervine ca urmare a strivirii, deformării, deteriorării, respectiv uzării prin frecare a suprafețelor de contact după un număr mare de cicluri de manevră sau exploatarea îndelungată a contactului forțat în alunecare. Materialele folosite în construcția acestora trebuie să prezinte proprietăți de conductivitate electrică ridicată, să fie rezistente la coroziune, să nu se uzeze electrotribochimic și să fie cât mai ieftine.

Contactul electric mobil cu alunecare reprezintă ansamblul compus din două elemente prin a căror mișcare relativă în contact nemijlocit se realizează conducția electrică.

În figura 1.3. se exemplifică un contact prin rostogolire cu role iar în figura 1.4. se prezintă un contact alunecător.

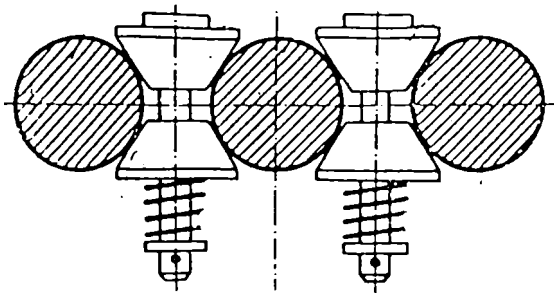


Fig.1.3. Contact prin rostogolire cu role.

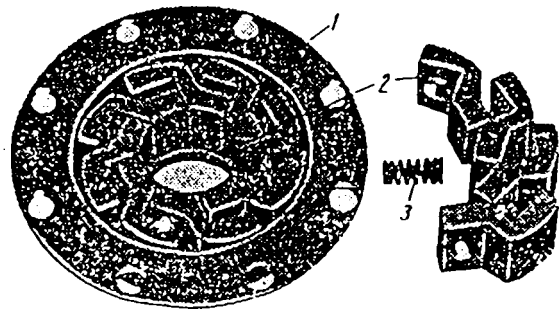


Fig.1.4. Contact alunecător cu casetă (1- casetă, 2- contacte multiple, 3- arc).

Principalele domenii de aplicație ale contactelor electrice mobile sunt următoarele:

- ◆ contacte electrice alunecătoare de tip perie-inel cu densități mici de curent de până la 10^5 A/m^2 (în cazuri extreme $2 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$) folosite la măsurări electrice pentru transmiterea și prelevarea semnalului și cele din domeniul sistemelor cu reglare automată (cuplaje electromagnetice, robotică, aplicații în construcția modernă a autovehiculelor, telecomunicații, electronică, tehnică medicală etc.),
- ◆ contacte electrice alunecătoare folosite la motoare de tracțiune de curent alternativ (motoare universale, monofazate),
- ◆ contactele motoarelor de tracțiune de curent continuu și alternativ (generatoarele locomotivelor Diesel, motoare folosite în construcția utilajelor miniere, motoarele tramvaielor, troleibuzelor, metrourilor etc),
- ◆ contactele motoarelor și generatoarelor de mică putere în curent continuu (tahogeneratoare, mașini unelte de mică putere, motoare ale aparaturii electrocasnice),

- ◆ contactele motoarelor și generatoarelor de puteri medii în curent continuu (motoare și generatoare ale utilajelor de laminare, generatoare navale, motoare și generatoare ale utilajelor pentru prelucrarea hârtiei, amplificatoare mecanice),
- ◆ contactele motoarelor și generatoarelor pentru puteri mari în curent continuu (motoarele utilajelor de laminare, turbogeneratoare, generatoare și motoare navale etc).

Principalele forme și cotele de gabarit ale periilor folosite în construcția contactelor electrice alunecătoare sunt redată în figura 1.5. [3].

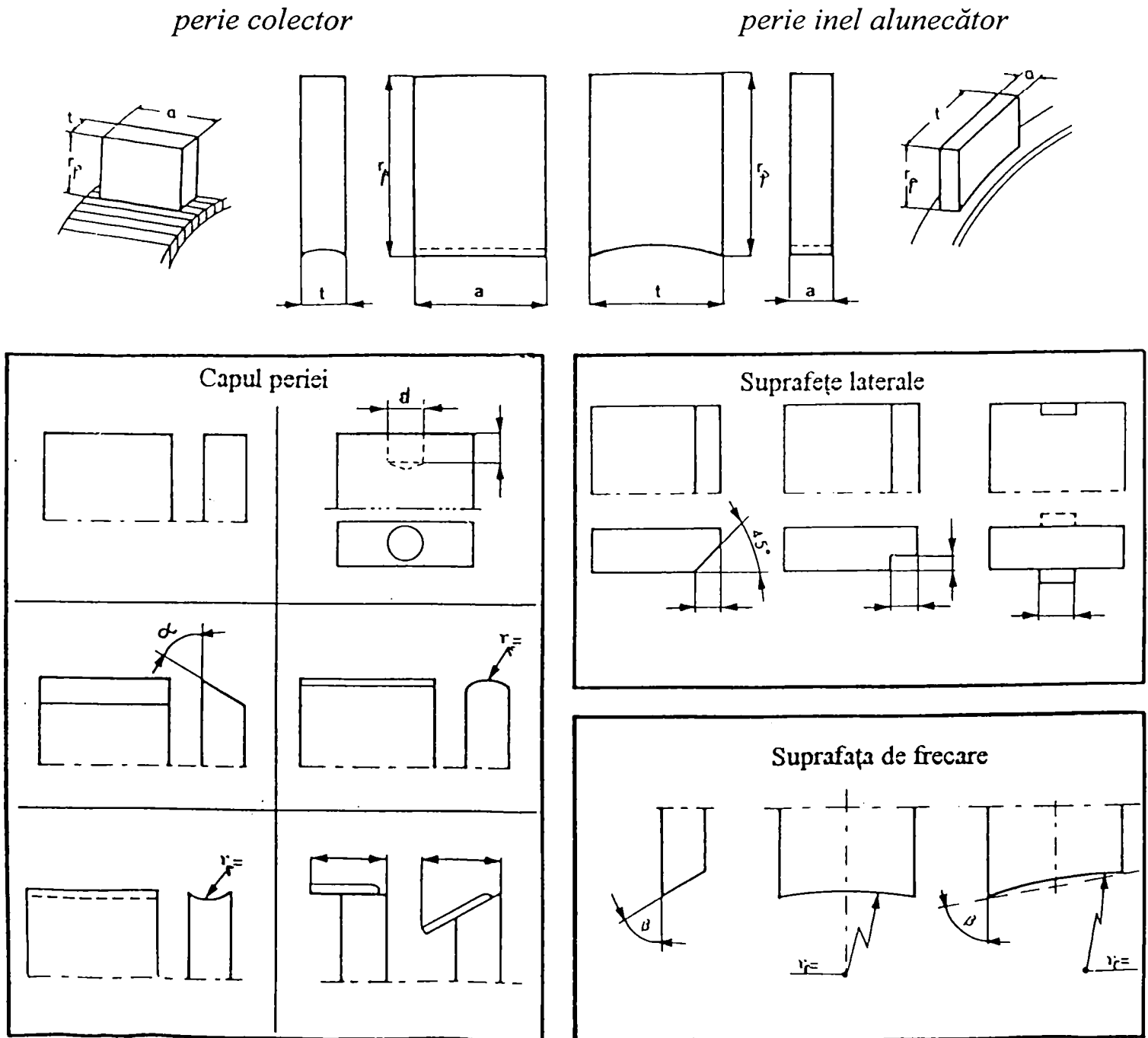


Fig.1.5. Forme și dimensiuni de gabarit ale periilor.

Conșiderații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Comisia Internațională de Electrotehnică recomandă ordinea valorilor nominale ale dimensiunilor de gabarit ale periiilor după cum urmează:

$$t \cdot a \cdot r_p \quad [\text{mm}], ["], \quad (1.1.)$$

unde: t - lungimea periei (în direcție tangențială, valoare foarte precisă),

a - lățimea periei (în direcție axială, valoare foarte precisă),

r_p - înălțimea periei (în direcție radială, valoare aproximativă).

Periile cu capete teșite, rotunjite se stabilesc în funcție de valorile unghiurilor α și β sau razelor r_r .

În figura 1.6. se exemplifică diverse forme constructive de perii.

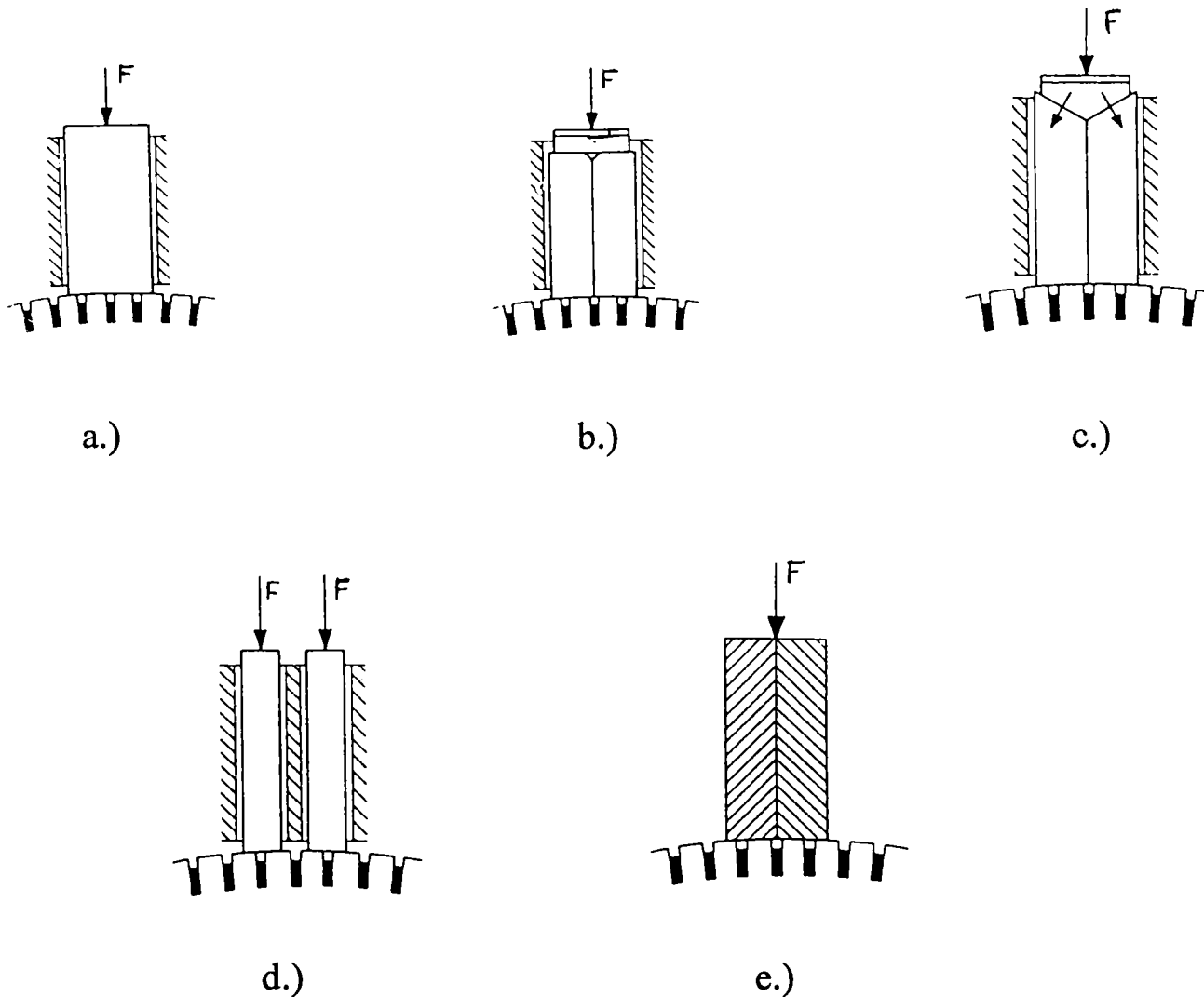


Fig.1.6. Variante constructive de perii
(a.- perie monobloc, b., c.- perii duble cu pernă amortizoare, d.- perie în tandem,
e.- perie dublă în construcție stratificată).

Montarea periiilor se face uniform în cazul motoarelor (perii minus) și generatoarelor (perii plus) și prin respectarea strictă a polarității (figura 1.7.) pentru evitarea arderii lamelelor și pentru echilibrarea efectului electrolitic al polilor electrici.

$$v_p = z = a / (p_p - 1) \tag{1.2.}$$

unde

- v_p - defazarea periiilor,
- z - distanța dintre două perii cu polarizare identică,
- a - lățimea periei,
- p_p - numărul perechilor de poli ai mașinii electrice.

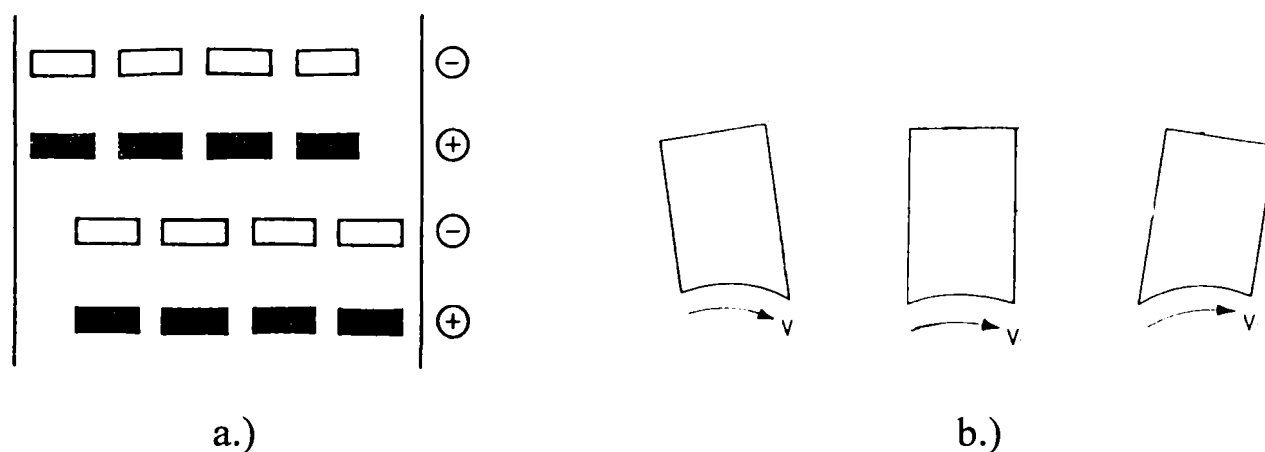


Fig.1.7. a.- Defazarea axială a periiilor unei mașini electrice cu patru poli, b.- dispunerea periei pe inel.

Suprafața de contact a colectorului se supune periodic în timpul funcționării unui proces de lustruire cu șmirghel sau perie abrazivă, după care se curăță suprafața de contact (figura 1.8.).

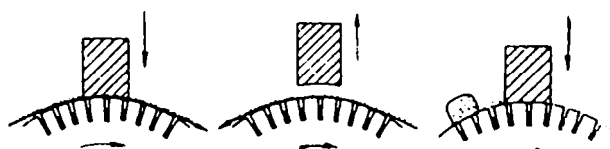


Fig.1.8. Lustruirea suprafeței de contact.

In figura 1.9. sunt reprezentate câteva exemple de dependențe ale parametrilor caracteristici ale periiilor contactelor electrice [13].

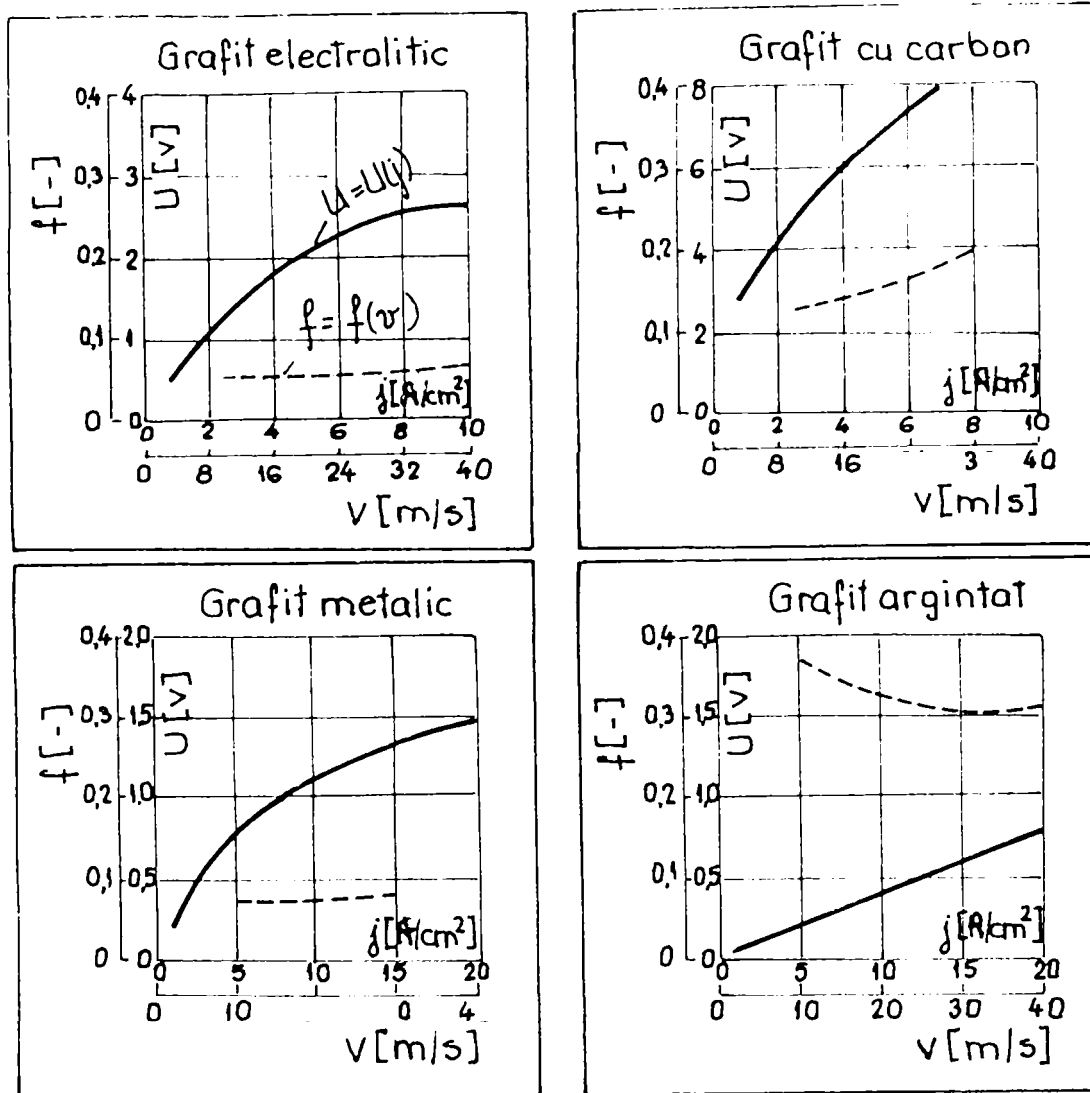


Fig.1.9. Parametri caracteristici ai periiilor:

- ◆ *pentru grafit electrolitic:* colector din Cu, $T = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$,
2 perii: $t \times a = 20\text{ mm} \times 25\text{ mm}$, $p = 2.2 \cdot 10^{-2}\text{ MPa}$, curent continuu,
 $v = 30\text{ m/s}$, $j = 10^5\text{ A/m}^2$
- ◆ *pentru grafit cu carbon :* colector din Cu, $T = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$,
2 perii: $t \times a = 8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, $p = 3.5 \cdot 10^{-2}\text{ MPa}$, curent continuu,
 $v = 20\text{ m/s}$, $j = 6 \cdot 10^4\text{ A/m}^2$
- ◆ *pentru grafit metalic :* colector din Cu Sn 10, $T = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$,
2 perii $t \times a = 20\text{ mm} \times 25\text{ mm}$, $p = 2.2 \cdot 10^{-2}\text{ MPa}$, curent alternativ, 50 Hz,
 $v = 30\text{ m/s}$, $j = 10^5\text{ A/m}^2$
- ◆ *pentru grafit argintat :* colector din Cu Sn 10, $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,
2 perii $t \times a = 8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, $p = 3.5 \cdot 10^{-2}\text{ MPa}$, curent alternativ, 50 Hz,
 $v = 30\text{ m/s}$, $j = 10^5\text{ A/m}^2$

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

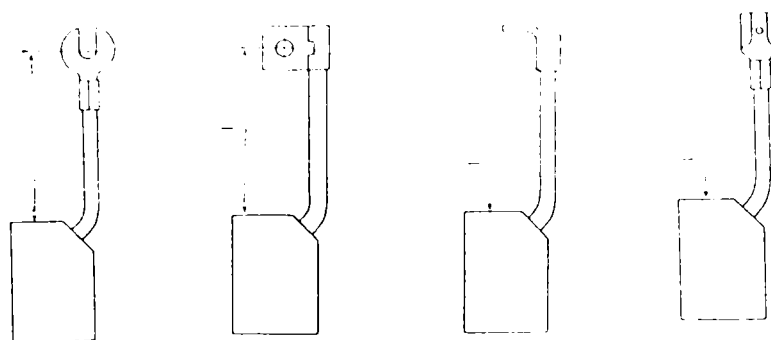
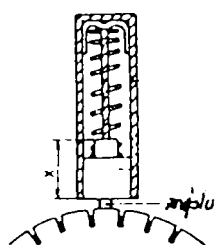


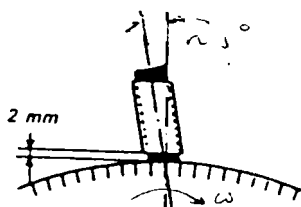
Fig.1.10. Conectarea periilor.

In figura 1.10. sunt prezentate diverse variante de cleme pentru conectarea periilor în circuitele electrice.



Pentru protecția nelor sau colectoarelor cu lamele ale motoarelor electrice față de avariile provocate de periile uzate s-au construit sisteme automate de decuplare a acestora. Un sistem automat de decuplare care intră în funcție în momentul în care s-a ajuns la un anumit grad de uzare a periei în zona de contact (figura 1.11.)

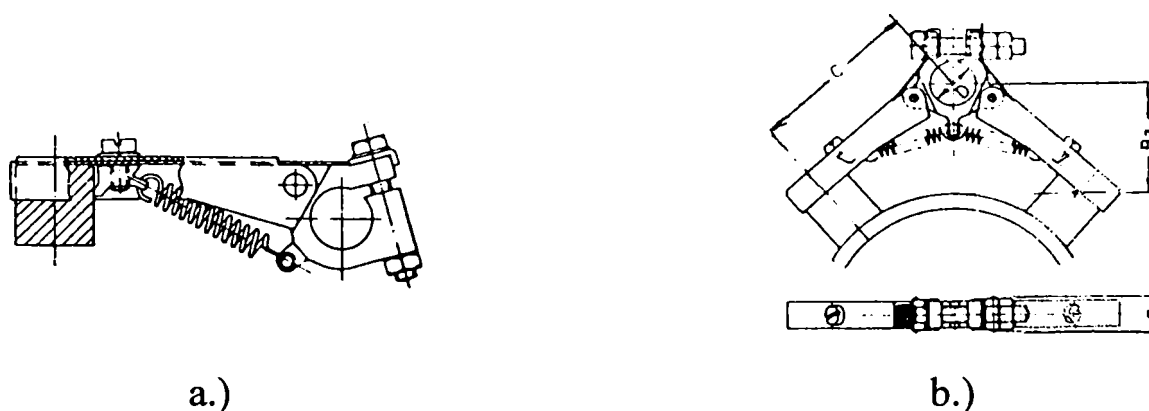
Fig.1.11. Sistem automat de decuplare a contactului electric alunecător.



Distanța dintre suportul periei și colector se stabilește întotdeauna la cel puțin $[2 \div 3]$ mm (figura 1.12.). In acest caz peria poate fi deplasată liniar.

Fig.1.12. Distanța necesară dintre suportul periei și colector.

In figura 1.13. se exemplifică două sisteme suport ale periilor la care mobilitatea are loc după o mișcare oscilantă.



a.)

b.)

Fig.1.13. Sisteme suport pentru perii

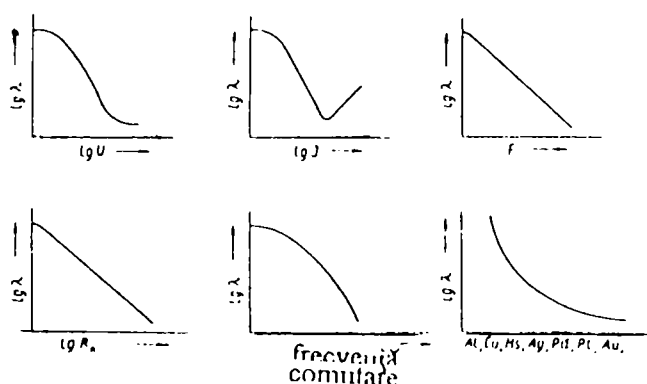
(a.- suport cu un braț, b.- suport cu două brațe :

C-braț suport, D-alezaj bolt, E-lățime suport, B_a-distanța dintre colector și alezaj).

1.2. Cuplul de materiale folosite în construcția contactelor electrice alunecătoare.

Condițiile de utilizare ale unui aparat de comutație constituie factorul hotărâtor la alegerea materialelor utilizate în cazul contactelor electrice. Contactele pentru tensiuni reduse și curenți slabi funcționează în circuite de curent continuu cu migrație fină de material lucrând la tensiuni mai mici de 12 V, deci în absența arcului electric. Acestea impun condiția rezolvării problemei migrației fine de material. Contactele pentru puteri mai mari cu valori ale tensiunilor de până la 500 V se află sub acțiunea arcului electric, deci sunt supuse arderii sau chiar tendinței de sudare, respectiv migrației brute.

Contactele glisante folosesc materiale care trebuie să aibă un coeficient de frecare cât mai redus. Calitățile antagoniste ale materialelor folosite impun o alegere riguroasă, ținându-se cont de o multitudine de factori tehnici și economici cum ar fi: conductivitatea electrică mare, rezistența mare la ardere, stabilitatea termică, mecanică, stabilitatea chimică în raport cu mediul înconjurător (în special cu oxigenul și sulfurul), rezistența mecanică ridicată, prețul de cost scăzut etc., realizându-se astfel un compromis pentru o variantă optimă pentru fiecare caz concret de utilizare.



În figura 1.14. se exemplifică dependența globală a ratei ieșirii din uz λ în funcție de tensiune U și curent I , de frecvența comutării, de criteriul ieșirii din uz R_k , de forța de contact F și dependent de diversele materiale folosite, conform [H6].

Fig.1.14. Criteriul ieșirii din uz a contactelor electrice.

În figura 1.15.b. se prezintă în partea stângă principalele clase de exploatare ale contactelor iar în partea dreaptă principalele clase de metale oferite de tabloul periodic al elementelor.

Posibilitățile de utilizare sunt marcate cu linii de legătură între clasele de exploatare și elementele din clasele de metale.

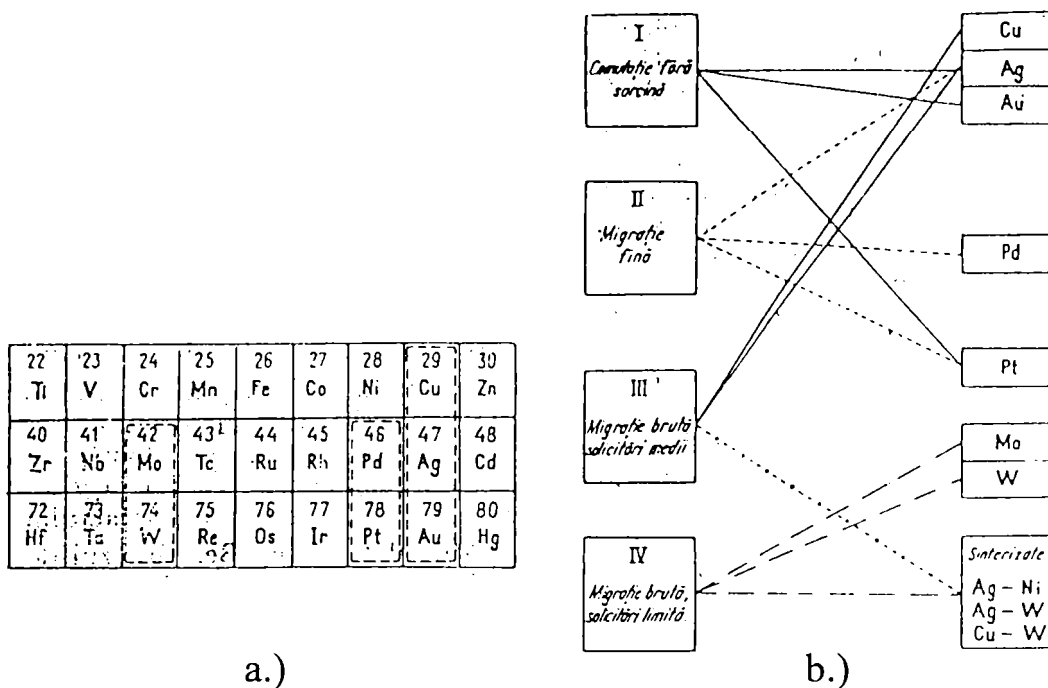


Fig.1.15. Materialele contactelor electrice (a- extras din sistemul periodic al elementelor, b- legături convenabile).

În figura 1.15. a. se prezintă un extras din tabelul periodic al elementelor propus de Jean Perrin în scopul stabilirii unui criteriu de alegere a metalelor folosite la uzinarea contactelor. Elementele care se află pe aceeași coloană au aproximativ aceleași proprietăți. Un exemplu concludent îl constituie coloana care cuprinde Cu, Ag, Au, metale bune conductoare din punct de vedere electric și termic. Grupa elementelor Pd, Pt constituie materiale cu tendință redusă de transport de material în domeniul migrației fine. Elementele W, Mo sunt utilizabile în domeniul solicitărilor intense la arc electric, deoarece temperaturile de topire și fierbere ale acestora sunt din cele mai ridicate. Domeniile de interes sunt încadrate cu linie punctată și cuprind clasele de elemente menționate.

Cuprul și aliajele din cupru. Caracteristic pentru Cu este faptul că are o elasticitate redusă și că proprietățile mecanice scad cu creșterea temperaturii. Din acest motiv se folosesc în construcția contactelor aliajele din Cu.

Aliajul din Cu cu Ag poate servi ca material pentru contactele siguranțelor automate, comutatoarelor în sarcină ale transformatoarelor, deoarece prezintă calități mecanice îmbunătățite. Un adaos de Cd de 1.5 % pe lângă cel de Ag contribuie de asemenea la îmbunătățirea calităților mecanice ale contactului, concomitent cu reducerea pericolului apariției scântei.

Aliajul din Cu cu Be constituie materialul cel mai bun folosit în construcția arcurilor. Contactele lamelare multiple construite din acest material nu au nevoie de un arc suplimentar pentru asigurarea forței de presare.

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Argintul și aliajele sale. Ag este un metal nobil relativ ieftin folosit la:

- ◆ acoperiri galvanice (contacte de Cu argintate) cu grosime de $[5 \div 10]$ μm . Aceste contacte au o largă utilizare în radiotehnică dar și în tehnica curenților tari ori de câte ori întreruperea are loc fără curent sau cu un curent redus,
- ◆ contacte masive din Ag sub formă de nituri, piese sudate sau piese placate.

Ag pur prezintă următoarele dezavantaje: migrația fină de material, duritatea redusă, uzarea mecanică a contactului, tendința de lipire și rezistența redusă la acțiunea sulfului. Din aceste considerente se folosesc mai cu seamă aliajele cu Ag, acestea dovedind calități superioare argintului pur.

Aliajul de Ag-Cd poate avea un conținut de Cd de până la 37%. Prezența cadmiului reduce producerea scânteii, deci creează condiții mai bune de stingere a arcului electric. Formarea de CdO cu mobilitate mare la suprafața contactului micșorează tendința de lipire a contactelor, fără a mări sensibil rezistența de contact. Contactele cu aliaje din Ag-Cd, deși posedă calități esențiale în ceea ce privește stingerea arcului electric scurt și micșorarea tendinței de lipire prezintă neajunsul de a nu se putea lipi pe un suport tocmai din cauza formării peliculei de CdO.

Wolframul. Temperatura de topire ridicată (peste 3000°C) a W face ca acest material să fie utilizat în construcția contactelor puternic solicitate de piciorul arcului electric cum sunt contactele de preluarea arcului electric ale întrerupătoarelor de înaltă tensiune. Din punct de vedere tehnologic acestea se realizează din pulberi de W sinterizate. Contactul din W poate menține arcul electric un timp relativ scurt (câteva ms) fără a-și modifica structura în profunzime.

Contacte sinterizate (pseudoaliaje). Procesul sinterizării are astăzi importanță funcțională și economică în construcția contactelor electrice. Un contact sinterizat realizează un compromis între rezistența ridicată la ardere (punct de topire ridicat) și conductivitatea electrică mare (rezistență de contact redusă).

Contacte sinterizate Cu - W. Ambele metale componente sunt oxidabile și ca urmare contactele realizate nu pot servi drept contacte de durată ci ca precontacte (la închidere) sau drept contacte de arc (la deschidere). Asemenea contacte se folosesc în aer sau în ulei ca și contacte de durată numai în cazurile în care elementele de contact se lovesc puternic, se freacă unul de altul cu frecvență mare și deci stratul de oxid este în permanență înlăturat. W imprimă contactului rezistență mare la arc electric iar Cu îi cedează conductivitate electrică.

Contacte sinterizate Ag - oxizi metalici. Prin aceste adaosuri contactul pierde tendința de lipire iar scânteile electrice se reduc.

Contacte sinterizate Ag-Ni. Combinația argintului cu nichelul împrumută contactului rezistență mare la ardere. Chiar cu un conținut redus de Ni piesele se pot prelucra ușor prin laminare, placare cu ajutorul sudurii și lipirii. Duritatea pieselor crește considerabil, ajungându-se la valori de 7000 MPa la un conținut de 40 % Ni.

Contacte sinterizate Ag - W (Mo). Pentru realizarea unor piese și mai rezistente la ardere decât aliajul sinterizat din Ag-Ni se utilizează wolframul sau molibdenul ca adaos la argint. O piesă sinterizată din argint cu 30 % wolfram atinge o duritate de până la 1200 MPa și are conductivitatea de până la $35 \cdot 10^6 [\Omega \cdot m]^{-1}$.

Contactele sinterizate din Ag-grafit sunt utilizate pentru:

- ◆ reducerea tendinței de sudură,
- ◆ realizarea unor contacte alunecătoare, grafitul având proprietăți de lubrifiant.

Pentru realizarea contactelor alunecătoare conținutul critic de grafit este de $[5 \div 10]\%$.

Atmosfera în care lucrează contactul electric și temperatura ridicată a arcului electric favorizează reacții chimice asupra metalelor (pure, aliaje sau sinterizate).

Argintul nu reacționează cu oxigenul din atmosferă dar indiferent de gradul de puritate este foarte sensibil la acțiunea sulfurii, formând cu acesta sulfura de argint (Ag_2S). Inegrirea caracteristică a argintului se datorește formării peliculei de sulfură de argint.

Pelicula de sulfură de argint este în general mai puțin dăunătoare ca peliculele de oxizi ale metalelor oxidabile dar constituie un motiv ca rezistența de contact să crească de $[2 \div 3]$ ori față de rezistența de contact a argintului pur, neatacat.

Arcul electric activează procesul de oxidare. În cazul argintului acest proces este de dorit în scopul reducerii tendinței de sudare a contactelor din argint pur. Astfel se explică de ce adaosurile în aliajele și contactele sinterizate de argint sunt constituite din elemente oxidabile.

Contacte sinterizate Ag - Cu. Un aliaj Ag - Cu cu un conținut de până la 10% Cu se comportă mai bine la tendința de sudare decât argintul pur.

Contacte sinterizate Ag - Cd. Prin alierea argintului cu cadmiu se urmărește formarea CdO care se disociază pe contacte, împiedicând sudarea acestora.

Contacte sinterizate Ag - W. Arcul electric acționează nefavorabil asupra contactelor Ag - W în sensul că produsul rezultat din reacție își pierde sensibil conductivitatea electrică prin formarea de wolfram de argint. În cazul funcționării în curent continuu wolframul de argint fiind un produs lichid încă la temperaturi relativ joase ($550^\circ C$), va rezulta o migrație însemnată de material de la catod la anod. Astfel din cauza reacțiilor favorizante de temperatură ridicată a arcului electric nu se obțin proprietăți aditive ale componentelor aliajului sau contactului sinterizat.

În tabelul 1.1. se prezintă o serie de materiale cu conținut de Ag folosite în construcția contactelor electrice, conform [17].

În tabelul 1.2. se prezintă o serie de materiale folosite la construcția contactelor electrice, conform [5]:

Tabelul 1.1.

<i>material</i> (punct de topire [°C], conductibilitate electrică $\cdot 10^9$ [$\Omega \cdot m$] ⁻¹)	<i>proprietăți</i>
Ag 960, 60	conductibilitate electrică și termică maximă, încinare spre sudabilitate și spre migrație de material
AgNiO,15 960, 58	duritate mai ridicată și punct de ardere mai ridicat în comparație cu Ag pur
AgCu3...28 940...779, 52...48	duritate mai ridicată, migrație de material redusă; cu număr crescând de comutări și conținut în Cu crește rezistența de contact
AgCuNi (Cu+Ni < 2%) 940, 52	comportament bun la comutare la temperaturi înalte, proprietăți asemănătoare aliajelor AgCu
AgNi 10...40 -, 37...50	rezistent la ardere, migrație superficială de material, rezistență de contact ușor ridicată
AgCdO10...15 pulberi -, 44...50	rezistent la ardere, foarte rezistent la sudabilitate, rezistență de contact redusă, proprietăți avantajoase privitor la arcul electric
AgZnO 8 -, 45	oxidul stabil termic îi conferă rezistență ridicată în cazul sudării, ardere redusă, rezistență de contact ridicată
AgSnO8...12 -, 40...50	rezistență mare la ardere, proprietăți scăzute de sudare și migrație de material, rezistența de contact scăzută, material ecologic
AgC2...5 -, 42...48	rezistență foarte ridicată la sudare, rezistență de contact scăzută
AgW50...80 -, 18...26	rezistență ridicată la ardere, rezistență ridicată de sudare la conectare, rezistență mare de contact
AgWC40...70 -, 20...24	rezistență la ardere, rezistență mărită de sudare și rezistență de contact scăzută comparativ cu AgW
AgMo50...65	rezistență la ardere și la sudare mai scăzute ca la AgW rezistență de contact mai scăzută și mai constantă

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

625.157/181D

Tabelul 1.2.

<i>material</i>	<i>proprietate</i>
Au <80, <10, 5	rezistență la coroziune, sudabilitate la rece
AuAg8...10 <80, <10, 6	rezistență la coroziune, duritate mai mare și sudabilitate la rece mai mică ca Au pur
AuNi1...2 <80, <10, 7	
AuAg25Pt6 <300, <10, 12	rezistență bună la coroziune, duritate ridicată
AuAg20...30 <300, <10, 8	
AuNi5 <300, <10, 8	
AuPd40 <300, <10, 9	
AuCo5 <12000, <300, 9	rezistență bună la coroziune, tendință de oxidare, stabilitate față de migrația de material, duritate ridicată
AuAg26Ni3 <12000, <300, 10	
AuAg24Cu6 <12000, <300, 8	
PdAg70 <12000, <300, 15	rezistență foarte bună la coroziune, duritate ridicată, rezistență bună la ardere, migrație redusă de material
PdAg50 <12000, <300, 20	
PdAg40 <12000, <300, 30	
PdAu20 <12000, <300, 20	
PdCu15 <12000, <300, 25	conductibilitate electrică și termică foarte bună, migrație redusă, ieftin
PtW5 >12000, >300, 25	stabilitate bună la coroziune, stabilitate bună la temperaturi înalte, foarte slabă migrație de material, tendință de sudare foarte scăzută
PtNi8 >12000, >300, 25	
PtRu5...20 >12000, >300, 25	
PtIr5...20 >12000, >300, 25	
W >12000, >300	tendință de oxidare, rezistență ridicată la ardere
Mo >12000, >300	

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

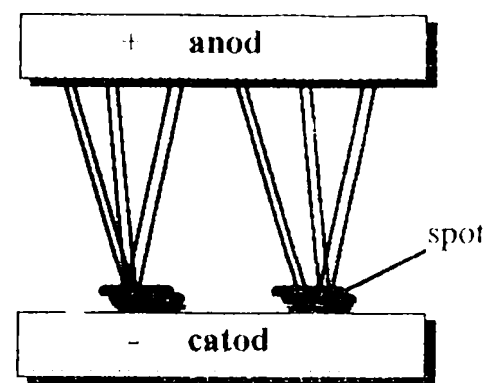
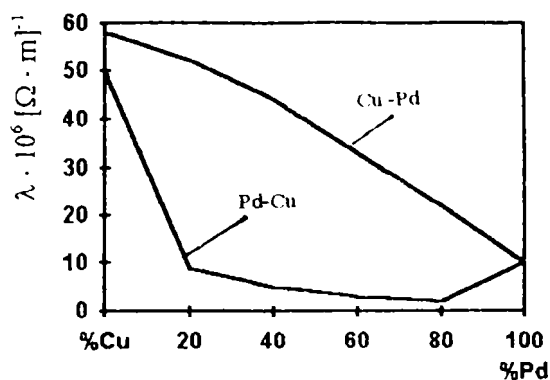


Fig.1.16 Conductibilitatea electrică a aliajului Cu-Pd [6] Fig. 1.17 Arcul electric difuz

La apariția arcului electric electronii traversează distanța dintre contacte cu viteze de ordinul 10^6 m/s formând coloane de arc difuz conice (figura 1. 17.), având în vecinătatea axei temperaturi mai mari de 3000 K. Arderea arcului electric presupune existența unui curent minim de menținere dependent de materialele contactului. Pe durata de ardere a arcului electric difuz gradul de electroeroziune a contactelor se consideră aproximativ constant, fiind dependent de materialul contactului și de forma curentului ca în tabelul 1.3. [A3].

Tabelul 1.3.

<i>materialul</i>	<i>temperatura de topire</i> [°C]	<i>gradul de electroeroziune</i> 10^6 [g/C]		
		<i>c.c.</i>	<i>impuls</i> 250 ms	<i>impuls</i> 100 ns
Ag	960	150	-	50
Cu	1083	115	35	-
W	3380	62	55	136
Sn	227	-	295	-

Arcul electric amorsat în vid la separarea pieselor de contact reprezintă plasma de vapori proveniți din metalul contactelor caracterizată printr-o viteză mare de difuzie.

Caracteristicile arcului electric amorsat în vid avansat sunt date în tabelul 1.4. pentru câteva materiale folosite în construcția contactelor electrice alunecătoare [A3].

Grafitul este substanța cu structură lamelară folosită într-o măsură mai însemnată ca lubrifiant solid, respectiv în construcția periilor. Structura sa cristalină ideală constă din planuri paralele ale atomilor de carbon dispuși într-o rețea

hexagonală (figura 1.18.). Prezența dislocațiilor în rețeaua cristalină contribuie la mobilitatea globală între planurile extreme ale unui microcristal. Deci pentru a fi eficace în procesul de frecare stratul de grafit trebuie să aibă microcristalele orientate cu planurile de bază ale atomilor de carbon paralele cu direcția mișcării. Filmul de grafit format pe suprafața de frecare are o structură ordonată și planurile de bază ale atomilor de carbon fac un unghi de $(5\div 10)^\circ$ în raport cu suprafața suport. În această stare coeficientul de frecare are valoarea minimă cuprinsă între 0.15 și 0.18.

Tabelul 1.4.

<i>material</i>	<i>temperatura de evaporare [°C]</i>	<i>conductivitatea termică [W/m K]</i>	<i>tensiunea de arc electric [V]</i>	<i>curentul de arc electric [A]</i>	<i>curentul minim de arc electric [A]</i>
Ag	1950	407	16.5...20	100	12
Cd	767	93	10.8	100	-
Cu	2336	384	19.2...20	100	15
Mo	4800	145	25.5	100	-
Ni	2900	59	18	100	-
W	5900	146	22	100	40

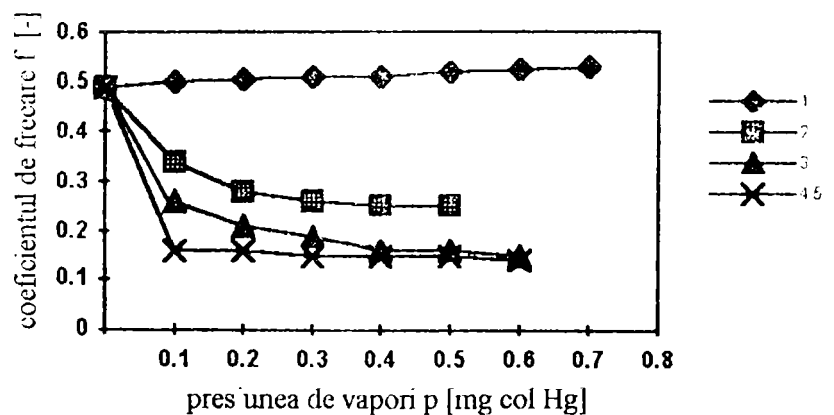
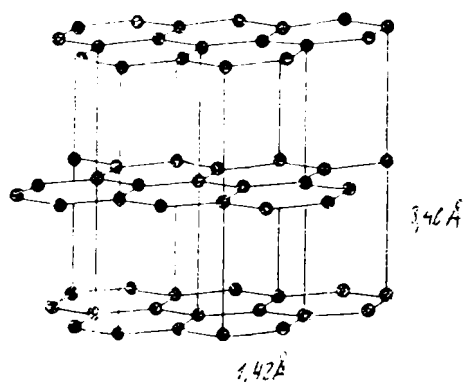


Fig. 1.18. Structura grafitului Fig. 1.19. Influența mediului asupra coeficientului de frecare al grafitului (1-azot, 2-hidrogen, 3-vapori de apă 4-oxigen, 5-heptan)

Coeficientul de frecare depinde de compoziția gazoasă a atmosferei înconjurătoare [12]. Prin degazare în vid la circa 110 °C crește coeficientul de frecare până la aproximativ 0.45. În prezența unor cantități reduse de vapori de apă, oxigen sau hidrocarburi scade din nou coeficientul de frecare la valorile cunoscute pentru aer. Deoarece cantitatea de vapori de apă necesară pentru ca coeficientul de frecare

să atingă valoarea uzuală este foarte mică se consideră că adsorbția are loc numai pe muchiile microcristalelor. Stratul adsorbit reduce frecarea între microcristale, permițând o mai bună orientare a acestora.

Tabelul 1.5.

<i>tipul</i>	<i>rezistivitatea electrică</i> $\rho \cdot 10^{-6}$ [$\Omega \cdot m$]	<i>rezistența la încovoiere</i> [MPa]	<i>duritatea Rockwell HRC</i>	<i>densitatea de curent</i> $j \cdot 10^4$ [A/m ²]
1. carbon dur	40 - 250	18 - 38	30 - 100	6 - 8
2. carbon grafitat	7 - 400	7 - 18	10 - 30	8 - 10
3. carbon grafitat cu liant din rășină sintetică (de exemplu rășină bachelitică)	14 - 600	10 - 40	20 - 90	5 - 12
4. carbon cu grafit electrolitic (carbon nobil)	9 - 70	5 - 28	40 - 80	10 - 12
5. carbon metalic (conținut metalic sinterizat sau impregnat de (20 - 95) %)	0.06 - 12	15 - 140	15 - 95	12 - 30
6. carbon cu Ag grafitat (50-99) % Ag	0.01 - 7	-	40 - 100	20 - 40

Folosirea grafitului sub formă de film solid este limitată de stabilitatea termică relativ redusă și de dependența coeficientului de frecare de atmosfera gazoasă. Cu toate acestea grafitul utilizat direct sau sub formă de suspensie coloidală a permis rezolvarea unor probleme de ungere în condiții de presiune sau temperatură severe.

În tabelele 1.5. și 1.6. se prezintă parametrii de bază ai materialelor specifice folosite la construcția periilor pentru contactele electrice și domeniile de utilizare ale acestora, conform [3], [13], [15].

Tabelul 1.6.

tipul	viteza v [m/s]	tensiunea de trecere U [V]	coeficientul de frecare f [-]	domeniul de utilizare
1. carbon dur	25 - 45	1 - 3.5	< 0.26	motoare universale, aparatură electrocasnică mașini electrice de până la 30 kW (500 V)
2. carbon grafitat	20 - 60	1 - 2.5	0.15 - 0.2	motoare de turații mari, turbogeneratoare, motoare mici
3. carbon grafitat cu liant sintetic	35 - 45	> 1.8	0.15 - 0.2	generatoare mici și mijocii ($P < 30$ kW), motoare de comutație, motoare universale
4. carbon cu grafit electrolitic	40 - 60	> 1	0.15 - 0.26	motoare de cc și alternativ, mașini de comutație, tramvaie, trenuri, generatoare de comandă, traductoare cu inele colectoare
5. carbon metalic	20 - 45	< 1.8	> 0.26	perii de pământare, motoare de cc, alternatoare ale autovehiculelor, motoare asincrone
6. carbon cu Ag grafitat	10 - 30	< 1.8	< 0.15 > 0.26	contacte ale traductoarelor și instalațiilor de măsurare, tahogeneratoare, motoare mici de tensiuni foarte joase

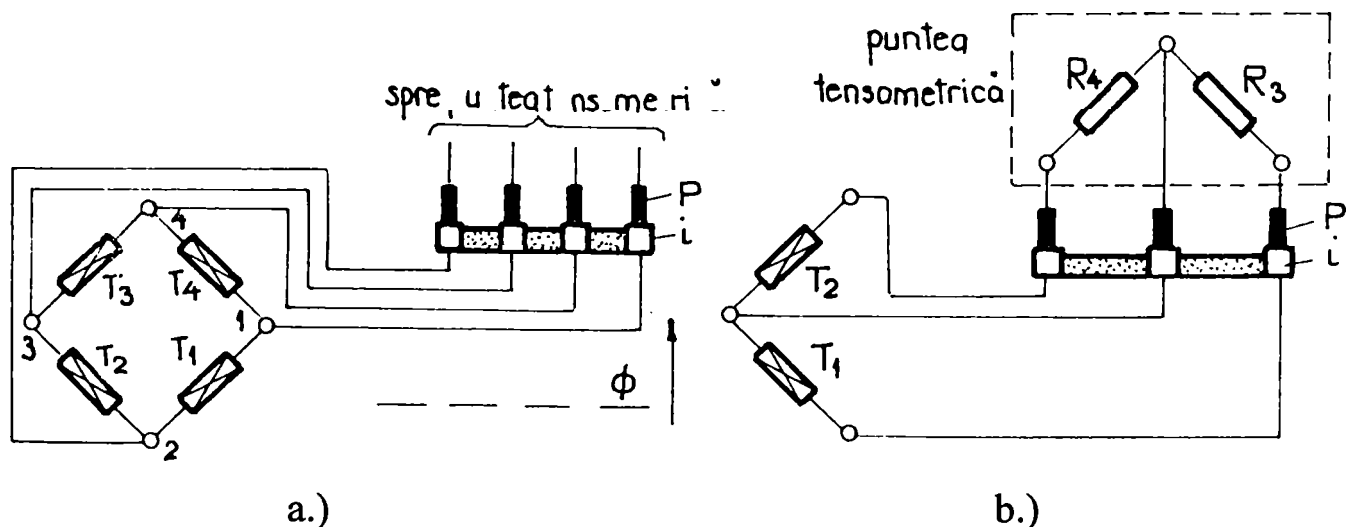
Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

1.3. Soluții constructive din domeniul curenților slabi și tari.

Cercetările în regim dinamic al mașinilor sau elementelor componente precum și exploatarea acestora implică existența unor echipamente și tehnici de măsurare specializate. Cu toate dificultățile impuse îndeosebi de factorii perturbatori contactele electrice alunecătoare s-au dezvoltat și se utilizează pe scară largă, atât în domeniul extragerii informației, al măsurărilor și automatizărilor cât și în transmiterea energiei electrice în curent continuu și în curent alternativ. Principalele avantaje constau în simplitatea constructivă, prețul de cost relativ scăzut, fiabilitatea ridicată și exploatarea facilă.

În continuare se prezintă câteva exemple de utilizare a contactelor electrice alunecătoare folosite în cazul măsurărilor electrice pentru prelevarea și transmiterea informației și în domeniul sistemelor automate. Cele mai multe aplicații ale acestor categorii se întâlnesc în ultimul timp în special în domeniile Roboticii, Electronicii și Telecomunicațiilor. Pentru reducerea perturbațiilor în timpul măsurărilor rezistența de izolație dintre inele trebuie menținută la o valoare cât mai ridicată. Folosirea unor sisteme de ventilație axială sau a magneților permanenți contribuie la îndepărtarea produselor de uzură ce se depun pe inelele izolante dintre inelele de contact. Periodic pachetul de inele se șterge cu material textil moale (de exemplu cu fetru) care reține suspensiile datorate uzurii mai ales la începutul perioadei de rodaj.

În cazul măsurărilor tensometrice (figura 1.20. a.,b.) se preferă conectarea în punte completă și extragerea semnalului prin patru inele colectoare (figura 1.20. a.) celei în semipunte, conectată la numai trei inele la care puntea se completează în exterior la echipamentul electronic (figura 1.20. b.) [G1].

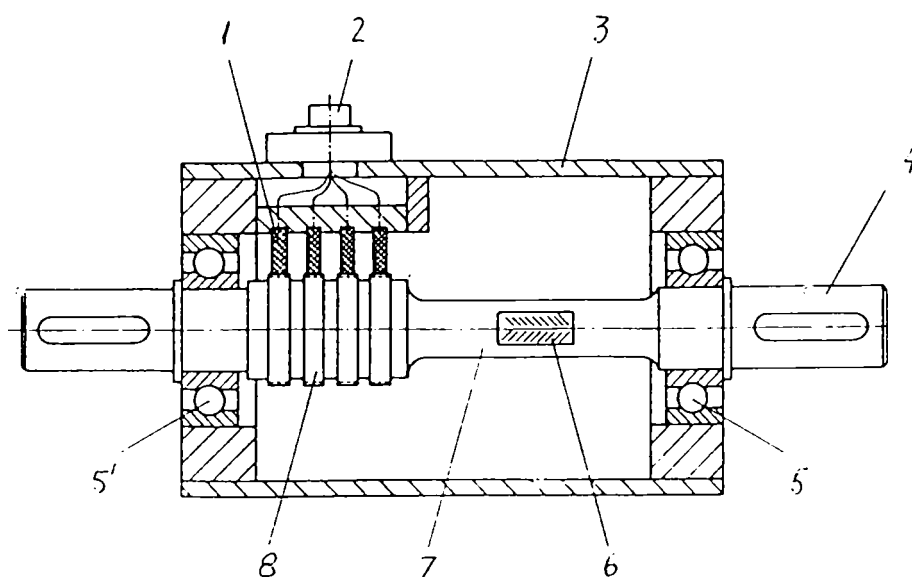


a.) b.)
Fig. 1.20. Măsurarea tensometrică prin contacte alunecătoare
(a.- schema de măsurare în punte completă, b.- schema de măsurare în semipunte ($T_1 \div T_4$ - timbre tensometrice, R_3, R_4 - rezistențe reglabile pentru completarea punții, i- inel de contact, p- perie)).

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

În cazul folosirii unor contacte alunecătoare de bună calitate erorile de măsurare se mențin sub nivelul de 0.2 %. În cazul inelelor de contact în pachete realizate la nivel profesional (de obicei 12 contacte alunecătoare) spațiul preferat pentru montaj este capătul de arbore. În acest caz diametrele inelelor de contact pot fi reduse și implicit și viteza periferică a acestora. Valorile uzuale ale inelelor de contact depind de particularitățile de montaj. Valorile diametrelor se încadrează în toate cazurile între $[14 \div 250]$ mm.

În figura 1.21. se prezintă o soluție constructivă a firmei germane Staiger Mohilo [8] a unui traductor de moment de torsiune (cuplă torsionometrică) care are în componență o punte completă de timbre tensometrice. Atât alimentarea cât și prelevarea semnalului se fac prin intermediul a câte două perechi de perii și inele alunecătoare amovibile.



Momentele de torsiune nominale ajung până la valori de 1000 N·m la turații de 5000 min⁻¹ iar eroarea de liniaritate nu depășește 0,25%.

Fig.1.21. Cuplă torsionometrică (1-perii, 2-legături conectare, 3-carcasă, 4-arbore, 5,5' - lagăre, 6-timbre tensometrice, 7-tronson torsiionat arbore, 8-inele alunecătoare).

Un alt caz îl reprezintă sistemul de alimentare al cuplajelor electromagnetice [1]. În figura 1.22. se prezintă soluția unui cuplaj electromagnetic la care alimentarea se face prin intermediul contactului inel - perie (telescopică sau articulată), aplicându-se tensiunea necesară alimentării bobinei în timpul mișcării de rotație a corpului cuplajului.

Prin atașarea inelelor colectoare la cuplajele elastice sau de siguranță se poate sesiza momentul apariției suprasarcinii și se poate comanda oprirea rapidă a motorului de antrenare sau declanșarea cuplajului electromagnetic dacă acesta se află în lanțul cinematic.

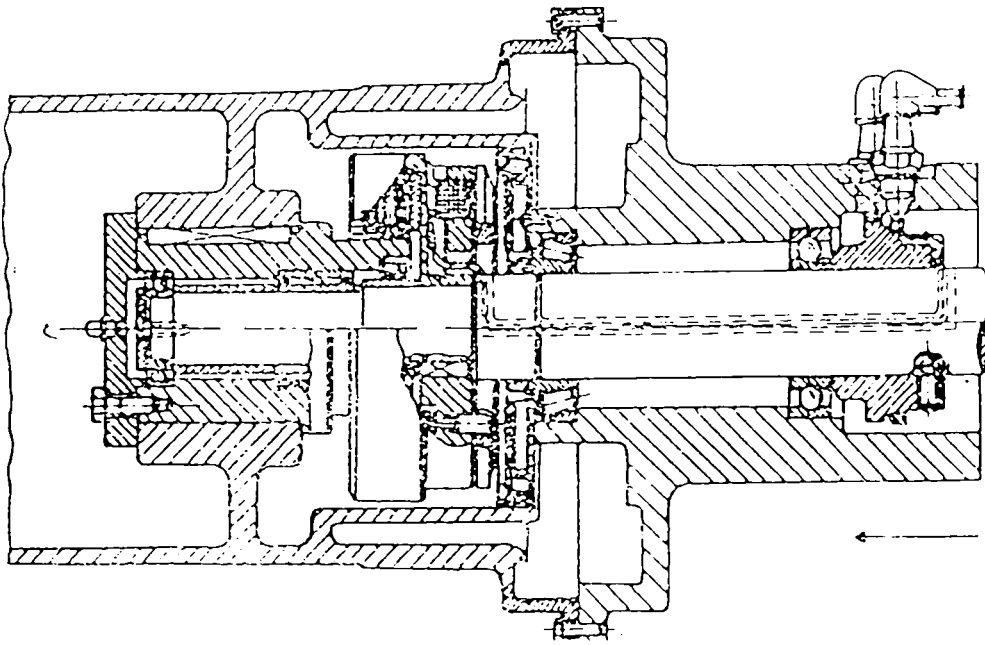
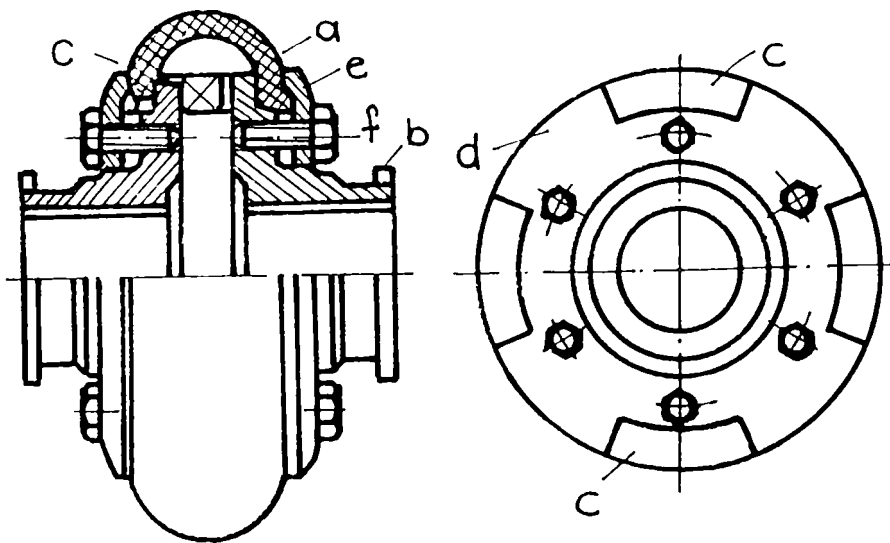


Fig.1.22. Alimentarea unui cuplaj electromagnetic prin perii și inele colectoare.

În figura 1.23. se prezintă soluția constructivă a unui cuplaj elastic cu manșon tip Periflex [G3].



Se realizează astfel pe de-o parte protecția manșonului iar pe de altă parte se comandă oprirea instalației prin cele două inele colectoare și perii.

Fig. 1.23. Cuplaj elastic cu limitare prin craboți (a.-manșon de cauciuc, b.-inel colector, c.-crabot, d.-semicuplaj, e.-inel de fixare, f.-șurub).

În cazul cuplajelor limitative de sarcină cu lamele (discuri) soluția constructivă de sesizare a suprasarcinii este exemplificată în figura 1.24. iar schema electrică este redată în figura 1.25. [G3].

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

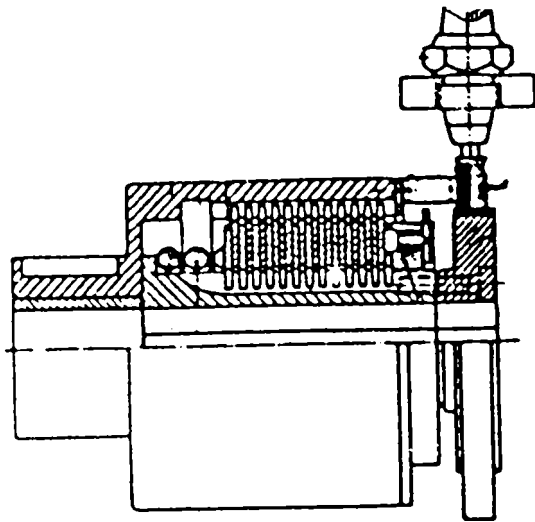


Fig. 1.24. Cuplaj de siguranță cu discuri (lamele) cu senzor electric de suprasarcină.

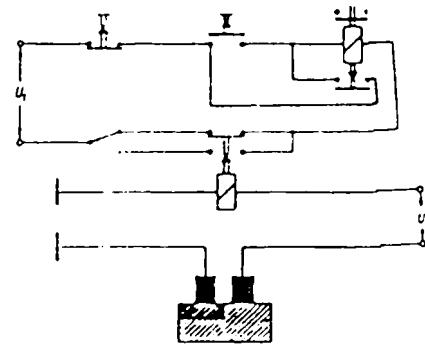
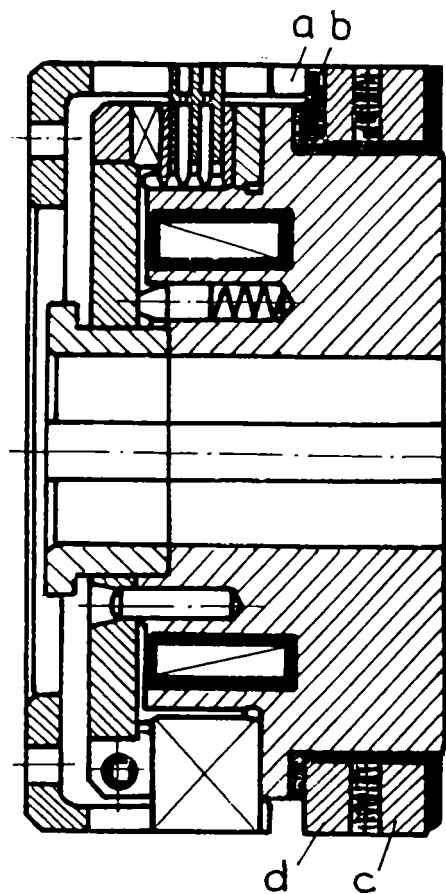


Fig. 1.25. Schema electrică de protecție a lanțurilor cinematice cu cuplaje de siguranță prevăzute cu contacte alunecătoare



Extinderea soluției de comandă în caz de suprasarcină la un cuplaj electromagnetic cu fricțiune este exemplificată în figura 1.26., unde inelul colector are rolul de a sesiza alunecarea dintre discuri în timpul funcționării la apariția unei suprasarcini accidentale. Prin inelul colector devine posibilă întreruperea funcționării sistemului de antrenare sau a alimentării bobinei de excitație a cuplajului.

Fig.1.26. Cuplaj electromagnetic cu fricțiune cu senzor electric de suprasarcină (a.- lamelă elastică de contact, perie secundară, b.- disc izolat, c.- inel de contact pentru alimentarea cuplajului, d.- inel de contact pentru circuitul de protecție).

În figura 1.27. se prezintă un sistem pentru transmiterea semnalelor video și de tensiuni înalte (mA-6A; mV -8000 V) cu inele colectoare din Au amplasate axial cu 39 de poli iar în figura 1.28. este exemplificat un sistem închis cu inele colectoare cu 16 poli folosit la transmiterea semnalelor electrice în cazul motoarelor pas cu pas, a traductoarelor de deplasare, de forță sau termice la roboții industriali [9].

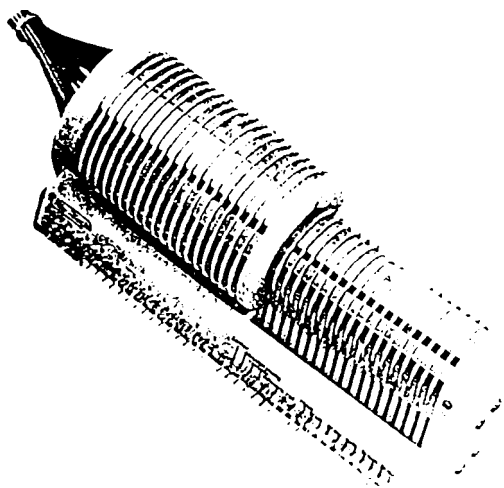


Fig.1.27. Traductor pentru semnale video.

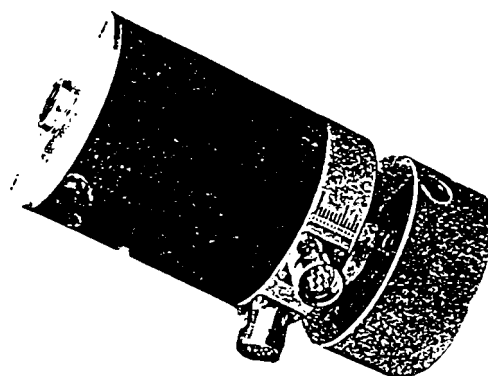


Fig.1.28. Traductor din domeniul roboticii.

Sistemul de transmitere a informației cu inele colectoare (Au pe Au) cu 15 poli folosit pentru transferul semnalelor grafice și a celor din domeniul computerelor (comandă de proces), respectiv a graficii de rezoluție înaltă de până la 70 MHz și tensiuni de alimentare de ordinul [$1\mu\text{A}$ - 6A] este redat în figura 1.29. iar în figura 1.30. este prezentat un exemplu de sistem cu inele colectoare în construcție capsulată cu 40 poli folosit pentru transmiterea energiei electromagnetice la antenă și a semnalelor de comandă [9].

În figura 1.31. se prezintă soluția constructivă a unui contact electric alunecător cu 2-44 poli folosit la transmiterea curenților mici (mA - 3A; mV - 120V) în domeniul semnalelor video, care folosește contacte acoperite cu Au (cu o duritate de 400 Vickers) și care funcționează la turații de până la 1500 min^{-1} [10]. O soluție constructivă de contact electric alunecător cu inele din Ag și perii din grafit argintat folosit la transferul semnalelor termoelementelor sau semnalelor tensometrice provenite de la traductoarele lipite pe arbori rotativi se prezintă în figura 1.32. [11].

Un alt exemplu de contact electric alunecător miniatural folosit în construcția aparaturii medicale de mare precizie este cel prezentat în figura 1.33.. Inelul alunecător este realizat dintr-un aliaj de Au (90% Au, 10% Cu) [12].

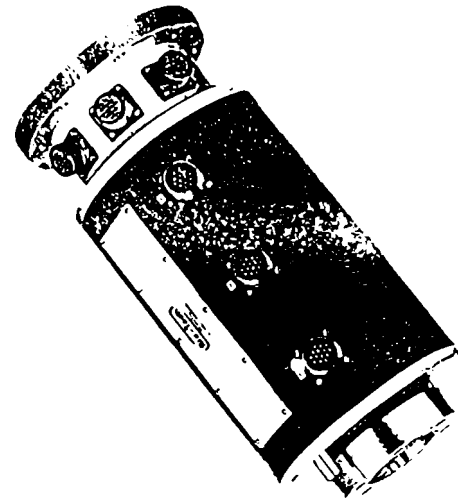
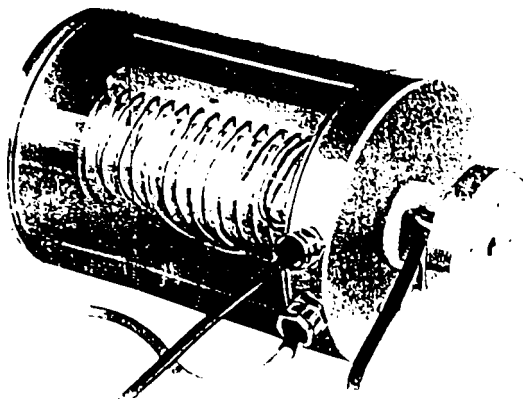


Fig.1.29.Sistem de transfer al semnalelor grafice

Fig. 1.30. Transferul mărimilor comandă de putere

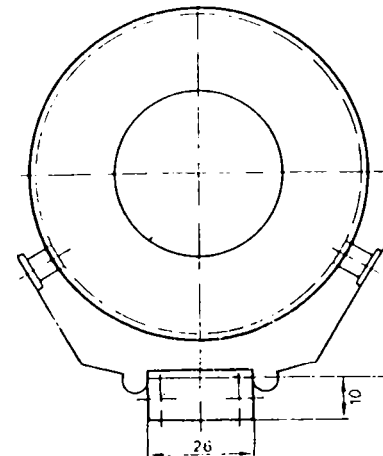
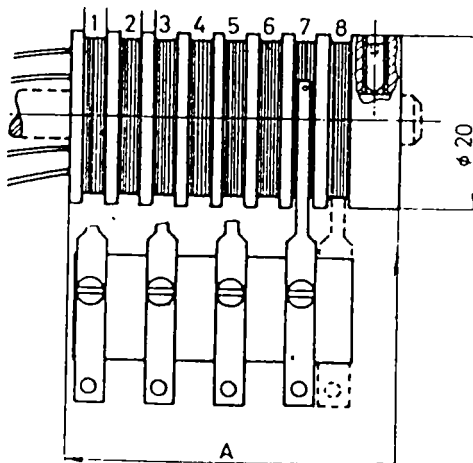
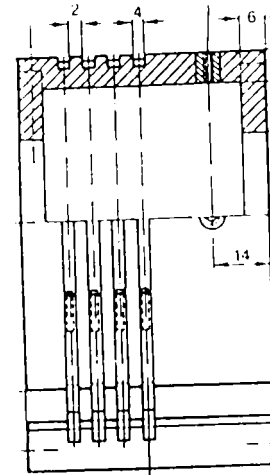
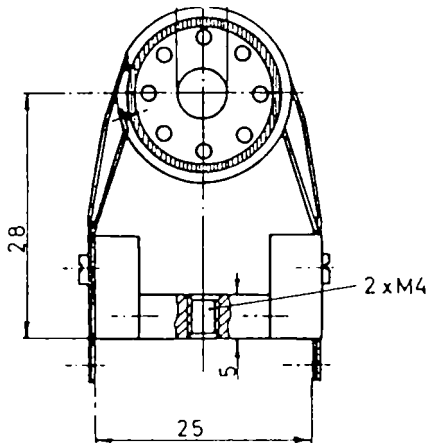


Fig.1.31. Contact electric alunecător.

Fig.1.32. Contact alunecător cu inele din Ag.

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

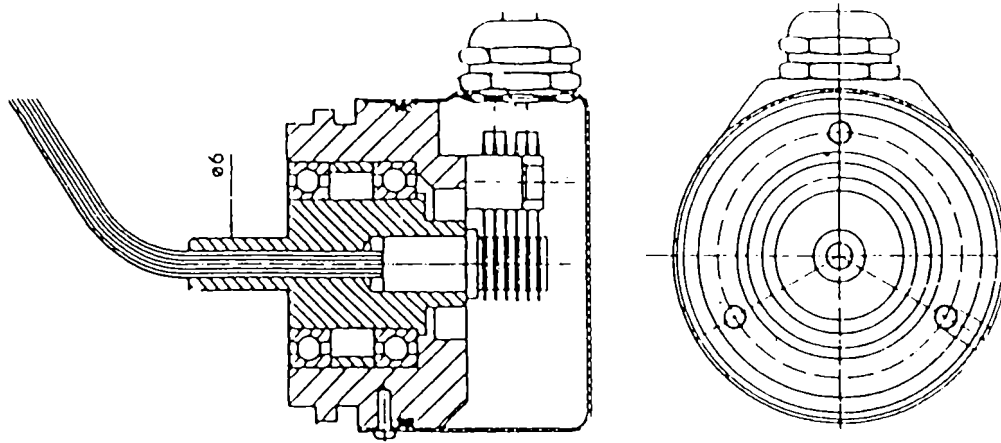
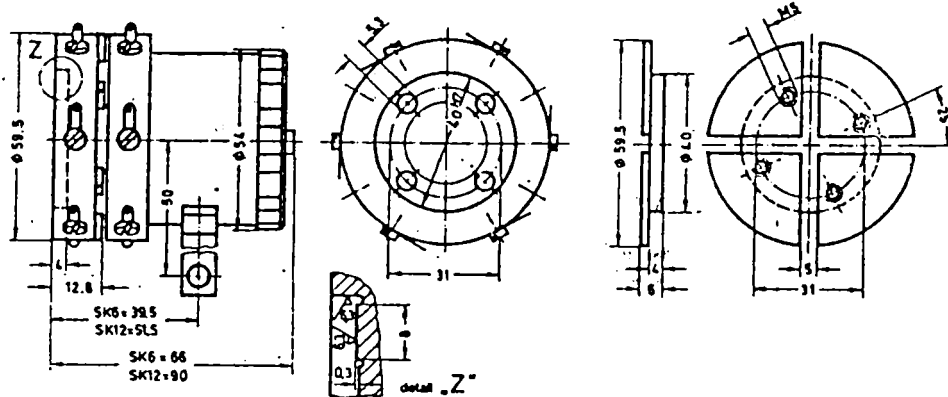
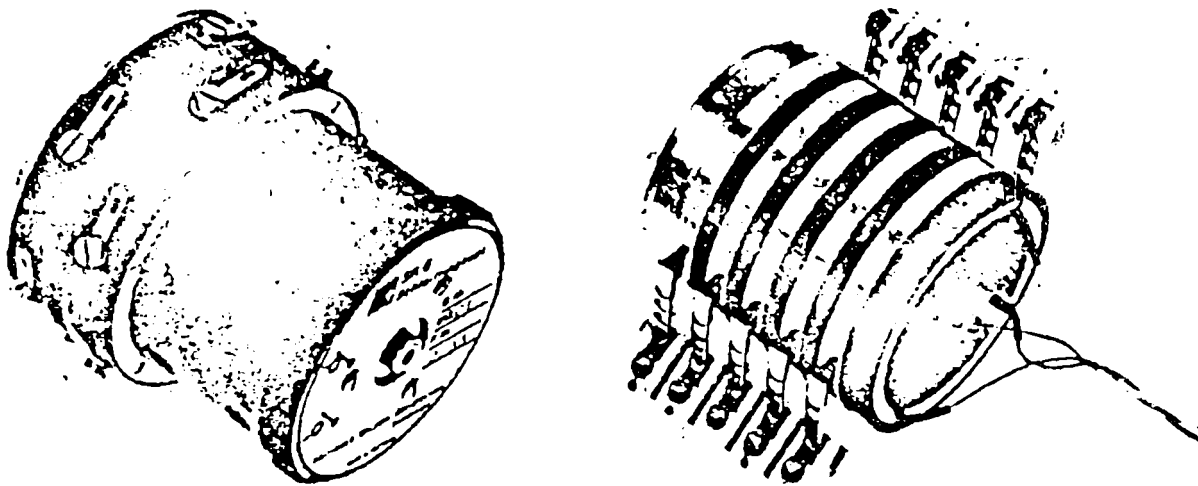
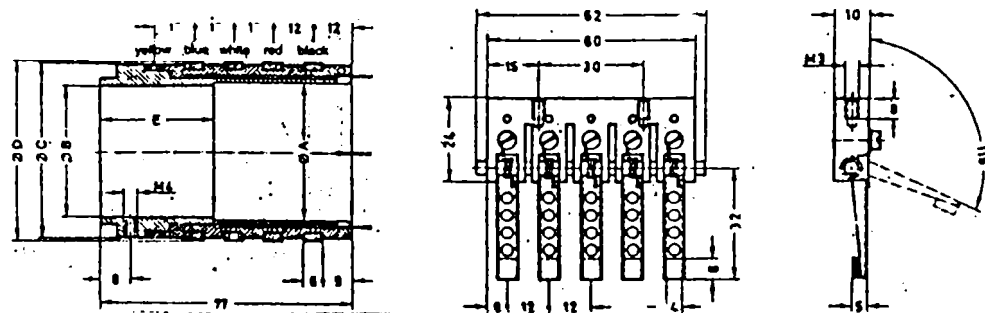


Fig.1.33. Contact electric alunecător miniatural.



Slipring Body SK 5



1.34. Vedere de ansamblu și detalii pentru traductorul cu cinci contacte alunecătoare [G4].

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Contactele alunecătoare care se montează pe capete de arbori au un caracter de sisteme universale de prelevare a informației, în sensul că se pot cupla la traductoare tensometrice inductive simple și diferențiale, la termocuple, termorezistențe și la alte tipuri de traductoare. Condițiile ce trebuiesc îndeplinite de acestea sunt deosebite în raport cu tensiunea termoelectrică, aceasta nefiind mai mare de 10V, rezistența contactului alunecător nefiind mai mică de 40 mΩ iar fluctuația acestei rezistențe fiind menținută la valori sub 2 mΩ. Cele mai răspândite variante sunt realizate cu 5, 6 sau 12 inele colectoare (figura 1.34.). Condițiile severe privitoare la rezistența de contact se pot asigura pentru inelele de contact din Ni-Ag și periile din grafit argintat numai în cazul bățiilor radiale mai mici de 5 μm.

În figura 1.35. se prezintă o schemă pentru montajul de măsurare cu traductoare tensometrice prin intermediul contactelor alunecătoare. Sistemele cu contacte alunecătoare pot funcționa continuu până la viteze unghiulare de 600 s⁻¹ la tensiuni între contacte de maximum 60V și curenți admisibili de 2A. Blocuri performante cu contacte alunecătoare de măsură sunt oferite de firma germană "Hottinger Baldwin Meßtechnik" [18].

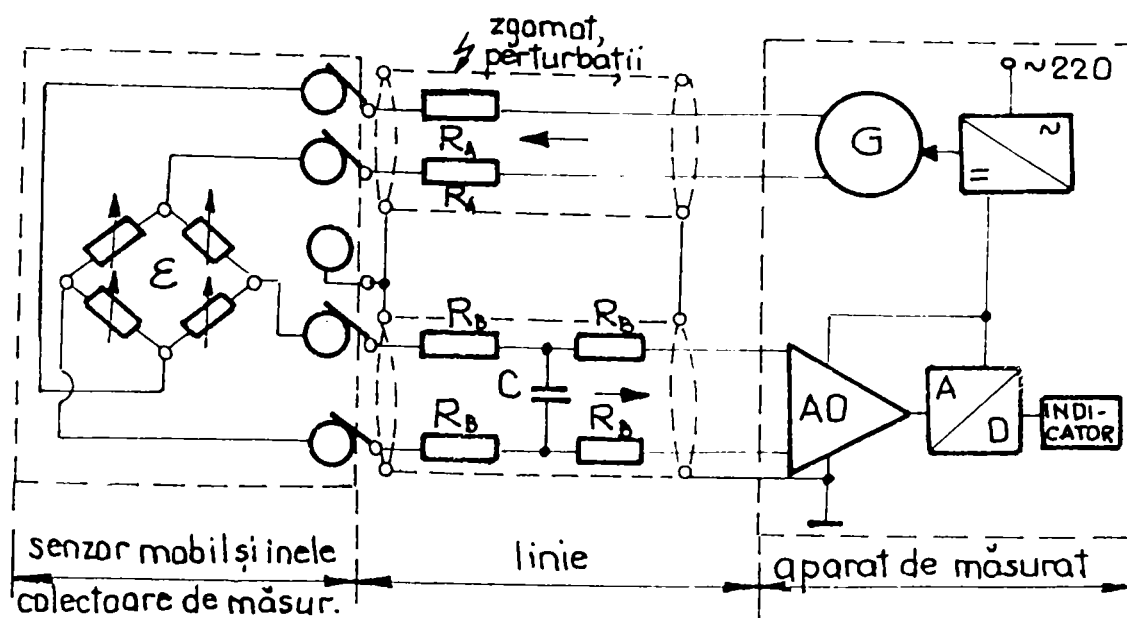


Fig. 1.35. Schema de măsurare tensometrică prin intermediul a cinci inele colectoare.

Controlul permanent al mișcării de rotație joacă un rol important în cazul mecanismelor aparatelor de mecanică fină, respectiv al aparatelor de înregistrare-redare ce utilizează ca suporturi ale informației discuri sau benzi magnetice. Controlul mișcării de rotație permite sesizarea și comanda opririi sistemelor de acționare în cazul apariției unor blocaje (frecare suplimentară) în cadrul transmisiei mecanice, care pot suprasolicita suportul de informație și mecanismele din sistem,

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

putând duce până la deteriorarea sau chiar ruperea benzii magnetice. Cercetările au dus la concluzia necesității construirii și integrării în sistem a unor elemente de tip senzorial care să poată comanda automat sistemele de acționare. Una din metodele utilizate se bazează pe integrarea contactelor electrice alunecătoare în aceste sisteme. Modificarea stării contactelor dintre perie-colector în cazul rotirii discului generează impulsuri de curent continuu (figura 1.36.) [G5].

Trenul de impulsuri s-a aplicat unui element integrator la ieșirea căruia a rezultat o tensiune de comandă diferită de zero în cazul rotirii discului debitor sau colector de bandă.

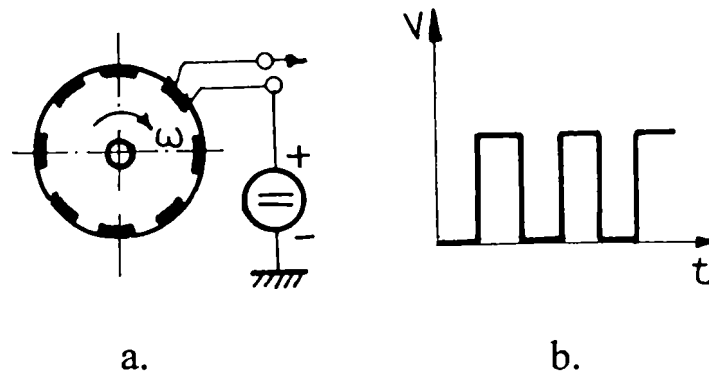


Fig. 1.36. Traductor de mișcare cu contacte electrice alunecătoare.

În cazul motoarelor de tracțiune de curent continuu și alternativ se folosesc contactele electrice alunecătoare (figura 1.37.) care permit transferul curenților de ordinul mA ÷ 90 A (500V_~ ; 660V₌) cu 1÷24 inele colectoare ce funcționează la turații de până la 200 min⁻¹ [1].

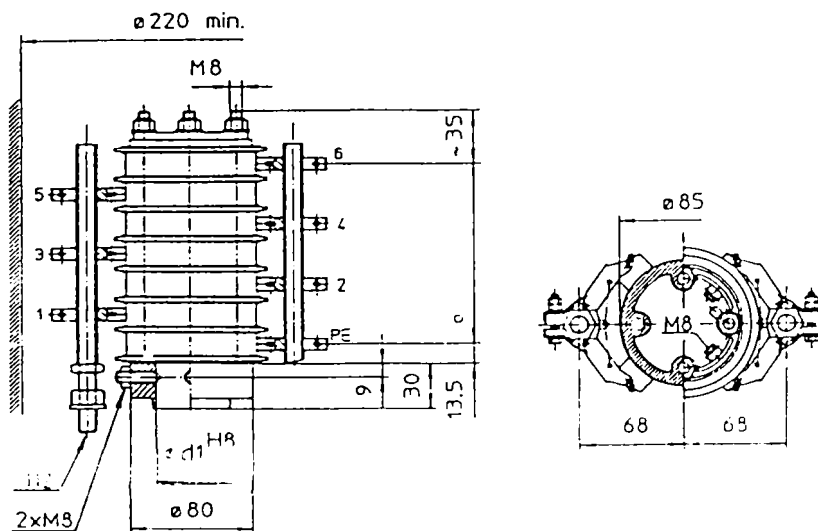


Fig.1.37. Contact electric folosit în construcția motoarelor de tracțiune.

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

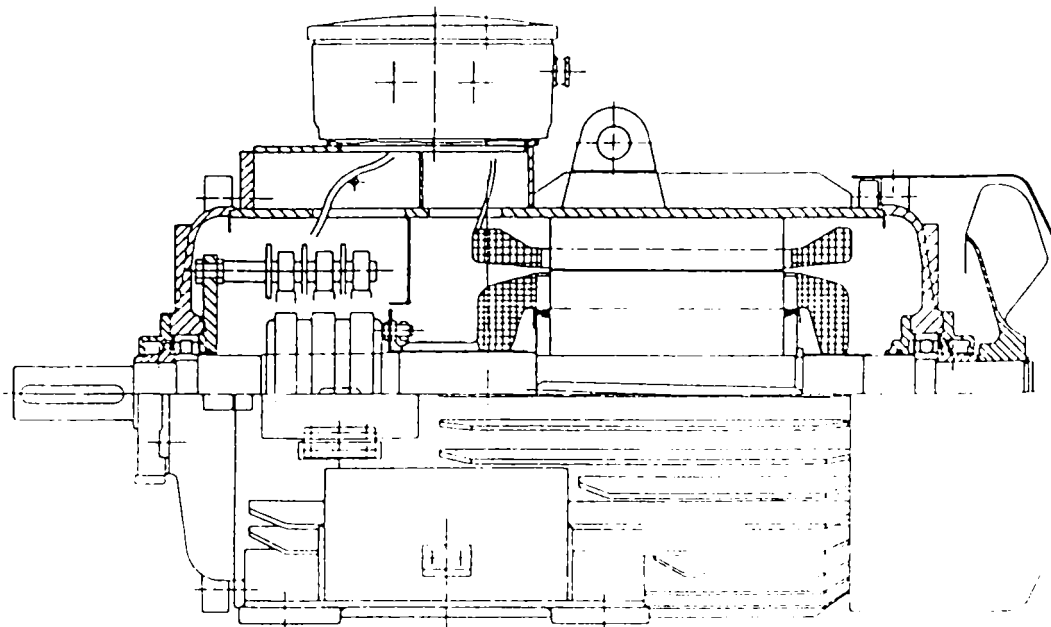
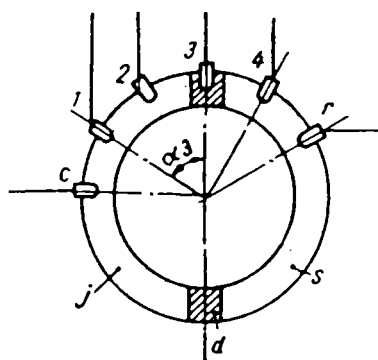


Fig.1.38. Motor electric cu perii și inele colectoare.

Un alt exemplu de sistem perii-inele colectoare este cel din figura 1.38., întâlnit în cazul motoarelor electrice ce echipază utilajele de ridicat și de transportat [2].



Sistemele de comandă ale ascensoarelor electrice [S2] au în componență un selector care întrerupe contactul stației și care așează toate contactele de deasupra stației în poziția pentru comenzi "sus" iar pe cele de sub cabină pentru comenzi "jos". Poziția unui contact reprezintă o memorie mecanică.

Fig. 1.39. Selector cu contacte alunecătoare [S2].

În figura 1.39. se prezintă un selector cu contacte alunecătoare pentru patru stații. Contactele alunecătoare 1-4 corespundătoare parterului și celor trei etaje de oprire și contactele c și r sunt așezate pe semiinelele din cupru j și s despărțite între ele prin plăcuțele izolante d. Semiinelele sunt rotite de la troliul ascensorului sau pot primi mișcarea chiar de la cabină. Unghiul lor α este proporțional cu poziția cabinei. În figura 1.39. $\alpha = \alpha_3$, deci cabina se află în stația 3.

Acceptarea unei anumite soluții pentru prelevarea și transmiterea informației de la un element aflat în mișcare de rotație depinde de o serie de criterii, cum ar fi: caracterul și particularitățile constructive ale sistemului, durata de investigare, fiabilitatea impusă și prețul de cost.

Caracterul de maximă universalitate este oferit de contactele alunecătoare al căror preț de cost este minim în raport cu soluțiile la care informația este prelevată și transmisă fără contact mecanic între părțile aflate în mișcare relativă.

În concluzie se poate afirma că există domenii foarte răspândite de utilizare a contactelor electrice mobile, subliniindu-se utilitatea cercetării în profunzime a problematicii legate de optimizarea construcției, folosirii și întreținerii acestora.

Capitolul 2 Bazele teoretice ale contactelor electromecanice mobile

2.1. Bazele teoretice ale contactelor mobile din punct de vedere electric

Problemele rămase deschise cercetării în domeniul contactelor electrice alunecătoare sunt în special cele legate de calitatea contactului electric și aspectele tribologice specifice ale acestora.

Oricât de fin ar fi prelucrate suprafețele active înel-erie contactul electric se creează doar în câteva zone de contact numite puncte de contact, care se modifică numeric în timpul mișcării relative și în care liniile de curent suferă o concentrare, o stricțiune. Aceasta reprezintă principala cauză de variație a rezistenței de contact.

Rezistența electrică a unui conductor este:

$$R = \int \frac{\rho \cdot dl}{A(l)} \quad (2.1.)$$

Dacă rezistivitatea ρ este constantă și dacă secțiunea A este independentă de lungime, atunci:

$$R = \rho \cdot l / A \quad (2.2.)$$

Pentru $\delta A / \delta l \neq 0$ se stabilește conform [H6] așa numitul factor de formă f_1 :

$$f_1 = \int \frac{dl}{A(l)} \quad (2.3.)$$

iar

$$R = \rho \cdot f_1 \quad (2.4.)$$

Un element de contact este un conductor electric având o formă geometrică bine determinată și reprezentând o anumită cantitate de curent.

Factorul de formă poate fi determinat prin calcul în cazul diverselor modele matematice. Tabelul 2.1. oferă relațiile de calcul ale factorilor de formă în cazul modelelor de contact (r - raza reală de contact, r_0 - raza cilindrului conductor, l_0 - lungimea).

Tabelul 2.1.

<i>modelul:</i>	<i>factorul de formă f_1:</i>
1. modelul sferei de conductivitate ∞	$1 / (\pi \cdot r)$
2. modelul elipsoidului turtit	$1 / (2 \cdot r)$
3. modelul conului	$2 \cdot l_0 / (\pi \cdot r \cdot r_0)$

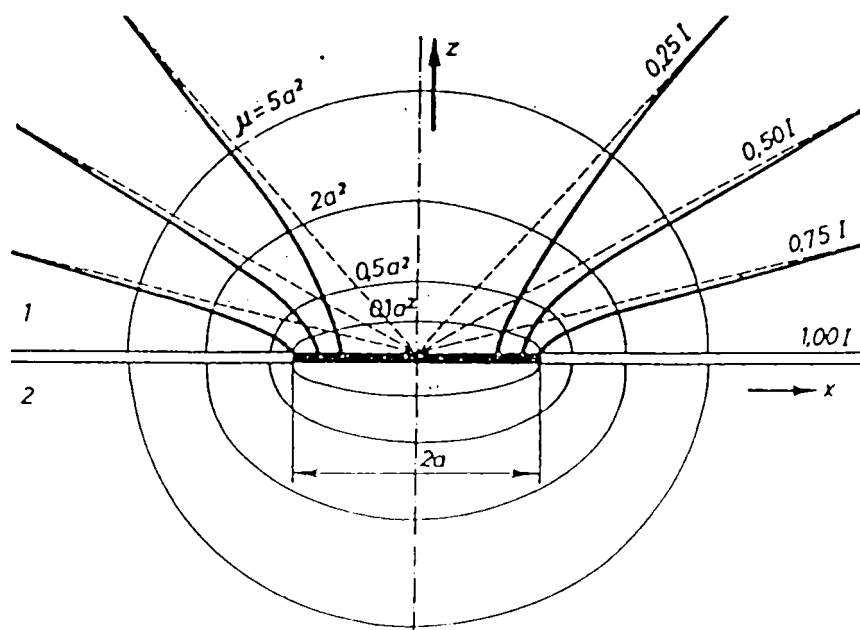
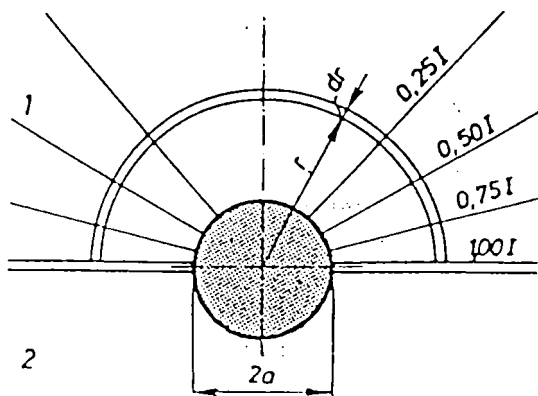


Fig.2.1. Modelul sferei de conductivitate ∞ .

Fig.2.2. Modelul elipsoidului turtit.

Rezistența de stricțiune a contactului liniar perie-inel se calculează conform [H5], considerându-se contactul realizat dintr-o piesă plană 1 (peria) și o piesă segment de cilindru 2 (inelul) în atingere sub acțiunea forței de apăsare F, ca în figura 2.3. a.).

Modelul matematic al contactului liniar constă dintr-o bandă de conductivitate infinită și grosime cu aria $2a \times l$ care stabilește conducția electrică între piesele 1 și 2. Aria benzii de lățime $2a$ și lungime l se obține prin relația 2.5..

μ reprezintă un parametru care definește elipsoidul confocal ($\mu = 0.1 a^2, 0.5 a^2, 2 a^2, 5 a^2$ etc.), conform figurii 2.2..

Rezistența de stricțiune este pusă în evidență de Kraghelski [K1] cu ajutorul unui dispozitiv a cărui schemă electrică este prezentată în figura 2.4. cu 1, 2 - elementele cuplei de frecare, A - ampermetru.

$$2 \cdot a \cdot l = F / HB \quad (2.5.)$$

unde l reprezintă duritatea materialului.

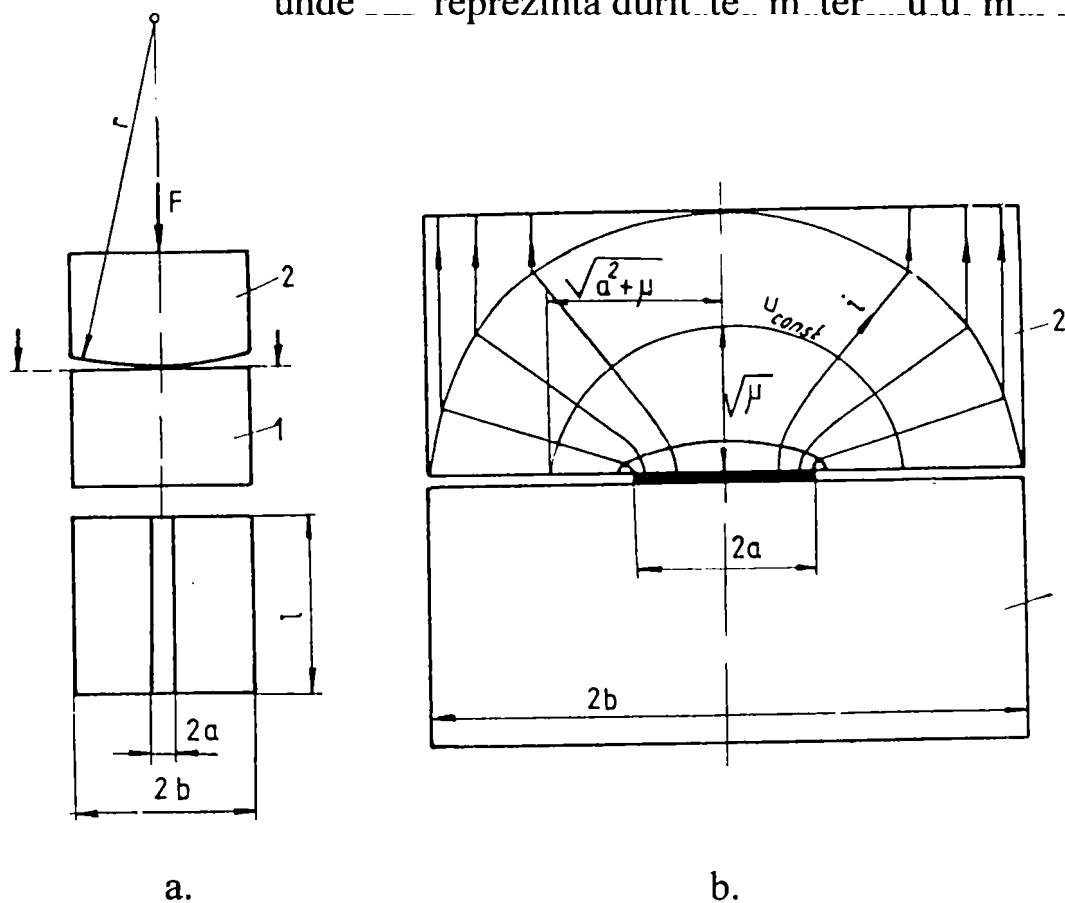


Fig. 2.3. Contactul liniar (a.- suprafața de contact, b.- modelul de calcul).

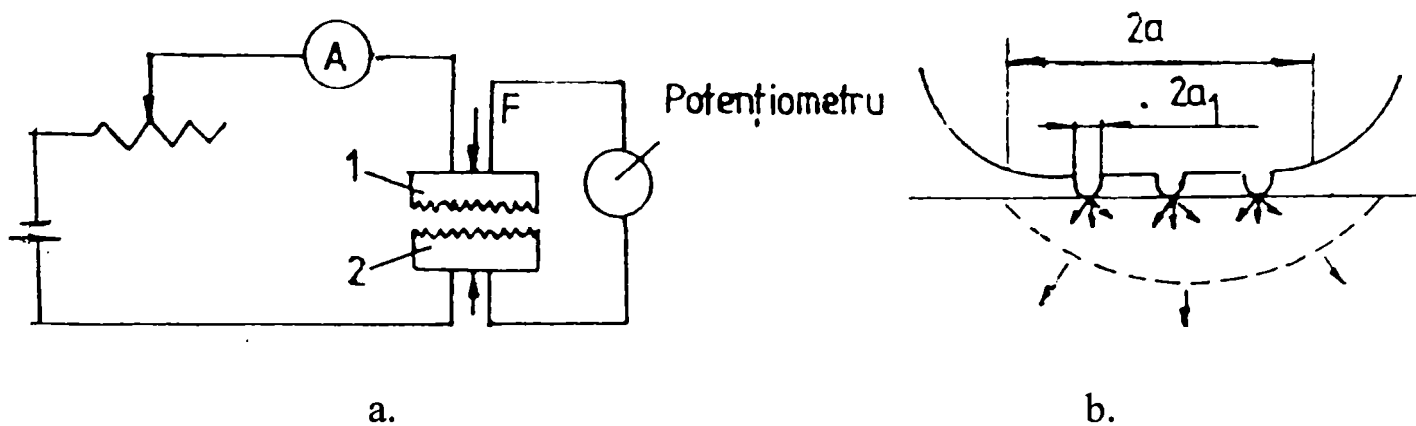


Fig. 2.4. Determinarea rezistenței de stricțiune (a.- instalația, b.- schema contactului).

Raza r a cilindrului de contact fiind relativ mare ($r \in [50-60]$ mm) nu joacă un rol semnificativ în stabilirea rezistenței de contact. În figura 2.3.b. se prezintă o secțiune transversală în modelul de calcul al contactului liniar. Suprafețele

echipotențiale sunt elipse confocale. Elipsa de bază este dreapta de lungime $2a$. Liniile de curent sunt hiperbole ortogonale la elipse.

Pentru calculul rezistenței de stricțiune se folosește analogia care există între relațiile care descriu câmpul electric într-un dielectric și câmpul electric obținut prin trecerea curentului continuu printr-un mediu conductor. Capacitatea electrică C_s între banda de lățime $2a$ și un semicilindru elipsoidal este:

$$C_s = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln\left[\left(\sqrt{a^2 + \mu} + \sqrt{\mu}\right) / a\right]} \quad (2.6.)$$

unde ε reprezintă permitivitatea.

Corespunzător rezultă rezistența de stricțiune a contactului liniar R_s :

$$R_s = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot l} \ln \frac{\sqrt{a^2 + \mu} + \sqrt{\mu}}{a} \quad (2.7.)$$

unde ρ este rezistivitatea.

Rezistența totală a contactului se obține dacă se însumează rezistența peliculei disturbatoare cu rezistența de stricțiune a contactului liniar (relația 2.7.):

$$R = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot l} \ln \frac{\sqrt{a^2 + \mu} + \sqrt{\mu}}{a} + \frac{R_{ss}}{2 \cdot a \cdot l} \quad (2.8.)$$

Rezistența de stricțiune a contactului inel-perie poate fi calculată și conform [G6] prin admiterea următoarelor ipoteze:

- ◆ numărul punctelor de contact este cunoscut,
- ◆ se admite că fiecare punct de contact este de formă circulară,
- ◆ punctele de contact sunt repartizate în mod uniform pe întreaga arie aparentă de contact A_a .

Dependența dintre forța de apăsare F și aria de contact A este dată de relația lui Holm:

$$A = F / (\xi \cdot HB) = n \cdot \pi \cdot a^2 \quad (2.9.)$$

unde: ξ - coeficientul Prandtl (pentru inele= (0.4÷0.5), pentru contacte pe suprafețe mari=1),

HB- duritatea materialului (de exemplu la Ag de 500 MPa, la Cu de 550 MPa),

n- numărul zonelor de contact,

a- raza cercului echivalent pentru cele "n" zone de contact.

Rezistența electrică cuprinsă între două plane la distanța

$$\Delta = 2 \cdot \sqrt{d^2 - a^2} \quad (2.10.)$$

tangente la elipsoizi este:

$$R = \left\{ \left(2 \cdot \left(\frac{\rho}{2\pi \cdot a \cdot n} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{d^2 - a^2}}{a} - 0.6 \cdot \frac{\rho \sqrt{d^2 - a^2}}{A_a} \right) + \frac{R_{ss}}{\pi \cdot n \cdot a^2} \right) \right\} \cdot \chi \quad (2.11.)$$

unde

ρ - rezistivitatea electrică [Ωm],

R_{ss} - rezistența superficială specifică [Ωm^2] (figura 2.5.),

χ - funcție complexă care depinde de presiunea medie, viteză, micro- și macrogeometria perechii perie-inel [-],

A_a - aria aparentă de contact [m^2].

În relația 2.11. ultimul termen din paranteză reprezintă rezistența electrică a peliculei disturbatoare pentru contactul de suprafață. Aria aparentă A_a cuprinde un număr mediu de “n” puncte de contact, fiecare din acestea ocupând o arie egală cu ($4 \cdot d^2$).

Relația de calcul a rezistenței electrice este aproximativă dar contribuie la formarea unui concept despre contactele alunecătoare plane prin care se necesită cunoașterea numărului punctelor de contact “n” și a funcției complexe χ . Din nefericire singura cale care să conducă la elemente utile proiectării contactului electric este calea experimentală.

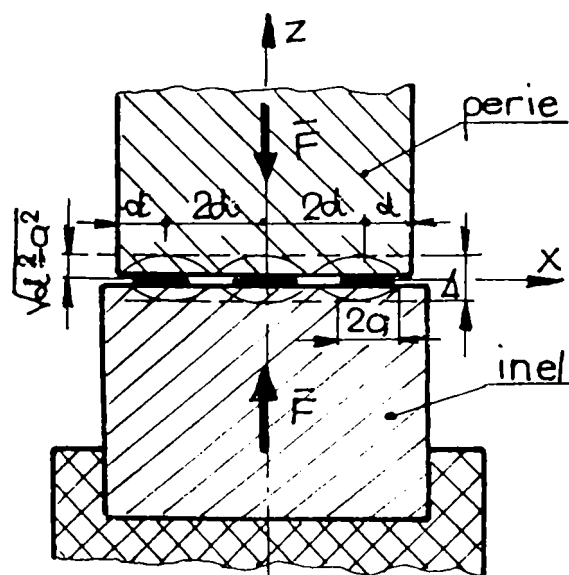


Fig.2.5. Modelul contactului de suprafață perie-inel colector [G6].

Deși contactul plan se realizează atât în repaus cât și în mișcare relativă prin deformarea elastoplastică a microgeometriei elementelor conjugate, numărul

punctelor de contact rămâne relativ redus, în general mai mic de 50 iar aria efectivă este sensibil mai mică decât cea aparentă. În aceste condiții se poate considera (conform figurii 2.5.) că $d \gg a$. Rezistența de contact va fi în acest caz:

$$R = [\rho / (2 \cdot a \cdot n) + R_{ss} / (\pi \cdot n \cdot a^2)] \chi \quad (2.12.)$$

sau înlocuind raza cercului de contact "a" din relația 2.9.:

$$R = \left(\frac{\rho}{2} \cdot F^{-\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \xi \cdot HB}{n}} + R_{ss} \cdot \xi \cdot HB \cdot F^{-1} \right) \cdot \chi \quad (2.13.)$$

Relația evidențiază necesitatea cunoașterii numărului punctelor de contact, a forței de apăsare și a durtății materialului pentru determinarea rezistenței de contact.

Cercetările experimentale cunoscute în literatura de specialitate efectuate de Johannet [J2] au dus la determinarea numărului punctelor de contact în funcție de forță și duritate pentru materialele contactelor electrice:

$$n (HB, F) \in [0.5 \div 2.5] \cdot 10^{-5} \cdot HB^{0.625} \cdot F^{0.2} \quad (2.14.)$$

Astfel se obține valoarea rezistenței corespunzătoare numărului maxim al punctelor de contact:

$$R = \left(\frac{10^3 \cdot \rho}{5} \cdot HB^{0.1875} \cdot \sqrt{\pi \cdot \xi} \cdot F^{-0.6} + R_{ss} \cdot \xi \cdot HB \cdot F^{-1} \right) \cdot \chi \quad (2.15.)$$

Considerând contactul pe bază de metal nobil, componenta rezistenței peliculei disturbatoare R_{ss} este mult mai mică decât rezistența de stricțiune (preponderentă și la contactele noi din metale nenobile).

Relația 2.15. poate fi scrisă și sub forma:

$$R = (c \cdot F^m + e \cdot F^{-1}) \cdot \chi \quad (2.16.)$$

unde

$$c = \frac{10^3 \cdot \rho}{5} \cdot HB^{0.1875} \cdot \sqrt{\pi \cdot \xi} \quad (2.17.)$$

$$e = R_{ss} \cdot \xi \cdot HB \quad (2.18.)$$

iar $\xi \in [0.4 \dots 0.6]$.

Pentru Ag cu $R_{ss} = 10^{-12} \Omega \cdot m^2$ și $\xi = 0.45$ valorile coeficienților sunt:
 $\Rightarrow c = 0.842 \cdot 10^{-4}$,

$$\Rightarrow e = 2.25 \cdot 10^{-4},$$

$$\Rightarrow m = 0.6.$$

Intr-o primă aproximație se realizează calculul care se verifică apoi pe cale experimentală.

Rezistența electrică de stricțiune R_S este după [H6] (unde r reprezintă raza suprafeței de contact):

$$R_S \sim 1 / r \quad (2.19.)$$

In cazul curenților slabi (cu valori foarte scăzute ale forței de contact F) se poate adopta cu rezultate mulțumitoare modelul sferei de conductivitate ∞ iar în cazul curenților tari, modelul elipsoidului turtit. Suprafața reală de contact depinde de valoarea efectivă a forței de contact F și se compune dintr-o mulțime de microzone, acceptându-se matematic ca o suprafață circulară închisă (figurile 2.6., 2.7.).

$$A_r = \pi \cdot r^2 \quad (2.20.)$$

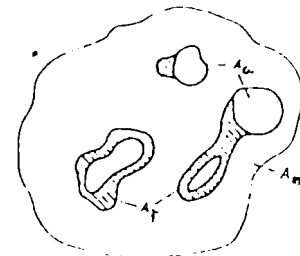
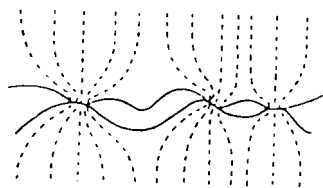


Fig.2.6.Contactul real și distribuția densității de curent. Fig.2.7>Contactul suprafețelor

Contactul suprafețelor delimitează conform [B1]: A_n - aria nominală de contact, A_a - aria aparentă de contact, A_r - aria reală de contact.

Datorită faptului că vârfurile asperităților pot varia în funcție de modificarea sarcinii încărcării și se pot deforma plastic se poate spune că suprafața reală de contact se determină prin următoarea însumare:

$$A_r = A_{\text{elastic}} + A_{\text{plastic}} \quad (2.21.)$$

Raza suprafeței reale de contact va fi conform [H6] în cazul:

$$\Rightarrow \text{deformării elastice:} \quad r_e = \sqrt[3]{\frac{F \cdot r_0}{E}} \quad (2.22.)$$

$$\Rightarrow \text{deformării plastice:} \quad r_p = \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot HB}} \quad (2.23.)$$

unde HB = duritatea, E = modulul de elasticitate, r_0 = raza cilindrului conductor. Valoarea totală va fi conform relației 2.21.:

$$r = \sqrt{r_e^2 + r_p^2} \quad (2.24.)$$

sau înlocuind relațiile 2.22., 2.23. și 2.26. în 2.24., rezultă:

$$r = \sqrt[3]{\frac{F \cdot r_0}{E}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{F}{F_{crit}}\right)^{1/3}} \quad (2.25.)$$

F_{crit} reprezintă forța critică de contact și este o mărime dependentă de formă și material, apărând în cazul în care valoarea raportului deformației elastice și plastice este de 1:1 și se determină astfel:

$$F_{crit} = \pi^3 \cdot HB^3 \cdot r_0^2 / E^2 \quad (2.26.)$$

Pentru $F < F_{crit}$ este valabilă relația 2.22. pentru calculul razei, fiind cazul deformației elastice.

Când forța de contact $F > F_{crit}$ apar deteriorări plastice ale peliculei disturbatoare, se modifică raza inițială de contact în cazul aplatizării suprafeței prin deformare plastică.

Rezistența de contact R se compune teoretic din valoarea rezistenței proprii de contact R_E (datorată conductibilității proprii a materialului) și din valoarea rezistenței peliculei disturbatoare (superficiale de contact) R_P dintre cele 2 elemente, unde "d" reprezintă grosimea peliculei disturbatoare:

$$R = R_E + R_P \quad (2.27.)$$

unde

$$R_P = \rho_F \cdot d / \pi \cdot r^2 \quad (2.28.)$$

și ρ_F e rezistivitatea peliculei disturbatoare dependentă de grosimea peliculei respective, rezultând rezistența conform modelului sferei de conductivitate ∞ :

$$R = \rho / (\pi \cdot r) + \rho_F \cdot d / (\pi \cdot r^2) = R_P \cdot [1 + \rho_F \cdot d / (\rho \cdot r)] \quad (2.29.)$$

Inlocuind valoarea constantă " k
"rezultă:

$$R = k \cdot F^{-m} \quad (2.30.)$$

pentru $\rho_F \cdot d = ct.$, exponentul $m \in [1/3 \div 1]$ iar pentru $\rho_F \cdot d = f(F)$,
 $m \in [1/3 \div 3]$ (figura 2.8.):

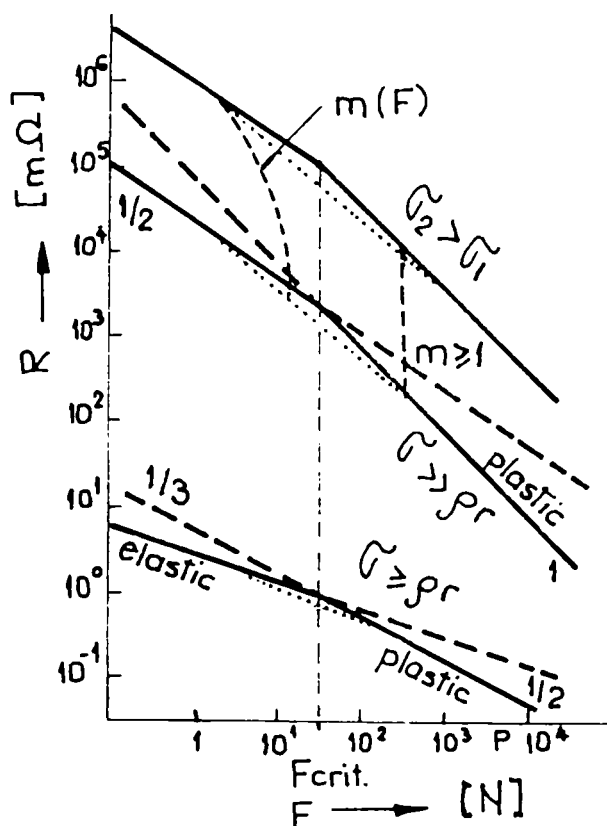


Fig.2.8. Rezistența electrică de contact cu sau fără peliculă disturbatoare în cazul deformației elastice și plastice.

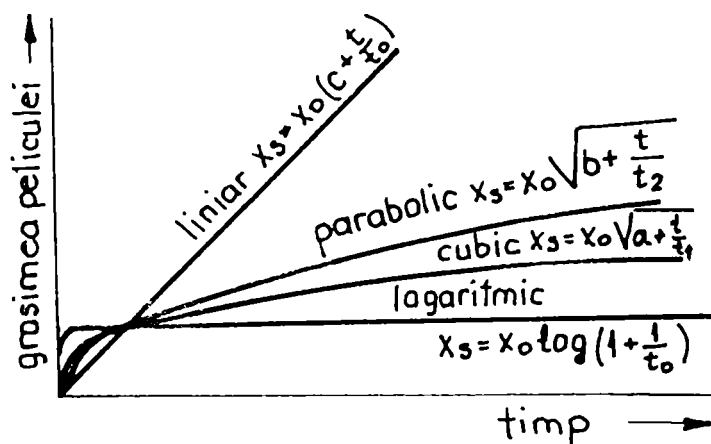


Figura 2.9. prezintă creșterea în timp a peliculei disturbatoare.

Rezistivitatea peliculei superficiale va avea un maxim dependent de forța critică de contact care se va deplasa în timp în cazul forțelor crescânde de contact (figura 2.10.).

Fig.2.9. Creșterea în timp a peliculei disturbatoare.

In tehnică se determină în general valoarea rezistenței de trecere R care se compune din:

$$R = R_L + R_E + R_P \quad (2.31.)$$

unde R_L reprezintă rezistența proprie a conductorilor electrici:

$$R_L = (\rho_1 \cdot l_1 / A_1) \cdot [1 / (1 + \rho_1 A_2 / \rho_2 A_1)] \quad (2.32.)$$

în care indexul 1 se referă la metalul de bază iar indexul 2 se referă la metalul nobil depus pe suprafață pentru un contact nemijlocit.

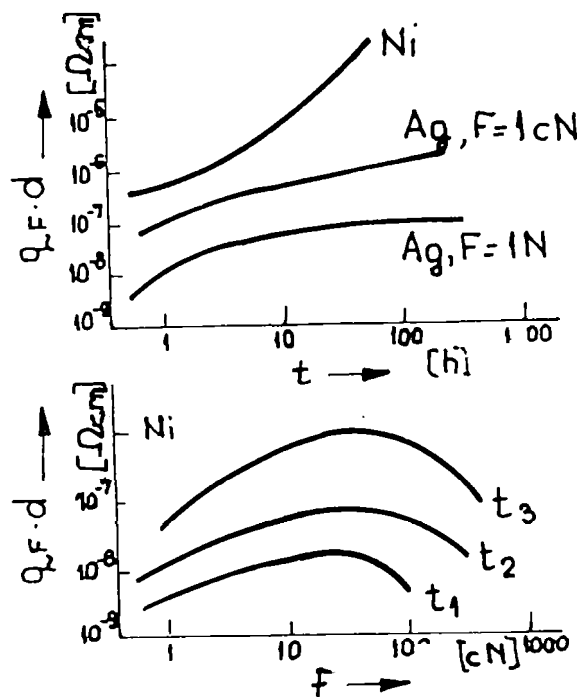


Fig.2.10. Rezistivitatea în funcție de timp și de forța de contact.

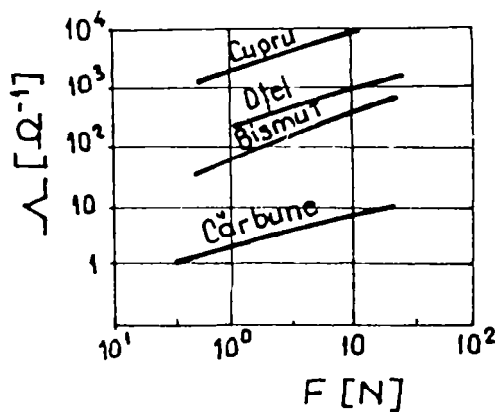


Fig. 2.11. Modificarea conductibilității electrice cu sarcina.

Rezultatele experimentale ale lui Bowden și Tabor [B4] pun în evidență creșterea conductibilității electrice Λ cu sarcina normală F (figura 2.11.) [T1].

Rezistența de trecere R va fi:

- ◆ $R = R_L$
- ◆ $R \cong R_L + R_P$ și $R_L > R_P \gg R_E$
- ◆ $R \cong R_P$ și $R_P \gg R_L \gg R_E$

în cazul contactelor noi, curate, nedisturbate,
la contacte ușor uzate,
în cazul contactelor improprii foarte uzate,
îmbătrânite.

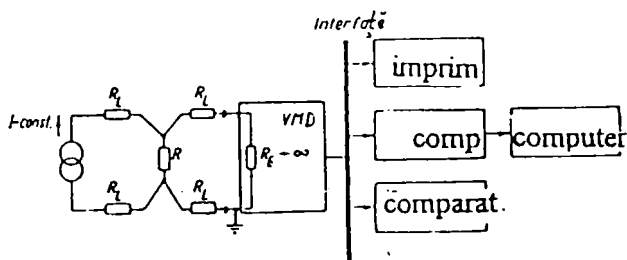
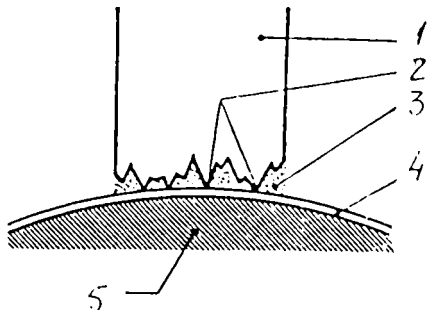


Fig.2.12. Măsurarea rezistenței de trecere.

În figura 2.12. se prezintă o schemă de măsurare cu voltmetru digital a valorii rezistenței de trecere R la curent constant în cazul contactelor cu curenți slabi.



În cazul contactelor electrice alunecătoare la atingerea dintre perie și inel colector are loc conducția electrică doar în anumite puncte de contact (acest lucru datorându-se peliculei disturbatoare de oxizi metalici, carbon sau apă și rezistenței proprii a periei), măsurându-se astfel rezistența de contact (de trecere) dintre elemente (figura 2.13.).

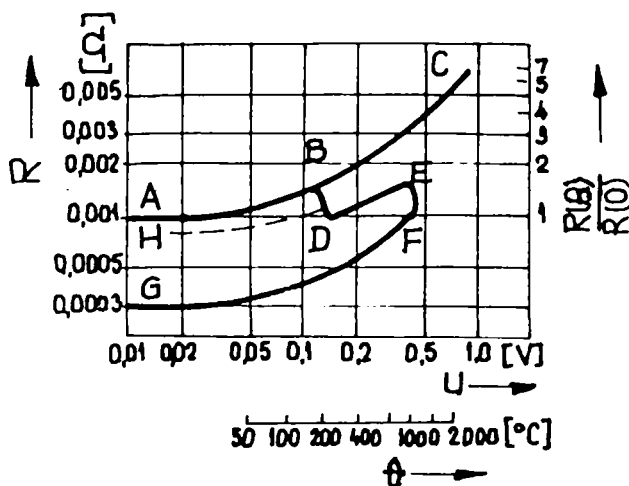
Fig.2.13. Contactul real dintre perie și inel colector (1-perie, 2-puncte de contact, 3-peliculă gazoasă, 4-peliculă disturbatoare, 5-piesă metalică).

Determinarea rezistenței de trecere la contactele electrice alunecătoare prin intermediul proceselor termice: rezistența de contact se determină cu ajutorul următoarei relații [H6]:

$$R = R_s + R_p = \frac{\rho}{2 \cdot a} + \frac{\rho_F}{\pi \cdot a^2} = c \cdot F^m \quad (2.33.)$$

unde R_s - rezistența de stricțiune, R_p - rezistența peliculei disturbatoare, ρ - rezistența specifică a materialului de contact, a - raza ariei reale de contact, ρ_F - rezistența specifică a peliculei disturbatoare, c - constantă, F - forța de contact, m - exponent. În punctele zonei de stricțiune densitatea de curent ajunge la valori de ordinul a zeci de 10^4 A/m^2 , temperatura mărindu-se foarte mult.

Materialele de contact pot fi supraîncălzite până la topire, modificându-se astfel rezistența de contact (figura 2.14., porțiunea A-B) conform relației:



$$R = R_0 \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \right) \quad (2.34.)$$

unde R - rezistența de contact la temperatura θ , R_0 - rezistența de contact la temperatura θ_0 , $2/3$ - factor empiric, α - coeficient de temperatură, $\Delta\theta$ - variația temperaturii

Fig.2.14. Dependența dintre rezistența de contact și tensiune, respectiv temperatură [H6].

În punctul B se atinge temperatura de topire a metalului, mărindu-se suprafața de contact conform relației:

$$n \cdot A_0 = \frac{F}{p_{as}} \quad (2.35.)$$

în care n - numărul punctelor de contact, A_0 - suprafața elementară de contact, p_{as} - presiunea admisibilă la strivire. Mărirea suprafeței reale de contact prin încălzire duce la o scădere a rezistenței de contact până în punctul D, urmată de o creștere a rezistenței de contact raportată la noua arie reală ($n \cdot S_0$) (porțiunea D-E). În punctul de topire a contactului E apare o scădere pronunțată a rezistenței de contact (până în punctul F), acesta nemaifiind în stare să-și păstreze proprietățile geometrice și fizico-chimice.

În general este necesar să se respecte următoarea condiție:

$$R \cdot I_c = U \quad (2.36.)$$

unde I_c - curentul critic, U - valoare constantă a tensiunii [H6].

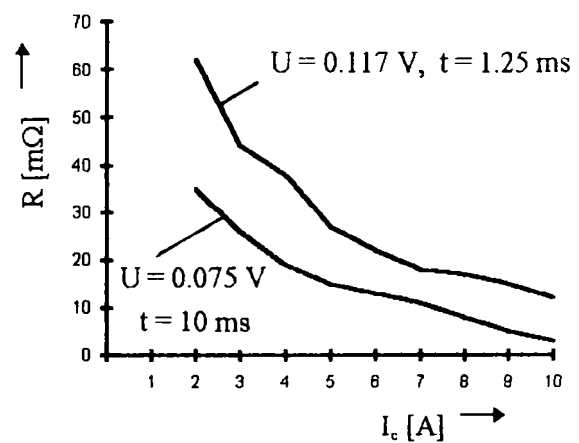
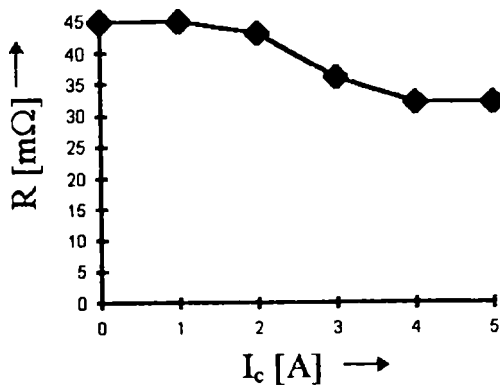


Fig.2.15.Scăderea rezistenței de contact funcție de curent Fig. 2.16. Dependența $R = f(I_c)$ la durate diferite de încălzire

Constanta U corespunzătoare tensiunii de topire - înmuiere a metalului se deduce din relația 2.37.:

$$\frac{U^2}{4} = L \cdot (\theta_k^2 - \theta_0^2) \quad (2.37.)$$

în care: L - constanta Lorentz, θ_k - temperatura maximă de contact, θ_0 - temperatura mediului ambiant [H6].

În figura 2.18. se prezintă modul de creștere a rezistenței electrice la contactul grafit-cupru în funcție de viteza de alunecare relativă, conform [G1]. Experiența a

dovedit că la viteze mai mari (de până la 10 m/s) se păstrează aceeași tendință de creștere a rezistenței de contact.

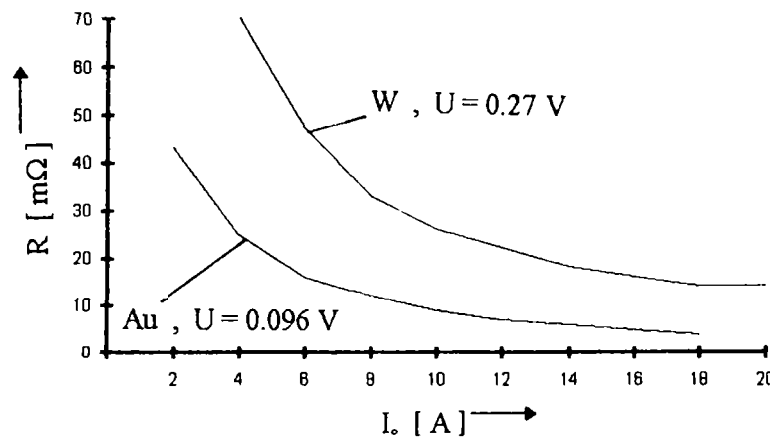


Fig.2.17. $R = f(I_c)$ pentru diverse materiale de contact.

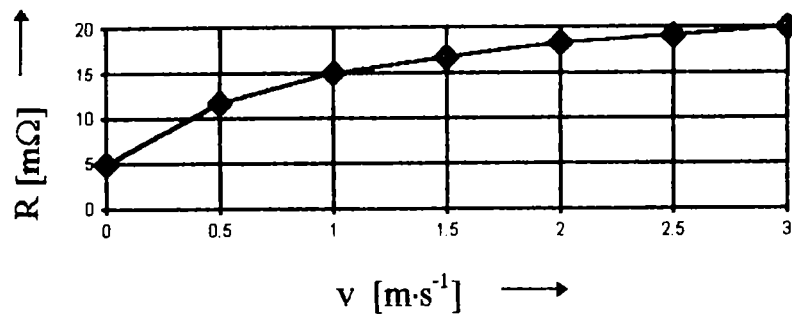


Fig.2.18. Dependența rezistenței contactului cu inel din cupru și perie din grafit funcție de viteza de alunecare.

Tensiunea de pe rezistența de contact între două perii legate în serie și inelul colector reprezintă tensiunea de trecere (figura 2.19.) [4].

Această mărime influențează procesul de comutare și pierderile datorate încălzirii. Căderea de tensiune a periei ΔU se compune din (figura 2.20.):

- $\Rightarrow U_1 =$ căderea de tensiune de contact,
- $\Rightarrow U_2 =$ căderea de tensiune pe perie,
- $\Rightarrow U_3 =$ căderea de tensiune pe armătură.

$$\Delta U_1 = [80 \div 85]\% \cdot \Delta U \quad \text{pentru perii din electrografit.} \quad (2.38.)$$

În cazul periiilor cu conținut metalic procentul anterior este mai ridicat. Din acest motiv se pot neglija în practică celelalte două componente care-și păstrează valorile constante, acestea depinzând numai de material și de tipul contactului ($\Delta U_1 \cong \Delta U$).

Valoarea tensiunii de contact este dependentă de o multitudine de factori.

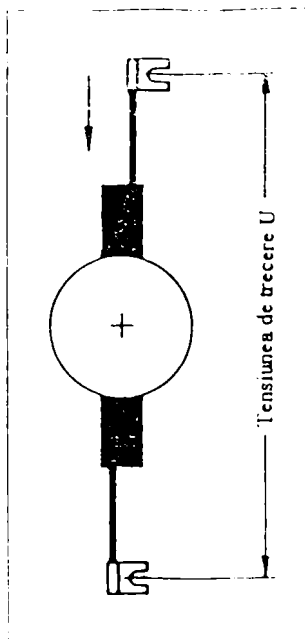


Fig.2.19. Tensiunea de trecere.

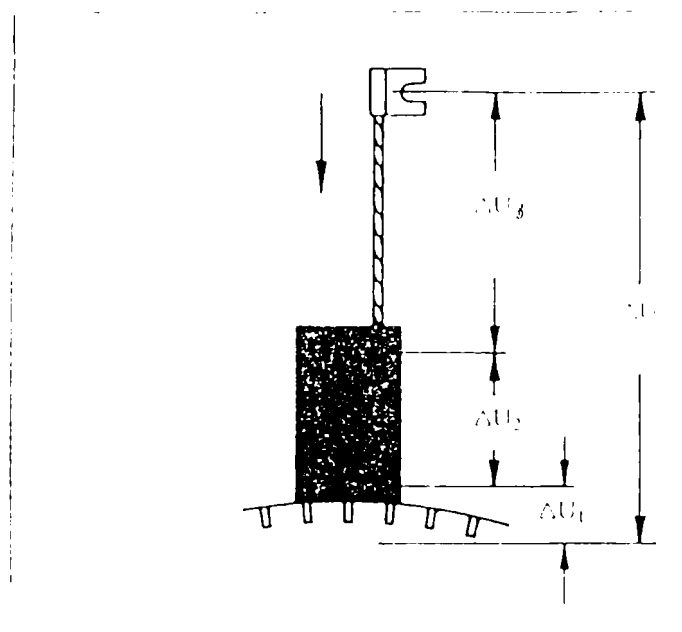


Fig.2.20. Căderea de tensiune de contact.

In tabelul 2.2. sunt date valorile tensiunii de trecere U în funcție de coeficientul de frecare f dintre perechile de materiale aflate în contact [4]:

Tabelul 2.2.

<i>tensiunea de trecere U [V]:</i>	<i>coeficientul de frecare f [-]:</i>
< 1.5	< 0.08
1.5 - 2.2	0.08 - 0.15
2.2 - 3	0.15 - 0.22
> 3	> 0.22

In figura 2.21. este redată legătura dintre tensiunea de trecere U și densitatea de curent j a periei [4]:

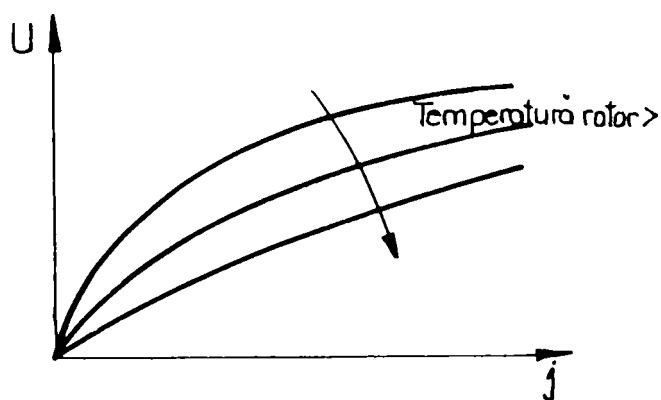


Fig.2.21. Dependența dintre tensiunea de trecere U și densitatea de curent j .

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Caracteristica statică neliniară a rezistenței de trecere R în funcție de densitatea de curent j este prezentată în figura 2.22.[4].

În momentul în care intensitatea câmpului electric respectiv densitatea de curent j depășește anumite valori critice, pelicula disturbatoare va fi străpunsă. În acest caz apar așa-zise "canale metalice", (fritarea sau creșterea conductibilității electrice în anumite puncte datorită conducerii curentului electric prin pelicula disturbatoare) (figura 2.23.).

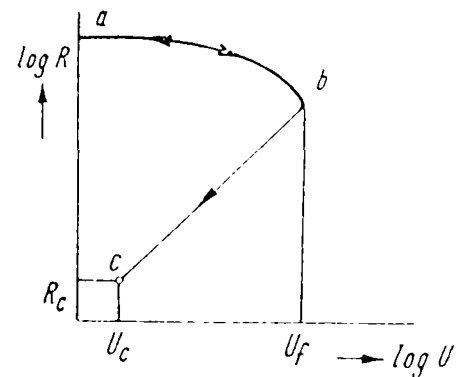
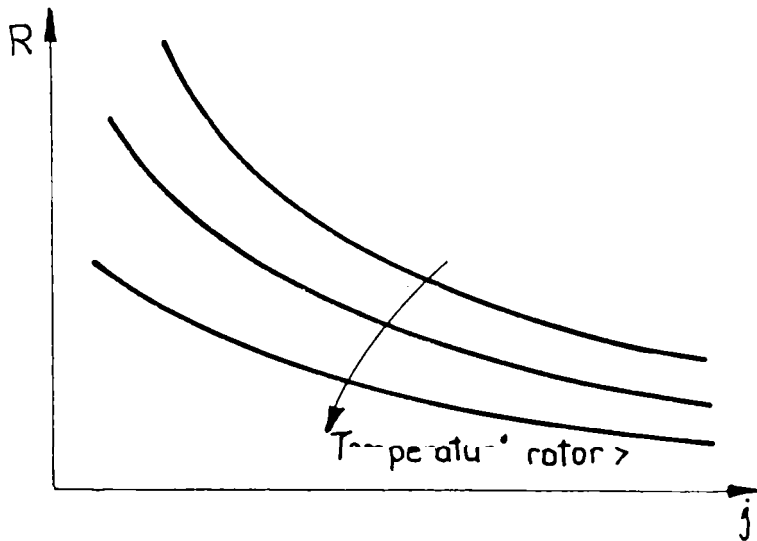


Fig.2.23. Conducția prin fritare.

Fig.2.22. Rezistența de trecere R în funcție de densitatea de curent j .

Dacă forța de apăsare a contactului este relativ mică are loc o deformare elastică a vârfurilor de contact la care pelicula disturbatoare se menține, devenind semiconductor. Conducția curentului are loc astfel prin fritare. Densitatea de curent prea mică poate avea efect mai distructiv decât suprasarcina. Suprasarcina are ca efect reducerea rezistenței peliculei disturbatoare (determinantă pentru valori ale tensiunii ΔU), rămânând doar rezistența proprie a periei. În cazul unui motor de comutație sensul curentului parcurs se modifică atunci când rotorul efectuează o mișcare de rotație (procesul comutației, figura 2.24.).

În figura 2.25. se prezintă comutația ca proces de cuplare a unui comutator rezistiv (întrerupătorul este format de perechea perie-inel colector), având ca efect formarea scânteilor și arcului electric.

Dacă între suprafețele celor două piese electrice în contact apare fenomenul arcului electric, suprafața frontală a fiecărei piese ia aproape instantaneu temperatura de topire a materialului de contact θ^* [H4].

În această situație este necesară determinarea câmpului de temperatură în regiunea supusă arderilor și scânteilor datorate arcului electric. Datorită temperaturii mari a suprafeței frontale a cuplei se pot neglija încălzirea datorată trecerii curentului electric și cedarea de căldură pe suprafața exterioară dacă studiul se desfășoară pe o

perioadă scurtă de timp. In aceste condiții ecuația generală a transmiterii căldurii este conform [H4], [H5]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_1} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2.39.)$$

unde

θ - supratemperatura față de mediul ambiant,

t - timpul,

λ - conductivitatea termică,

c_1 - căldura specifică volumică,

x - distanța față de extremitatea elementului supus arcului electric.

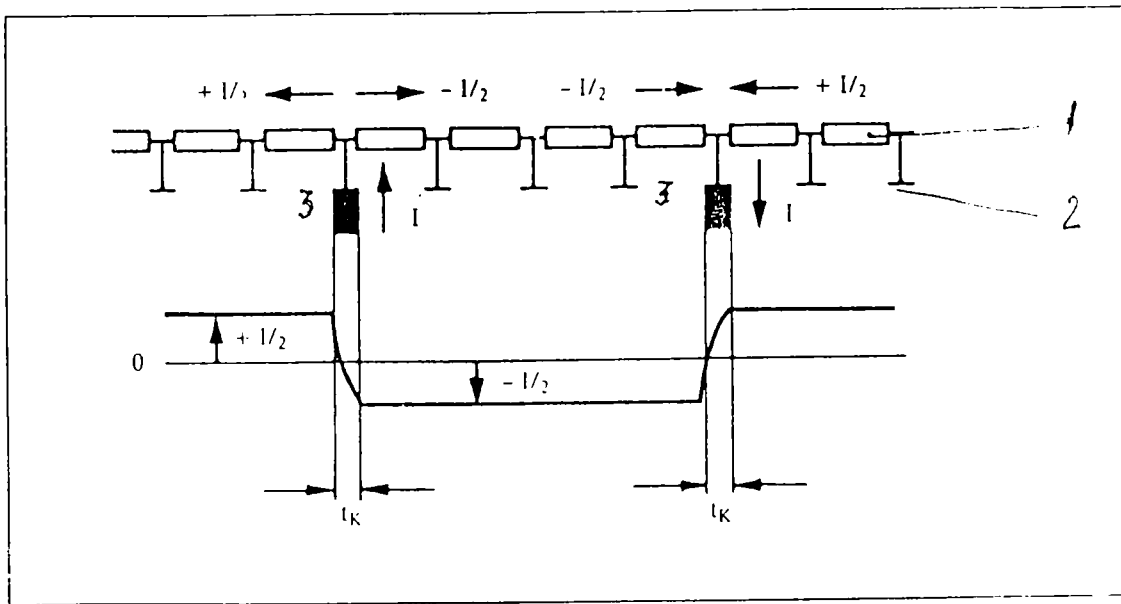


Fig.2.24. Procesul comutației la rotorul mașinilor electrice (1-bobinaj, 2-colector, 3-perii grafitate).

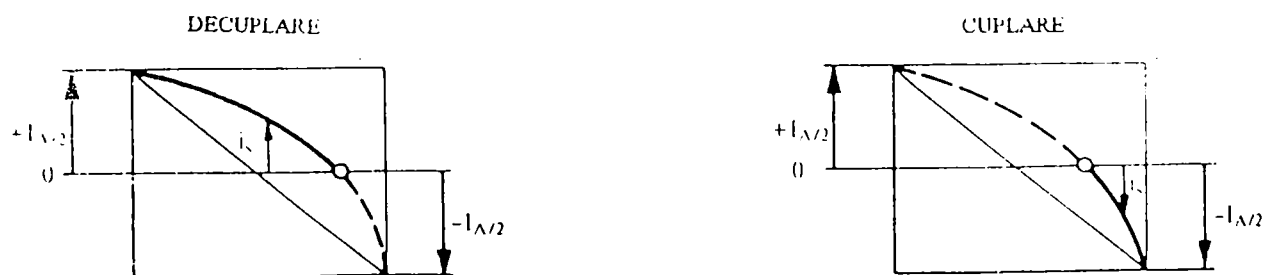


Fig.2.25. Comutația printr-un comutator rezistiv.

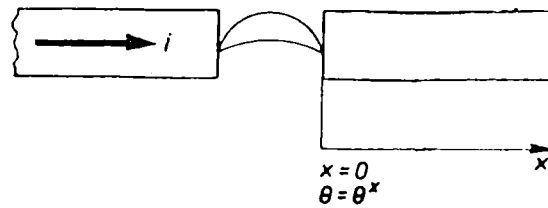


Fig. 2.26. Suprafața frontală încălzită de arcul electric.

Pentru găsirea soluției ecuației diferențiale 2.39. se aplică operatorul Laplace $L(\theta) = \Theta$. Originea timpului $t = 0$ se ia la apariția arcului electric iar acesta excită elementul cuplei cu funcția treaptă de încălzire θ^* . Astfel ecuația 2.39. devine:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} - \frac{p_x}{\lambda} \cdot \Theta = 0 \quad (2.40.)$$

c_1

cu soluția:

$$\Theta = A_1 \cdot e^{\frac{\sqrt{p_x}}{\sqrt{\lambda}} \cdot x} + A_2 \cdot e^{-\frac{\sqrt{p_x}}{\sqrt{\lambda}} \cdot x} \quad (2.41.)$$

c_1

unde p_x este o variabilă.

Din condițiile la limită $x = 0, t \rightarrow 0, p_x \rightarrow \infty, \Theta = \Theta^*$ rezultă:

$$\Theta^* = A_1 + A_2 \quad (2.42.)$$

respectiv: $x \rightarrow \infty, t \rightarrow 0, p_x \rightarrow \infty, \Theta = 0$:

$$A_1 = 0 \quad \text{și} \quad A_2 = \Theta^*. \quad (2.42'.), (2.42.'')$$

Pentru excitația treaptă

$$\Theta^* = \theta^* / p_x \quad (2.43.)$$

și soluția în domeniul imagine este:

$$L(\theta) = \frac{\theta^*}{p_x} \cdot e^{-\frac{\sqrt{p_x}}{\sqrt{\lambda}} \cdot x} \quad (2.44.)$$

c_1

Funcția original va fi:

$$\theta = \theta^* \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{x}{2 \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}}} e^{-y^2} \cdot dy \right) \quad (2.45.)$$

Expresia:

$$\Phi \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{x}{2 \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}}} e^{-y^2} \cdot dy \quad (2.46.)$$

este funcția erorilor, calculată în tabelul Jahnke-Emde-Lösch [J1] pentru valori ale lui $\frac{x}{2 \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}} \in [0.....3]$.

Dacă arcul electric este scurt, întreaga energie sau cantitate de căldură q este transmisă celor două suprafețe de frecare care transmit mai departe prin conductivitate fluxul termic. Pentru o suprafață frontală A:

$$\frac{q}{2} = - \int_0^l \lambda \cdot A \cdot \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} \cdot dt \quad (2.47.)$$

Pentru obținerea gradientului de temperatură $\left[\frac{d\theta}{dx} \right]_{x=0}$ se derivează ecuația 2.45. în raport cu x :

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\theta^* \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot t \cdot \frac{\lambda}{c_1}}} \quad (2.48.)$$

respectiv

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \right]_{x=0} = - \frac{\theta^*}{\sqrt{\pi \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}} \quad (2.49.)$$

Relația 2.47. devine:

$$\frac{q}{2} = \frac{\theta^* \cdot \lambda \cdot A}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}} \cdot \int_0^l \frac{dt}{\sqrt{t}} \quad (2.50.)$$

sau

$$\frac{q}{2} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot A \cdot \theta^* \cdot \sqrt{\lambda \cdot c_1 \cdot t} \quad (2.50')$$

Relația 2.50'. stabilește legătura între cantitatea de căldură $q/2$ primită de suprafața frontală a contactului și timp. Viteza de pătrundere a căldurii în piesa de contact se poate determina prin relația 2.45. dacă se consideră două puncte situate unul la distanța x_1 și celălalt la distanța x_2 având aceeași temperatură primul la momentul t_1 , cel de-al doilea la t_2 .

$$\int_0^{\frac{x_1}{2 \cdot \sqrt{t_1} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}}} e^{-y^2} \cdot dy = \int_0^{\frac{x_2}{2 \cdot \sqrt{t_2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{c_1}}}} e^{-y^2} \cdot dy \quad (2.51.)$$

Din relația anterioară rezultă că limitele superioare ale integralelor sunt identice:

$$\frac{x_1^2}{x_2^2} = \frac{t_1}{t_2} \quad (2.52.)$$

Se consideră o viteză medie de propagare a căldurii v_m pentru un interval de timp precizat și pentru un anumit segment liniar al piesei de contact:

$$v_m = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (2.53.)$$

Viteza medie depinde de proprietățile termoelectrice ale materialului contactului. In figura 2.27. este prezentat câmpul de temperatură pentru Cu și Ag.

Ca temperatură frontală θ^* s-a considerat temperatura de topire a materialului contactului cu temperatura de referință de 0 °C [H5].

Măsurarea curbelor de potențial ale periiilor se realizează cu o tijă palpatoare grafitată (de exemplu o mină grafitată de creion) și cu un instrument de măsurare de tensiune continuă (figura 2.28.) [4].

Prin intermediul tijei palpatoare grafitate se obține tensiunea dintre perie și colector prin palparea într-un plan frontal a suprafeței colectorului pe o distanță egală cu lățimea periei. Peria nu are voie să atingă în decursul măsurării tija grafitată. Dependența dintre tensiunea obținută și lățimea periei reprezintă curba de potențial (figura 2.29.).

Esențială este menținerea condițiilor de lucru ale mașinii electrice în decursul procesului de măsurare.

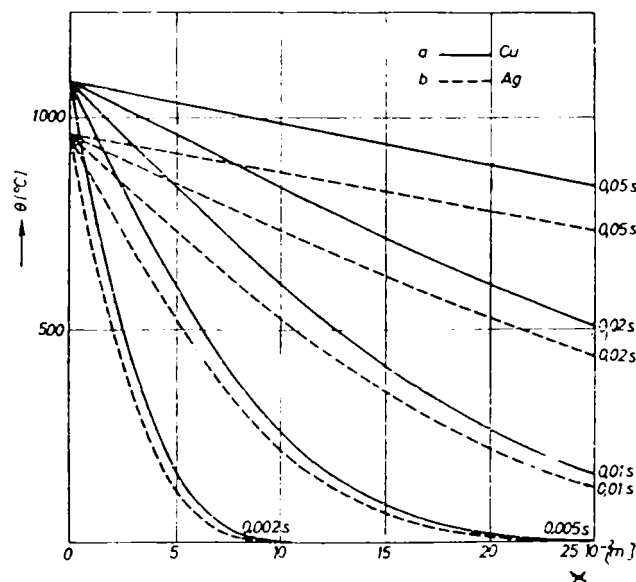


Fig. 2.27. Câmpul de temperatură al contactului încălzit de piciorul arcului electric.

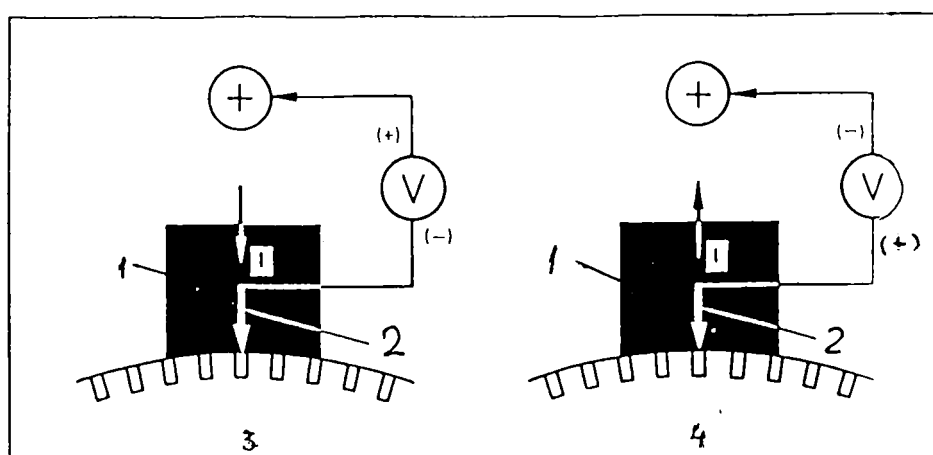


Fig.2.28. Măsurarea curbelor de potențial ale periilor (1-perie, 2-tijă grafitată, 3-motor, 4-generator).

Rezultatele utile pentru proiectant și utilizator se pot obține numai îmbinând suportul teoretic cu o cercetare experimentală laborioasă.

Rezistența electrică de contact perie-inel depinde deci de un important număr de factori, dintre care se pot menționa: forța de apăsare, duritățile materialelor conjugate, rezistivitatea electrică, viteza relativă și în mod deosebit micro- și macrogeometria inelului.

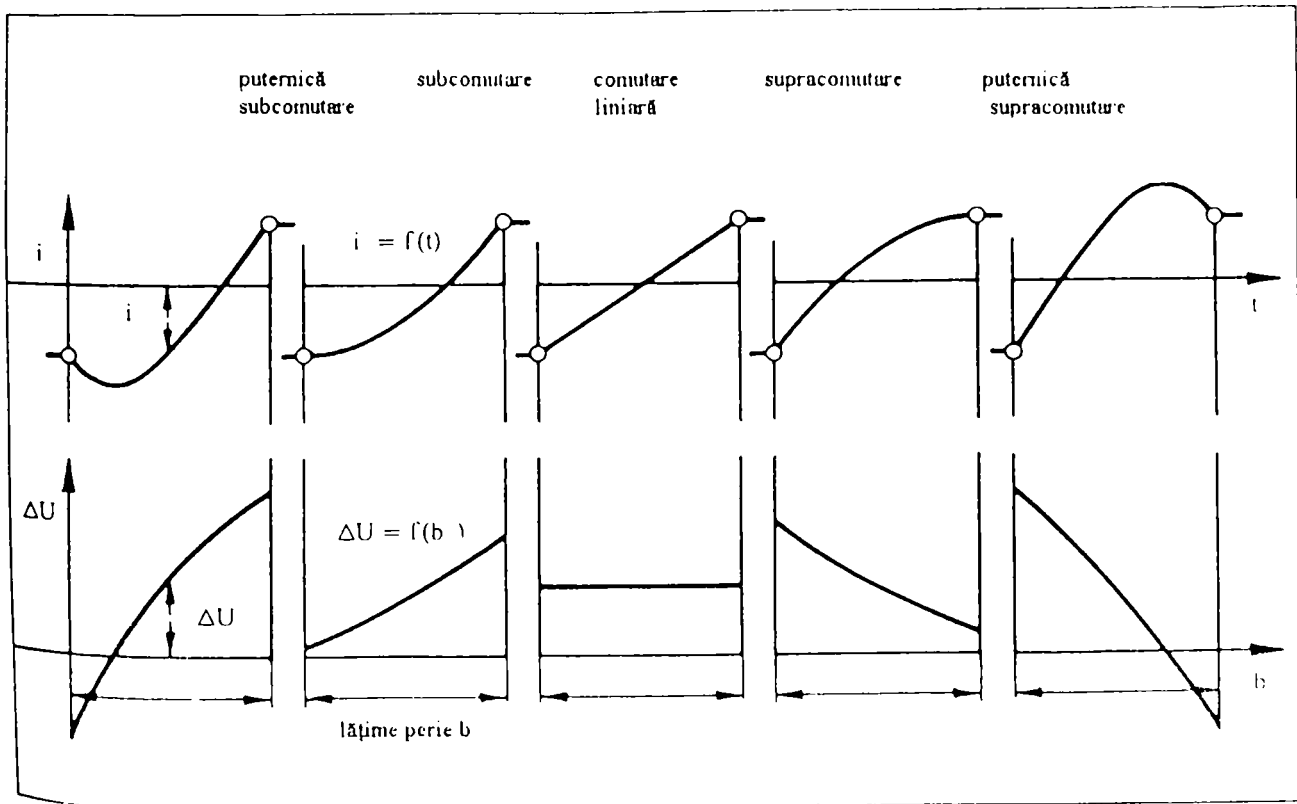


Fig. 2.29. Reprezentarea modificării curentului unei bobine de comutație i_k și curba de potențial în funcție de lățimea periei.

2.2. Bazele teoretice ale contactelor mobile din punct de vedere chimic și termic

2.2.1. Procese și reacții chimice din domeniul contactelor electrice mobile

Suprafețele curate ale contactelor mobile rețin cu ușurință chiar și urme de substanțe străine cum ar fi gazele, vaporii, substanțele organice ș.a.. Stratul nou format are în general un coeficient de frecare și o uzare mult mai reduse. Efectul favorabil asupra frecării se datorește existenței unui strat subțire de material (peliculei disturbatoare) diferit de cel al cuplei de frecare, aderent la suprafața solidului. Prezența acestui strat se datorează proprietății fundamentale a suprafețelor de a dispune de forțe moleculare (atomice) necompensate (energie superficială, capacitate de adsorbție etc). Deplasarea are loc între straturi și nu între suprafețele metalice. Prezența peliculei modifică proprietățile suprafeței suport, permițând deplasarea tangențială cu un efort mai mic, chiar în prezența unor sarcini normale ridicate. S-a constatat experimental că pelicula disturbatoare și proprietățile de

frecare ale acesteia sunt aproape independente de viteza relativă de deplasare a suprafețelor [I2]. Portanța acesteia este datorată forțelor statice de adeziune peliculă-suprafață și a celor de coeziune din interiorul acesteia.

Formarea oxizilor prin reacția oxigenului cu metalele este o reacție tipică de suprafață. Oxidul separă apoi reactanții, reducând viteza de reacție. Continuarea reacției este asigurată prin difuzia oxigenului în strat sau prin pori. Cantitatea de solvat "m" difuzată prin suprafața "A" în unitatea de timp este proporțională cu gradientul de concentrație dC / dx , considerat perpendicular pe "A" [I2]:

$$m = -AD \frac{dC}{dx} \quad (2.54.)$$

Variația concentrației "C" în funcție de timp în punctul în care gradientul este dC / dx va fi:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.55.)$$

Dependența de temperatura " θ " a coeficientului de difuzie "D" este dată de o relație de tip Arrhenius [I2]:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \theta}} \quad (2.56.)$$

unde D_0 și Q sunt constante. Valorile " D_0 " și " Q " sunt date în tabelul 2.3. pentru câțiva oxizi:

Tabelul 2.3.

compusul	produsul care difuzează	intervalul de temperatură $\Delta\theta$ [°C]	$D_0 \cdot 10^4$ [$m^2 \cdot s^{-1}$]	$Q \cdot 10^3$ [J]
FeO	Fe	690-1010	0.014	126.44
Fe ₂ O ₃	Fe	930-1270	$4 \cdot 10^4$	468.92
	O	1150-1250	10^{11}	611.27
CuO	Cu	800-1050	0.12	151.14

Câteva proprietăți ale oxizilor cuprului sunt date în tabelul 2.4., unde ΔH_{desc} reprezintă căldura de descompunere, formarea unei molecule de oxigen și trecerea oxidului într-o fază de oxidare inferioară. Mărimea φ reprezintă raportul:

$$\varphi = \frac{\text{volumul} \cdot \text{molecular} \cdot \text{al} \cdot \text{oxidului}}{\text{volumul} \cdot \text{atomic} \cdot \text{al} \cdot \text{metalului}} \quad (2.57.)$$

Valoarea φ poate fi considerată o măsură a tensiunilor care apar în straturile subțiri de oxid sau o indicație a tendinței de formare a crăpăturilor în straturile groase de oxid. Cu cât un oxid are valoarea φ mai mare, cu atât va forma crăpături la grosimi mai mici.

Tabelul 2.4.

compusul	structura	temperatura de transformare θ [$^{\circ}$ C]	$\Delta H_{desc} \cdot 10^3$ [J]	volumul molar $\cdot 10^6$ [m^3]	φ
Cu ₂ O	cubică	1230	334.94	23.3	1.64
CuO	monoclinică	1100	286.38	12.2	1.72
Cu(OH) ₂	-	35	43.96	29	4

Prima etapă în reacția dintre metal și oxigen este chemosorbția în strat monomolecular a oxigenului. Viteza procesului de chemosorbție este foarte mare, astfel încât la temperatură normală suprafața se acoperă practic instantaneu cu un strat monomolecular de oxigen. Prin reacția completă a acestui strat cu atomii din suprafața metalului se formează stratul propriu-zis de oxid. În continuare până la câteva sute de Å grosime, creșterea stratului de oxid are loc prin difuzia reactanților în ambele sensuri. La grosimi mai mari intervin pori sau crăpături care facilitează accesul oxigenului la suprafața metalică.

O caracteristică importantă a procesului de oxidare este evoluția lui în funcție de timp. Dacă se ia ca măsură a oxidării variația de masă pe unitatea de suprafață a probei Δm atunci cinetica procesului de oxidare este dată de relația:

$$\Delta m = f(t) \tag{2.58.}$$

În funcție de grosimea stratului și temperatură relația 2.58. poate fi o funcție liniară, parabolică, cubică sau logaritmică.

Pentru straturi subțiri de oxid este valabilă în general o funcție logaritmică sau cubică iar pentru straturile groase o funcție parabolică sau liniară. Variația grosimii stratului de oxid format la temperatura de 25°C este prezentată pentru câteva metale în figura 2.30 [12].

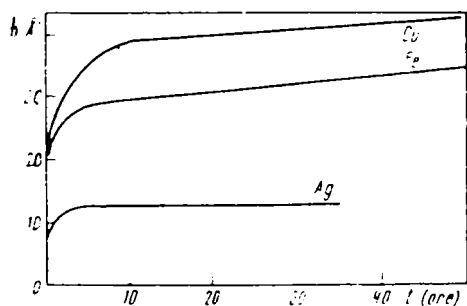


Fig.2.30. Grosimea stratului de oxid pentru câteva metale la temperatura de 25°C.

Adsorbția determină modificarea compoziției la suprafața dintre două faze în raport cu compoziția în interiorul uneia din faze. Adsorbția pe suprafața solidelor reprezintă un fenomen cu importante efecte asupra procesului de frecare. Solidele permit obținerea unor suprafețe de adsorbție mari la un volum total redus. Adsorbția se poate studia în acest caz determinând direct variația de concentrație a adsorbatului în soluție sau în faza gazoasă. Pentru adsorbția pe suprafețe solide se folosesc izotermele de adsorbție:

$$n_s = f(n_i, \theta_a) \quad (2.59.)$$

pentru adsorbția din fază lichidă și

$$n_s = f(p_i, \theta_a) \quad (2.60.)$$

pentru adsorbția din fază gazoasă, unde

⇒ n_s - concentrația adsorbatului pe suprafața solidului,

⇒ n_i - concentrația adsorbatului în soluție,

⇒ p_i - presiunea parțială a adsorbatului,

⇒ θ_a - temperatura absolută.

Relațiile de stare 2.59. și 2.60. pot fi scrise și sub formă energetică:

$$I_s = f(n_s, \theta_a) \quad (2.61.)$$

unde I_s reprezintă entalpia sistemului.

Această relație reprezintă legătura dintre căldura de adsorbție care poate fi determinată calorimetric, cantitatea adsorbită n_s și temperatura absolută θ_a .

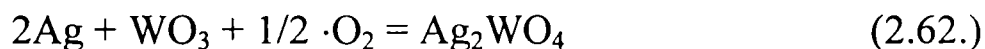
Cunoașterea structurii straturilor este deosebit de importantă pentru explicarea modului de acțiune al acestora în decursul procesului de frecare. Practic pot apare două tipuri distincte de straturi:

⇒ **strat monomolecular** în care adsorbția se face într-un singur strat. Straturile următoare au aceeași concentrație ca și volumul fazei gazoase sau lichide.

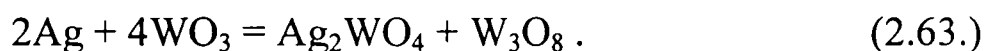
⇒ **strat polimolecular** care se formează ca urmare a faptului că potențialul de adsorbție scade încet cu distanța de la suprafață.

Atmosfera în care lucrează contactul electric și temperatura ridicată a arcului electric favorizează diverse reacții chimice asupra metalelor. Argintul este astfel foarte sensibil la acțiunea sulfurii. Sulfurii degajat în atmosferă se fixează pe contacte prin intermediul umidității prin molecule de apă adsorbite sau atmosfera industrială conține SO_2 sau H_2S care rezultă din procese de ardere. Pelicula de Ag_2S constituie un motiv ca rezistența de contact să crească de 2..3 ori față de rezistența de contact a argintului neatacat.

Arcul electric activează procesul de oxidare care este de dorit în scopul reducerii tendinței de sudare a contactelor din Ag pur. Un aliaj Ag-Cu cu un conținut de [1...10]% Cu se comportă mai bine la tendința de sudură decât Ag pur. Prin alierea Ag cu Cd se urmărește formarea CdO care se disociază și se sublimează pe contacte, împiedicând sudarea acestora. Arcul electric acționează nefavorabil asupra contactelor Ag-W, în sensul că produsul rezultat din reacție își pierde sensibil conductivitatea electrică prin formarea de wolframat de argint:



sau



Reacțiile au loc în jurul temperaturii de 550°C. Se elimină astfel posibilitatea utilizării contactelor din Ag-W și Ag-Mo în condiții de oxidare pronunțate.

La funcționarea în curent continuu, Ag_2WO_4 fiind un produs lichid încă la temperaturi relativ joase, va rezulta o migrație însemnată de material de la catod la anod $(50...100) \cdot 10^{-3}$ g/C. Deci din cauza reacțiilor favorizante de temperatură ridicată a arcului electric nu se obțin proprietăți aditive ale componentilor aliajului sau pseudoaliajului.

2.2.2. Regimurile termice ale contactelor electrice

Temperatura suprafeței de frecare pentru contactul liniar

Teoria temperaturii instantanee dezvoltată de Block [I2] a fost elaborată pentru o sursă de tip bandă cu diferite distribuții ale intensității fluxului de căldură în deplasare pe un solid bun conducător de căldură.

Ecuția diferențială generală a conductibilității căldurii pentru cazul tridimensional este:

$$\nabla^2 \theta = \frac{\lambda}{\rho_s \cdot c} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.64.)$$

unde: θ - temperatura [°C], λ - conductibilitatea termică [W/m°C], ρ_s - masa specifică [kg/m³], c - căldura specifică a materialului [J/kg°C], t - durata procesului de frecare [s].

Pentru simplificare se reduce cazul la conducția unidimensională. Se face ipoteza că viteza de deplasare este suficient de mare pentru ca transmiterea căldurii să aibă loc numai pe direcția normală la suprafață și că sursa de căldură este unidimensională. Astfel ecuația 2.64. devine:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 y} = \frac{\lambda}{\rho_s \cdot c} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.65.)$$

Soluția ecuației pentru cazul unei surse liniare instantanee este:

$$\theta = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho_s \cdot c \cdot t}} \cdot e^{\frac{-y^2}{4\lambda \cdot t}} \cdot e^{\frac{-y^2}{\rho_s \cdot c \cdot t}} \quad (2.66.)$$

unde

Q - densitatea sursei de căldură [$J \cdot m^{-2}$],

t - timpul scurs de la emisia de căldură.

Termenul $\sqrt{\lambda \cdot \rho_s \cdot c}$ este coeficientul de saturație termică.

În tabelul 2.5. se prezintă coeficienții de saturație termică ai câtorva materiale folosite în construcția contactelor electrice alunecătoare [I2]

Tabelul 2.5.

material	$\sqrt{\lambda \cdot \rho_s \cdot c}$ (la 100°C)
Cu	1100
grafit	558
Cr-Ni-V	92.2
Bz [90%Cu, 10%Sn]	550
Bz [88%Cu, 10%Sn]	485

iar în tabelul 2.6. se prezintă alți parametrii termofizici ai materialelor contactelor electrice alunecătoare.

Ceea ce interesează este temperatura la suprafață (pentru $y=0$):

$$\theta = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho_s \cdot c \cdot t}} \quad (2.67.)$$

În cazul real sursele liniare sunt de tip bandă. Se presupune că lățimea benzii este mult mai mică decât lungimea ei.

Pentru calculul temperaturii maxime a suprafeței în cazul unei surse de tip bandă se presupune o distribuție a intensității fluxului de căldură în interiorul benzii $q = q(\xi)$ (figura 2.31.) [I2].

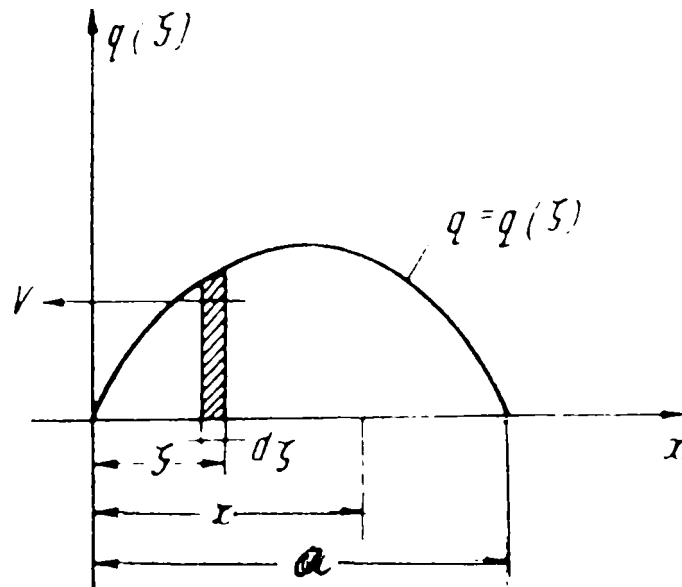


Fig. 2.31. Sursa de căldură tip bandă.

Temperatura în punctul x datorită sursei $q(\xi) d\xi$ de durată dt este:

$$d\theta = \frac{q(\xi)dt}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho_s \cdot c \cdot t}} \quad (2.68.)$$

Deoarece între ξ și t există relația:

$$\xi = x - t \cdot v \quad (2.69.)$$

ecuația 2.68. devine:

$$d\theta = -\frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho_s \cdot c \cdot v}} \cdot \frac{q(\xi)d\xi}{\sqrt{x-\xi}} \quad (2.70.)$$

sau

$$\theta = -\frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho_s \cdot c \cdot v}} \cdot \int_0^x \frac{q(\xi)d\xi}{\sqrt{x-\xi}} \quad (2.71.)$$

Ecuația 2.71. arată distribuția temperaturii pe suprafața unui corp pentru o distribuție dată a intensității fluxului de căldură. Temperatura maximă pe suprafață se obține prin derivarea relației 2.71. în raport cu x . Pentru o sursă de tip bandă temperatura de suprafață maximă θ_{\max} este:

$$\theta_{\max} = A \cdot \frac{q_m}{\sqrt{\lambda \cdot \rho_s \cdot c}} \cdot \sqrt{\frac{a}{v}} \quad (2.72.)$$

unde

⇒ A - constantă ce depinde de forma distribuției fluxului de căldură (pentru o distribuție după o elipsă $A = 1.13$ iar pentru o intensitate constantă $A = 1.11$),

⇒ q_m - intensitatea medie a fluxului de căldură [$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$],

⇒ a - lățimea benzii,

⇒ v - viteza de deplasare sau alunecare a sursei.

La frecarea dintre două solide și la generarea căldurii participă perechea perie-inel. Căldura degajată prin frecare se distribuie în ambele corpuri. Pentru aflarea raportului de distribuție, Block admite ipoteza egalității temperaturii celor două suprafețe în contact. Pentru a putea folosi relația 2.72. și pentru cel de-al doilea corp e necesar ca acesta să se deplaseze în raport cu sursa de căldură. În cazul general, dacă viteza unei suprafețe este v_1 iar viteza celeilalte suprafețe este v_2 , atunci pentru folosirea relației 2.72. este necesar să fie îndeplinite simultan condițiile:

$$|v_1 - v_2| < v_1 \quad \text{și} \quad |v_1 - v_2| < v_2.$$

Din egalitatea temperaturii maxime la suprafața de contact (distribuția intensității fluxului de căldură fiind aceeași pentru ambele corpuri), respectiv $(\theta_{\max})_1 = (\theta_{\max})_2$ rezultă:

$$\frac{q_{m1}}{\sqrt{\lambda_1 \cdot \rho_{s1} \cdot c_1}} \cdot \sqrt{\frac{a}{v_1}} = \frac{q_{m2}}{\sqrt{\lambda_2 \cdot \rho_{s2} \cdot c_2}} \cdot \sqrt{\frac{a}{v_2}} \quad (2.73.)$$

Ținând seama că:

$$q_{m1} + q_{m2} = q_m \quad (2.74.)$$

rezultă din ecuațiile 2.73. și 2.74.:

$$\theta_{\max} = A \cdot \frac{q_m}{\sqrt{\lambda_1 \cdot \rho_{s1} \cdot c_1 \sqrt{v_1} + \lambda_2 \cdot \rho_{s2} \cdot c_2 \sqrt{v_2}}} \cdot \sqrt{a} \quad (2.75.)$$

unde indicii 1 și 2 se referă la perechea perie-inel. Dezavantajul constă în faptul că una din ipotezele de bază ale acestei teorii (existența contactului între suprafețe) s-a dovedit numai parțial valabilă o dată cu dezvoltarea teoriei elastohidrodinamice.

Coeficientul de disipare sau de distribuție a fluxului termic β reprezintă raportul între cantitatea de căldură disipată în elementul conducător al cuplei de frecare perie-inel Q_{11} și cantitatea totală de căldură generată prin frecare Q . Dacă se neglijează convecția și radiația de pe aria reală de contact se definește β :

$$\beta = Q_{11} / Q \quad (2.76.)$$

În cazul cuplei de frecare perie-inel rezultă:

$$\beta = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (2.77.)$$

unde λ_1 și λ_2 sunt conductibilitățile termice ale materialelor componentelor cuplei (valori date în tabelul 2.5.).

Dacă nu poate fi neglijat fenomenul convecției, atunci:

$$\beta = 1 - \frac{\sqrt{\pi \cdot \alpha}}{\sqrt{\rho_{S1} \cdot c_1 \cdot v}} \quad (2.78.)$$

unde α este coeficientul de convecție termică [$W/m^2 \cdot ^\circ C$].

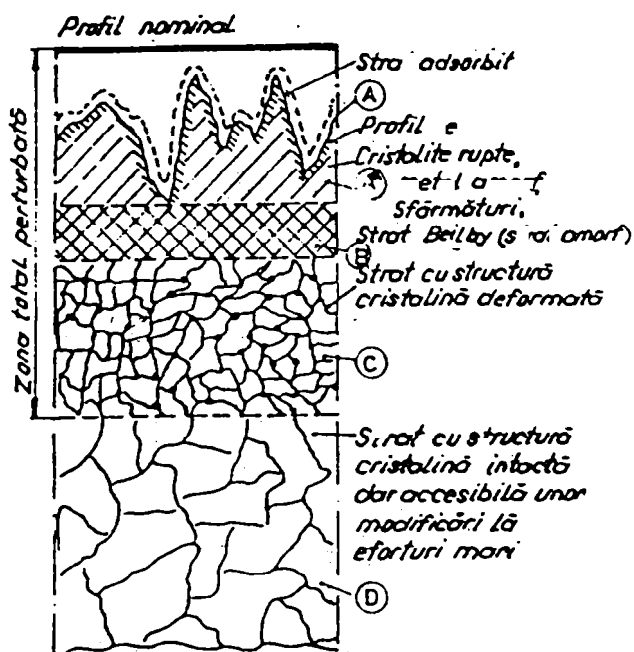
În cazul regimului staționar de frecare se utilizează relația Charron-Vernotte [P2]:

$$\beta = \frac{\rho_{S1} \cdot c_1 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_1}{\rho_{S1} \cdot c_1}}}{\rho_{S1} \cdot c_1 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_1}{\rho_{S1} \cdot c_1}} + \rho_{S2} \cdot c_2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_2}{\rho_{S2} \cdot c_2}}} \quad (2.79.)$$

Studiile sau calculele fenomenelor termice ale frecării trebuie să țină seama de ipotezele privind temperatura la suprafața de frecare și formele de transfer termic. În majoritatea determinărilor analitice se admite că temperatura celor două suprafețe este aceeași. Dar această ipoteză este dificil de verificat experimental și trebuie acceptată cu rezerve. Parametrii care influențează temperatura de frecare sunt în general viteza, sarcina și regimul de ungere. În literatura de specialitate [A3] sunt date valori orientative ale temperaturii maxime admisibile corespunzătoare solicitării termice de lungă durată pentru contactul alunecător din Cu (sau aliat) de $110 \text{ }^\circ C$, respectiv pentru Ag de $120 \text{ }^\circ C$.

2.3. Bazele teoretice ale contactelor electrice alunecătoare din punct de vedere al frecării, uzării și ungerii acestora.

2.3.1. Procesul frecării în cazul contactelor electrice mobile



$$A \in [0.2 \div 0.5] \text{ mm}$$

$$A^* \in [10^{-2} \div 20] \mu\text{m}$$

$$B \in [2 \div 30] \mu\text{m}$$

$$C \in [5 \div 80] \mu\text{m} \text{ la prelucrări îngrijite}$$

$$\in [150 \div 200] \mu\text{m} \text{ la prelucrări grosiere}$$

$$D \in [20 \div 500] \mu\text{m}, \text{ eventual și mai mari}$$

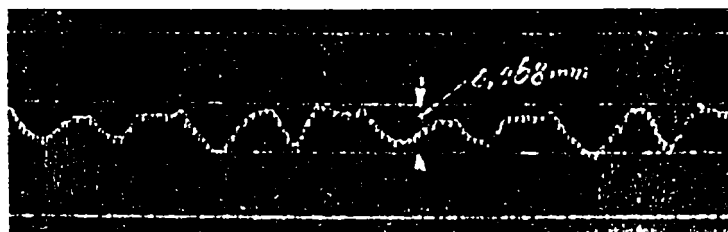


Fig.2.32. Straturile suprafeței de frecare.

Fig.2.33. Suprafața inelului colector.

La solicitarea mecanică a elementelor contactelor electrice mobile transmiterea forței de la un element al cuplei de frecare la celălalt se face prin suprafața de frecare care se caracterizează prin propria microgeometrie (ca aspect dimensional datorită existenței rugozității, prin distribuția și deformarea acesteia).

Între procesul de frecare-uzare și suprafața de frecare apare o intercondiționare cu efecte până la o anumită adâncime a substratului de contact. În figura 2.32. se prezintă un model după Caubet în 4 straturi a suprafeței supuse procesului de frecare-uzare [B1], [V1] iar în figura 2.33. se prezintă diagrama suprafeței reale de contact a unui inel colector [4].

La turații medii se recomandă în literatura de specialitate valori ale rugozității de maximum $50 \mu\text{m}$ iar între inelele colectoare învecinate nu se admit abateri de înălțime mai mari de $[1 - 2] \mu\text{m}$, valorile depinzând în principal de turație, de încărcarea electrică și de numărul inelelor folosite concomitent.

Starea suprafeței inelului colector este esențială în buna funcționare a contactului electric alunecător. Dacă suprafața este foarte lisă poate apare la viteze

medii de lucru o mărire considerabilă a fenomenului frecării iar la viteze mari pot apare fenomene aerodinamice, dispărând efectul peliculei de aderență, respectiv al conducției.

În cazul suprafețelor prea rugoase poate apare uzura (rodajul) la intrarea în funcțiune, acest caz fiind însă mai puțin critic decât cel al suprafeței prea lise. Funcționarea optimă presupune situarea valorilor rugozităților la valori cuprinse între cele 2 cazuri critice enunțate anterior, conform [4] (de circa $[5-8]\mu\text{m}$ cu aspect mat.). În figura 2.34. este redată sub formă de diagrame starea suprafeței inelului colector.

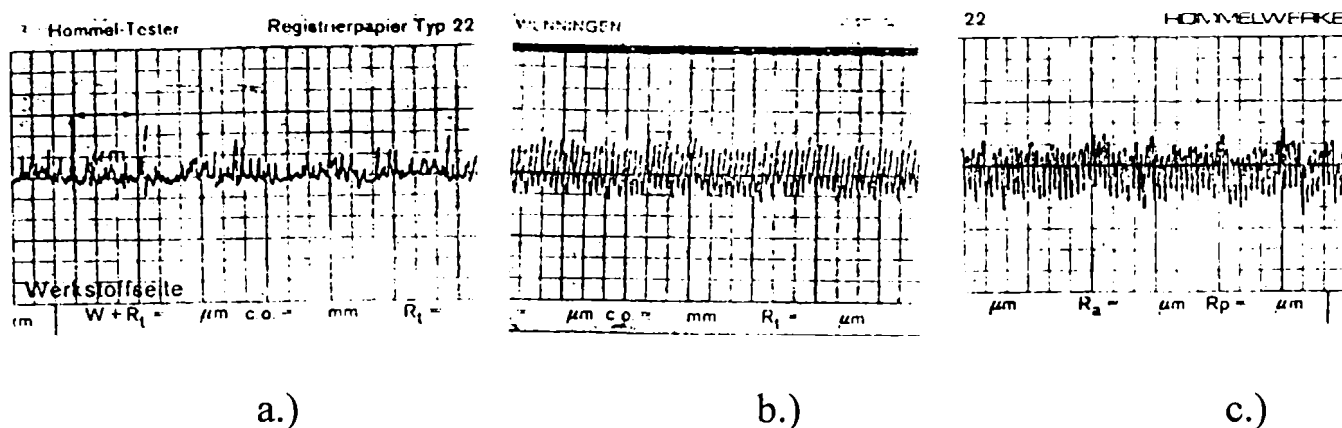
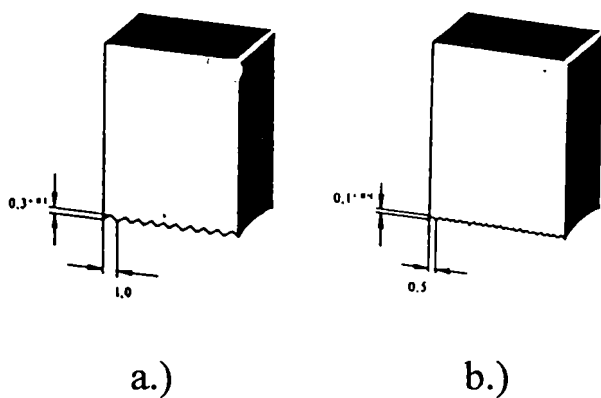


Fig.2.34. Rugozitatea suprafețelor inelelor colectoare

(a.- suprafață șlefuită din Cu, $R_z = 6.4\mu\text{m}$; b.- suprafață strunjită din Cu, $R_z = 5.8\mu\text{m}$; c.-suprafață strunjită din Cu-Sn, $R_z = 6.7\mu\text{m}$).



Starea suprafeței periei colectoare variază în funcție de aplicație și de mărimea geometrică a acesteia (figura 2.35.) [4].

Fig.2.35. Starea suprafeței periei colectoare

(a.- perie de dimensiuni mai mari, $P > 500\text{ W}$; b.- perie de dimensiuni mai mici).

Materialele utilizate în construcția periilor colectoare (în special structura cristalină stratificată a grafitului) au un coeficient de frecare relativ redus. Moleculele depuse din mediul ambiant (de ex. umiditatea aerului) sunt necesare pentru realizarea unei alunecări relativ bune. Fenomenul frecării este influențat și de alți factori, cum ar fi perechile de materiale, presiunea de contact, densitatea

curentului, temperatura, condițiile de funcționare mecanice și termice, turația. Curentul electric contribuie la “ungerea” sistemelor prin modificările fizico-chimice ale suprafețelor pe care le cauzează. Creșterea temperaturii rotorului are ca efect scăderea coeficientului de frecare.

Frecarea este influențată esențial de turația inelului colector.

Efectul aerodinamic, formarea unei perne de aer (suprapresiune la $v > 30$ m/s) se opune presiunii periei la turații crescânde, ducând la scăderea coeficientului de frecare (figura 2.36. a.), respectiv apariția unei depresiuni poate duce la creșterea fenomenului frecării (figura 2.36. b.).

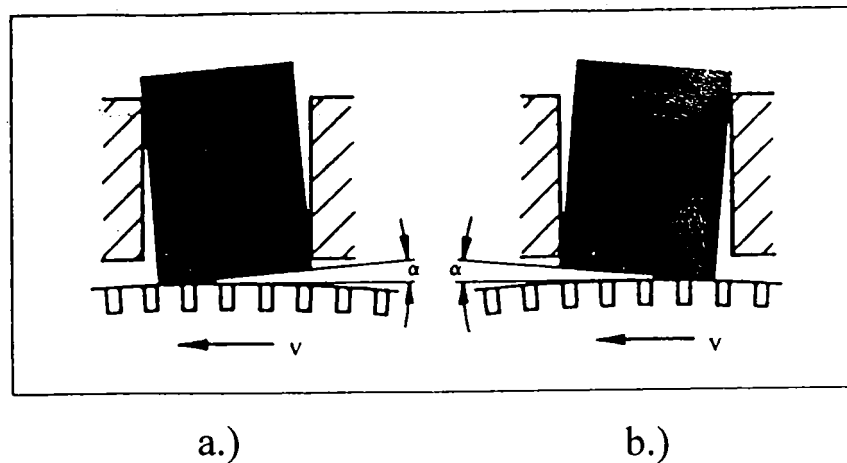


Fig.2.36. Influența turației asupra frecării (a.- suprapresiune; b.- depresiune).

Aria reală de contact A_r reprezintă o cotă parte din aria nominală A_n . Presiunea reală p_r diferă astfel de presiunea medie p_{med} :

$$p_r = F / A_r \neq p_{med} = F / A_n \quad (2.80.)$$

F reprezentand forța normală de contact.

Coeficientul acoperirii reciproce k_n este conform [B1]:

$$k_n = A_{n1} / A_{n2} \quad (2.81.)$$

unde A_{n1}, A_{n2} sunt ariile nominale ale celor două elemente aflate în contact.

Sub acțiunea forței normale asperitățile suprafețelor se deformează elastic, elastoplastic sau plastic funcție de material, de suprafețe, de dimensiunea asperităților și de condițiile de lucru.

Regimul de deformație al asperităților se determină prin indicele de plasticitate Ψ [B1]:

$$\Psi = \frac{K}{HB} \cdot \sqrt{\frac{R_q}{r}} \quad (2.82.)$$

$\Psi < 0.6$ la deformații elastice,

$\Psi \in [0.6 \div 1]$ la deformații elastoplastice,

$\Psi > 1$ la deformații plastice,

unde

$$K = 2 \cdot \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2.83.)$$

reprezintă modulul de elasticitate echivalent al materialelor cuplei de frecare,

E_1, E_2 = modulele de elasticitate ale celor 2 materiale,

ν_1, ν_2 = coeficienții lui Poisson,

HB = duritatea materialului mai moale,

R_q = abaterea medie pătratică a înălțimii asperităților,

$r = l_h^2 / 8h$ = raza asperității,

l_H = lățimea asperității,

h = înălțimea asperității.

Pornind de la două suprafețe rugoase în contact aria reală de contact a materialelor metaloplastice datorată mișcării și forței normale F este determinată de presiunea de curgere p_c , conform legii Bowden-Tabor [B1]:

$$A_r = F / p_c \quad (2.84.)$$

Pe contrapiesă se transferă material de pe elementul mai moale sau poate apare chiar tendința de sudare între cele două suprafețe de contact. Forța necesară forfecării microjoncțiunilor F_{fa} este după Bowden:

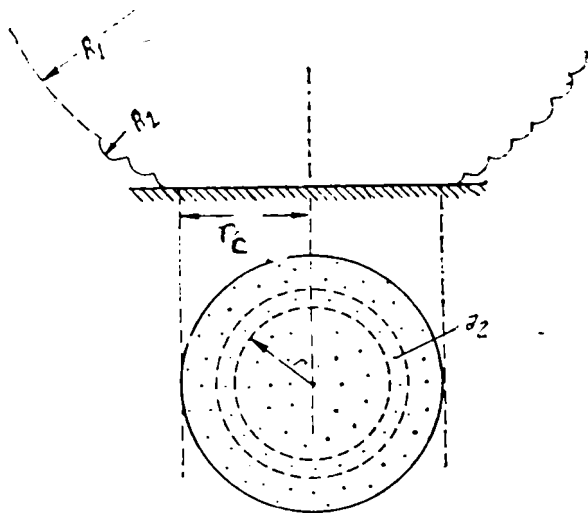
$$F_{fa} = \alpha_1 \cdot A_r \cdot \tau_r \quad (2.85.)$$

cu $\alpha_1 \in (0 \div 1]$ = coeficientul ce are în vedere asperitățile deformate elastic,

τ_r = tensiunea de forfecare a materialului mai moale.

Se poate susține conform [B1] imposibilitatea deformării plastice repetate a asperităților ținându-se seama de mecanismul frecării uscate. Deformarea plastică apare la primele treceri ale elementului mobil. După aceea însă deformarea asperităților în contact trebuie să fie elastică deoarece pentru desprinderea unei particule de uzură este necesar un număr foarte mare de treceri.

Prin introducerea ipotezei contactului elastic multiplu se arată că este posibil să se obțină o dependență aproape liniară a suprafeței reale de contact de forța de apăsare.



Considerând contactul între o suprafață sferică cu raza R_1 acoperită de asperități sferice uniform distribuite de rază R_2 și o suprafață plană se poate obține un exponent al forței de apăsare apropiat de unitate, conform figurii 2.37..

Fig. 2.37. Modelul contactului multiplu.

Presupunând sfera cu raza R_1 netedă, sarcina dF_e suportată la deformare elastică de un inel de raza r și lățime dr va fi:

$$dF_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{F^{\frac{1}{3}}}{k_1} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (2.86.)$$

unde

F - sarcina,

r_c - raza petei de contact,

k_1 - constantă.

Dacă $R_2 \ll R_1$ prezența celor m asperități cu rază R_2 uniform distribuite nu va afecta starea de tensiune în sfera cu rază R_1 . Sarcina p suportată de o asperitate din inelul de rază r este atunci:

$$p = \frac{dF_e}{q} = \frac{2 \cdot F^{\frac{1}{3}}}{3 \cdot m \cdot k_1} \left(1 - \frac{r^2}{r_c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.87.)$$

unde

$q = 2\pi \cdot m \cdot r \cdot dr$ reprezintă numărul de asperități din inelul cu raza r .

Aria de contact a unei asperități va fi:

$$a = k \cdot p^{\frac{2}{3}} = k \cdot \left(\frac{2}{3 \cdot m \cdot k_1} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot F^{\frac{2}{9}} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_c^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.88.)$$

iar aria de contact din inelul de rază r va fi $(q \cdot a)$.

Aria totală de contact este:

$$A = \int_{r=0}^{r=b} q \cdot a \quad (2.89.)$$

Prin integrare se obține:

$$A = k_2 \cdot F^{\frac{8}{9}} \quad (2.90.)$$

dependența aproape liniară a ariei de contact de sarcină în cazul deformației elastice.

Divizarea în continuare a asperităților cu rază R_2 în asperități cu rază R_3 ($R_3 \ll R_2$) adică mărirea numărului de contacte conduce la mărirea exponentului forței de apăsare, fără ca acesta să depășească unitatea. Deci prin creșterea forței de apăsare suprafața de contact crește în special prin creșterea numărului de contacte și nu prin creșterea suprafeței contactelor.

Coeficientul de frecare f este conform legii Amontons-Coulomb [B1]:

$$f = F_{fa} / F = \alpha_1 \cdot \tau_r / p_c \quad (2.91.)$$

Notând cu α_2 raportul p_c / p_r și înlocuind pe p_c se obține:

$$f = \alpha_1 \cdot \tau_r / \alpha_2 \cdot p_r \cong 0.6 \cdot \alpha_1 / \alpha_2 \quad (2.92.)$$

unde α_1 și α_2 sunt factori de material.

Din această relație se deduce că coeficientul de frecare f variază puțin cu materialul.

Frecarea este însoțită de diferite alte fenomene cum ar fi: oxidarea, sulfatarea, încălzirea, uzarea electrotribochimică.

Forța de frecare F_f poate fi determinată ținându-se seama și de constanta de gripaj A_g :

$$F_f = A_g + f \cdot F \quad (2.93.)$$

Coeficientul de frecare f se determină conform relației:

$$f = \tau_r / HB + \operatorname{tg} \theta_u + f_m \quad (2.94.)$$

unde τ_r = tensiunea de rupere a microjoncțiunilor,

HB = duritatea suprafeței mai moi,

θ_u = unghiul dintre planul ariei reale de contact A_r și forța de frecare F_f ,

$f_m = F_m / F$ = componenta care ține cont de forța necesară pentru îndepărtarea materialului mai moale F_m și de forța normală de contact F .

Kraghelski consideră că coeficientul de frecare f se compune dintr-un coeficient de frecare de adeziune f_{ad} și dintr-un coeficient de frecare de deformare f_{def} :

$$f = f_{ad} + f_{def} \quad (2.95.)$$

$$f_{ad} = \tau_f \cdot A_r / F + (\tau_{ad} - \tau_f) / p_r = \tau_f / p_r + \beta \quad (2.96.)$$

unde

$\beta = (\tau_{ad} - \tau_f) / p_r$ = piezocoeficient,

$\tau_{ad} = F_{tad} / A_r$ = tensiunea tangențială de adeziune,

F_{tad} = forța tangențială de adeziune,

τ_f = tensiunea de forfecare a microsudurilor,

$$f_{def} = K_\alpha \cdot \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (2.97.)$$

$K_\alpha = 0.55$ = factor al deformației plastice,

$K_\alpha = 0.19 \alpha_H$ = factor al deformației elastice,

α_H = coeficient de histereză.

Determinarea coeficientului de frecare f pe baza teoriilor energetice are la bază stabilirea energiei de frecare mecanică W_R . Forța de frecare F_f este:

$$F_f = W_R / S_R \quad (2.98.)$$

unde S_R reprezintă lungimea de frecare.

$$f = F_f / F = W_R / (F \cdot S_R) \quad (2.99.)$$

Ca urmare a frecării de alunecare în prezența sarcinii o bună parte din energia consumată pentru învingerea frecării se transformă în căldură și se elimină prin conducție, convecție sau radiație. Producerea căldurii prin deformare elastică sau plastică a stratului superficial determină un gradient mare de temperatură în direcția

normală pe suprafață. Determinarea experimentală a acestei mărimi este de regulă foarte dificilă. Atingerea are loc numai pe aria reală de contact și disiparea energiei termice depinde de mediu, de proprietățile cuplului de materiale, de viteza de lucru și de sarcină. Transmiterea căldurii se face după normala la suprafața reală de contact de la temperatura mai mare către temperatura mai scăzută.

In tabelul 2.6. se prezintă principalii parametri termofizici ai unor materiale [P2]:

Tabelul 2.6.

<i>material</i>	λ [W/m °C]	c [J/kg °C]	ρ [kg/m ³]	E [10 ⁵ MPa]
Cu	380	0.378	8500	1.24
OLC 15	56	0.071	7800	2.1
grafit	160	0.904	2100	-
aliaj Cr-Ni	15	0.072	7800	2.1
aliaj Cu-Al	107	0.41	8650	1.1
aliaj Cu-Sn	60	0.57	8800	1.1

Pierderile energetice P_R se pot exprima matematic după cum urmează [4]:

$$P_R = f \cdot p \cdot A \cdot v \quad [W] \quad (2.100.)$$

- unde f = coeficientul de frecare [-],
- p = presiunea specifică a periei [MPa],
- A = suprafața de contact a periei [mm²],
- v = viteza periferică a inelului colector [m/s].

Modelul instalației pentru încercări la frecare-uzare corespunzător perechii perie- inel colector înaintea apariției uzării periei este cel de tip Timken, la care cupla de frecare superioară cilindru-plan de clasa a II-a cu contact liniar este formată din perechea bușă cilindrică în mișcare de rotație și o piesă plană iar cel corespunzător periei uzate este de tip Amsler și de tip doi saboți la care cupla de frecare inferioară de clasa a III-a este cu contact de suprafață (figura 2.38.).

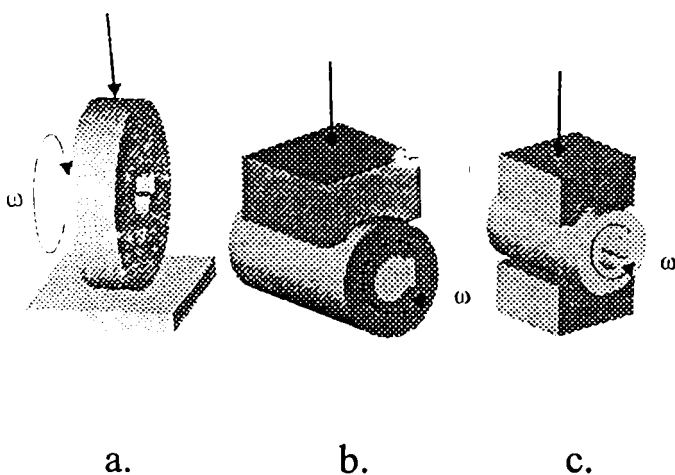


Fig. 2.38. Cupla de frecare de tip a.- Timken, b.- Amsler respectiv c.- tip doi saboți [Ș1].

2.3.2. Bazele teoretice ale contactelor mobile electromecanice din punct de vedere al uzării și ungerii acestora

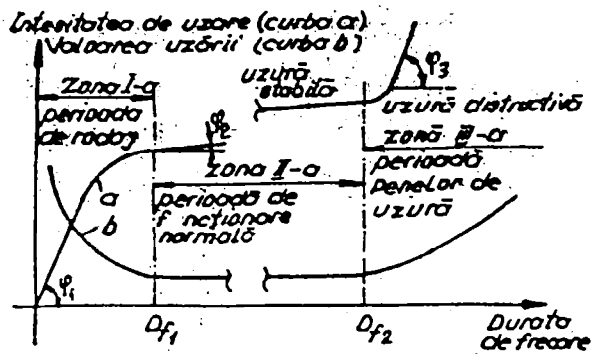


Fig. 2.39. Procesul de uzare

Uzarea contactelor electrice mobile, pierderea nedorită și progresivă de material (deteriorarea suprafețelor cuplei de frecare) sunt consecința proceselor tribologice prin modificarea stării inițiale a celor două suprafețe de frecare.

Procesul de uzare poate fi împărțit în 3 zone (conform figurii 2.39.) [B1]:

Conform teoriei lui Barwell uzarea poate fi de aderență, de abraziune, de oboseală și de coroziune. Practic diversele forme de uzare apar concomitent și se condiționează reciproc. În procesele de uzare intervin fenomene mecanice, termofizice și chimice.

Uzarea de adeziune are ca efecte transferul de material, formarea și ruperea microjoncțiunilor (microsudurilor). Forța de frecare se datorează forfecării microsudurilor suprafețelor în frecare.

Conform teoriei Bowden - Tabor [P2], [B4], admitând sudarea unor asperități în contact, τ_1 și τ_2 fiind eforturile unitare la forfecare ale materialelor celor două suprafețe și τ_s efortul la forfecare al microsudurilor pot avea loc situațiile:

- ◆ dacă $\tau_2 \dots \tau_s < \tau_1$ (figura 2.40.- II) ruperea va avea loc în interiorul corpului mai moale, respectiv perie. Se produce un transport de material de pe peria 2 pe inelul 1 iar după un interval de timp frecarea se produce numai între materialul periei (frecare prin sudură). Microjoncțiunile prinse pe suprafața inelului provoacă rizuri pe suprafața periei și particule abrazive care se rup.
- ◆ dacă τ_1 și $\tau_2 < \tau_s$ pentru producerea mișcării se presupune ruperea corpului mai moale, respectiv a materialului periei. Poate însă să apară un transport de material de pe inel pe perie (frecare prin sudură).
- ◆ dacă $\tau_s < \tau_1$ și τ_2 (figura 2.40. III) vor ceda microsudurile fără smulgere și fără transport de material de pe suprafețele periei și inelului (frecare prin forfecare).

În general s-a constatat că orice microsuprafață trebuie să fie solicitată de mai multe ori pentru a se deteriora.

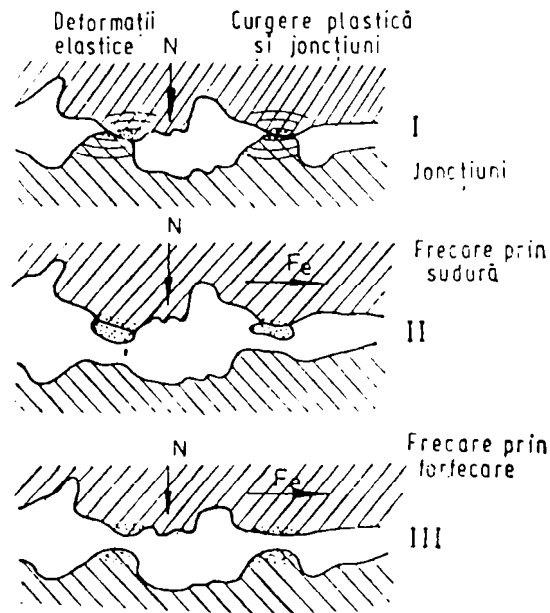


Fig. 2.40. Formarea microjonctiunii (I) și forfecarea acesteia (II și III) [P2].

Coeficientul de adeziune γ este raportul dintre forța necesară pentru a rupe adeziunea creată între două suprafețe de frecare și a le desprinde N' și forța normală de încărcare a cuplei de frecare F [S3]:

$$\gamma = N' / F \quad (2.101.)$$

De exemplu pentru cupla de frecare Cu / Cu coeficientul variază între $[0.18 \div 6]$. Diferența dintre valoarea maximă și medie a lui γ caracterizează tendința de adeziune a materialului sau a perechii de materiale diferite.

Volumul de material uzat prin adeziune U_v se poate calcula (calitativ) cu relația:

$$U_v = k_U \cdot F \cdot v \cdot D_f / 3 \quad p_{Cu} = k_U \cdot F \cdot L_f / HB = k_C \cdot F \cdot L_f \quad [mm^3] \quad (2.102.)$$

unde

$k_U, k_C = k_U / HB =$ coeficienți de uzare,

$p_{Cu} \cong HB / 3 =$ presiunea de curgere,

$HB =$ duritatea materialului mai moale,

$v, D_f, L_f =$ viteza, durata, lungimea de frecare,

$F =$ forța normală. Intensitatea volumetrică a uzării este:

$$I_{uv} = U_v / L_f = k_C \cdot F \quad [mm^3/km] \quad (2.103.)$$

Cantitativ volumul de material uzat se exprimă prin relația:

$$U_V = k_U \cdot F_f \cdot L_f / 3 \tau_f \quad [\text{mm}^3] \quad (2.104.)$$

Pe baza energiei de adeziune între suprafețele cuplei, Rabinovicz propune un mod de calcul al dimensiunii particulei de uzură. Dacă în momentul contactului între o asperitate sferică a suprafeței cu duritate mai mică și suprafața netedă a contrapiesei cu duritate mai mare apare deformarea plastică, atunci deformarea elastică în zona de contact va atinge valoarea ε_{\max} . Concomitent va apare și o deformare tangențială $\nu \cdot \varepsilon_{\max}$ unde ν este coeficientul lui Poisson.

Energia de deformare elastică a asperității E_v de diametru d va fi:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot \nu^2 \cdot \varepsilon_{\max}^2 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{12} \quad (2.105.)$$

iar energia superficială a particulei E_s considerând că întreaga suprafață a asperității sferice este în contact cu suprafața mai dură este:

$$E_s = E_{1,2} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.106.)$$

unde $E_{1,2}$ este energia de adeziune între suprafețele 1 și 2.

Pentru ca particula de uzură cu diametrul d să se poată forma este necesar ca:

$$E_v \geq E_s \quad (2.107.)$$

Cu ajutorul relațiilor 2.107., 2.106. și 2.105. se deduce diametrul particulei de uzură. Pentru metalele uzuale cu $\varepsilon_{\max} \cdot E = \text{HB} / 3$ diametrul mediu al particulei va fi:

$$d \geq 60000 \cdot E_{1,2} / \text{HB} \quad (2.108.)$$

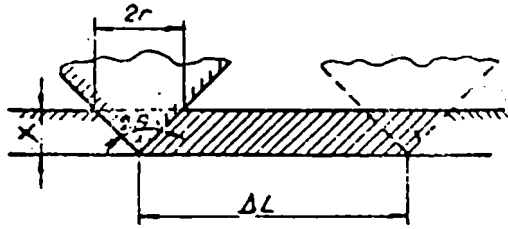
unde

HB - duritatea materialului mai moale.

Relația 2.108. este valabilă atât pentru frecarea uscată cât și în prezența lubrifiantului.

Uzarea abrazivă, procesul de degradare intensă a suprafețelor solide supuse frecării se produce prin acțiunea de așchiere respectiv zgâriere produsă de particule abrazive datorate procesului în sine sau / și exterioare acestuia. Formele de

manifestare a abraziunii sunt microzgârieri, microaşchieri, deformări plastice ale suprafeţelor de frecare.



Calculul uzării abrazive se face prin modelul lui Rabinovicz, conform căruia particula abrazivă se asimilează unui penetrator conic (figura 2.41.)

[B1]. Forța normală va fi:

$$F = 1/2 \pi \cdot HB \cdot x^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \vartheta \quad (2.109.)$$

Fig. 2.41. Modelul matematic al uzării de abraziune.

Volumul de material îndepărtat ΔV va fi:

$$\Delta V = x^2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta \cdot \Delta L \quad \text{sau} \quad \Delta V / \Delta L = x^2 \cdot \operatorname{tg} \vartheta \quad (2.110.)$$

Inlocuind relația 2.109. în relația 2.110. se obține:

$$\Delta V / \Delta L = 2 F / \pi \cdot HB \cdot \operatorname{tg} \vartheta = K \cdot F / HB \quad (2.111.)$$

unde

$$K = 2 / \pi \cdot \operatorname{tg} \vartheta \quad (2.112.)$$

Adâncimea de uzură prin abraziune h este:

$$h = K_1 \cdot p_m \cdot L_f / HB \quad (2.113.)$$

unde p_m = presiunea medie.

Intensitatea de uzare liniară I_h (relația Hruşcirov-Babicev) este:

$$I_h = h / L_f = K_1 \cdot p_m / HB \quad (2.114.)$$

Principalii factori care influențează uzarea prin abraziune sunt natura materialelor și factorii funcționali (sarcina, viteza, timpul, mediul de lucru).

Teoria energetică a uzării de abraziune oferă o serie de ecuații de bilanț energetic bazate pe dependența dintre procesul de uzare și energia consumată [B6], [K3].

Densitatea aparentă a energiei de frecare e_R^* este:

$$e_R^* = \tau \cdot s_R \cdot A_n / V_v \quad (2.115.)$$

unde

$\tau = f \cdot p$ - tensiunea medie de forfecare a asperităților (f - coeficientul de frecare, p - presiunea medie de strivire),
 s_R - suprafața de frecare,
 A_n - aria nominală de contact,
 V_v - volumul de material îndepărtat.

Densitatea aparentă a energiei de frecare reprezintă o măsură a nivelului energetic critic al procesului de uzare.

Determinarea matematică a acestei mărimi se face după cum urmează:

$$e_R^* = e_B \frac{n}{v^* [\zeta_R \cdot (n-1) + 1]} \quad (2.116.)$$

unde

$e_B = e_B / (10^3 \div 10^4)$ - densitatea medie a energiei de rupere a asperităților (e_B - densitatea reală a energiei de rupere determinată experimental),

$n = f(p_r)$ - numărul critic de puncte de contact până în momentul îndepărtării de material prin abraziune (determinat pe baza curbei Wöhler), p_r - presiunea reală de contact,

v^* - factorul uzării (determinat experimental prin analiza metalografică a particulelor desprinse),

ζ_R - factorul de acumulare a energiei (definește cota parte a energiei datorată fenomenului de histeresis. Se determină experimental în cazul deformărilor elastice ($\zeta_{Re} \in [10^{-5} \div 10^{-8}]$) și plastice ($\zeta_{Rp} \in [10^{-3} \div 10^{-6}]$)).

Intensitatea de uzare liniară se mai poate exprima și sub forma:

$$I_h = \frac{V_v}{A_n \cdot s_R} \quad (2.117.)$$

Inlocuind relația 2.117. în 2.115. se obține:

$$e_R^* = \tau / I_h \quad (2.118.)$$

Ecuatia energetică fundamentală a intensității de uzare liniară va fi:

$$I_h = \tau / e_R^* \quad (2.119.)$$

Introducând relația 2.116. în 2.119. rezultă:

$$I_h = \frac{\tau \cdot v^* [\zeta_R \cdot (n-1) + 1]}{e_B \cdot n} \quad (2.120.)$$

In cazul procesului de abraziune dacă se consideră $n \approx 1$:

$$I_h = \tau \cdot v^* / e_B \quad (2.121.)$$

sau pentru $n \gg 1$:

$$I_h = \frac{\tau \cdot v^* \cdot \left(\zeta_R + \frac{1}{n}\right)}{e_B} \quad (2.122.)$$

Dacă se  ine seama de gradul de acoperire k_n dintre perechea de piese care formează cupla de frecare, atunci:

$$I_h = I_{h1} + k_n \cdot I_{h2} \quad (2.123.)$$

unde

I_{h1} reprezintă valoarea intensităţii liniare de uzare a periei  i I_{h2} reprezintă valoarea intensităţii liniare de uzare a inelului. In tabelul 2.7. se prezintă valoarea densităţii aparente a energiei de frecare.

Tabelul 2.7.

<i>densitatea aparentă a energiei de frecare</i> e_R [MPa]	<i>cupla de frecare</i>	<i>tensiunea de forfecare a microasperit�ţilor</i> $\tau = f \cdot p$ [MPa]	<i>intensitatea de uzare liniară</i> I_h
10^{12}	perii grafitate- inel alunecător grafitat	$0.1 = 0.01 \cdot 10$	10^{-13}

Uzarea de oboseală superficială se produce când acționează o for  ciclic alternativă care se transmite pe suprafa  urmată de deformații plastice în re eaua atomică a stratului superficial. Ca efecte ale acestora pot apare fenomene de pitting (ciupire), fisuri, exfoliere sau cavitație. Principalii factori care influențează apariția ciupiturilor sunt: v scozitatea lubrifiantului folosit, duritatea suprafe elor de frecare (recomandată în literatura de specialitate ca fiind pentru contacte alunecătoare de

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

$HB_2 = 0.852 \cdot HB_1$), temperatura de funcționare, rugozitatea suprafețelor și viteza de funcționare.

Metoda de calcul a uzurii de oboseală foarte mici a suprafeței de contact (uzare zero) are la bază relația [B2]:

$$\tau_{\max} \leq \gamma'_R \cdot \tau_c \quad (2.124.)$$

unde

τ_{\max} - efortul unitar tangențial maxim ce apare în apropierea suprafeței de contact,
 γ'_R - coeficient adimensional de uzură ce depinde de parametrii principali ai cuplei de frecare (sarcină, materiale, condiții de frecare, lubrifianț, turație),
 τ_c - efortul unitar de curgere la forfecare al materialului.

După numărul de rotații n se determină empiric:

$$\gamma'_R = (2000 / n)^{1/9} \cdot \gamma_R \quad (2.125.)$$

unde

se determină experimental coeficientul γ_R corespunzător $n_T = 2000$ rotații.

Dar

$$\tau_{\max}^9 \cdot n \approx \tau_{\max T}^9 \cdot n_T \quad (2.126.)$$

sau

$$\tau_{\max} \approx (n_T / n)^{1/9} \cdot \tau_{\max T} \quad (2.126'.)$$

respectiv înlocuind γ'_R în 2.124.:

$$\tau_{\max} \leq (2000 / n)^{1/9} \cdot \gamma_R \cdot \tau_c \quad (2.127.)$$

relație care permite obținerea factorului γ_R pentru diferite combinații de materiale și lubrifianți, determinarea τ_{\max} și τ_c precum și stabilirea materialelor fiecărui element al cuplei. Funcție de dimensiunile contactului, geometria cuplei de frecare și felul mișcării se poate determina n respectiv durata normală de funcționare a cuplei de frecare pentru ca să nu se depășească gradul de uzură preconizat. În cazul nerespectării inegalității 2.127. va apare un grad de uzură mai mare decât cel admis înainte de atingerea duratei de funcționare stabilite. Coeficientul de uzură γ_R este prezentat în tabelul 2.8.[P2].

Dacă pe suprafața de frecare există straturi subțiri durificate sau straturi depuse se poate utiliza $\gamma_R = 0.54$.

Tabelul 2.8.

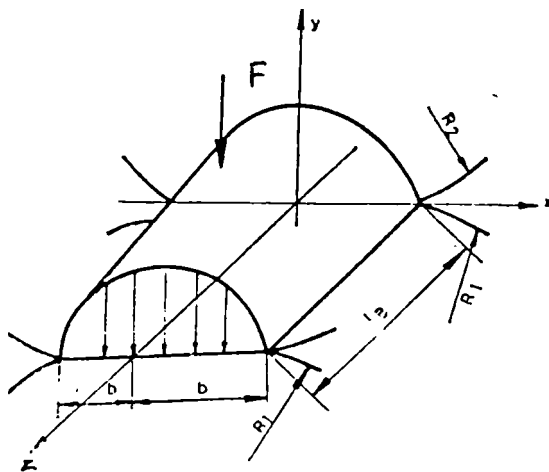
tipul frecării	coeficientul de uzură γ/R	observații
frecare uscată	0.2 și 0.54	valoarea inferioară dacă se manifestă o tendință mai mare de transfer de material
frecare limită	0.2 și 0.54	-"-

Experimentele făcute cu instalații de încercat la uzură pentru valori ale lui n de ordinul zecilor de milioane au arătat că relația 2.127. este valabilă pentru frecarea de alunecare și permite determinarea valorii lui τ_{\max} pentru un număr $n > n_T$ și pentru gradul de uzură arătat mai sus.

În cazul contactului liniar se recomandă conform [P2] relația:

$$\tau_{\max} \approx K_a \cdot p_{\max} \cdot \left(\frac{1+f}{2} \right) \quad (2.128.)$$

unde p_{\max} reprezintă efortul unitar maxim de compresiune dintre cele două piese ale cuplei de frecare (pentru valori relativ reduse) iar f reprezintă coeficientul de frecare.



Relația conține un coeficient $K_a > 1$ de concentrație a tensiunilor datorat formei marginilor piesei cu o suprafață mai mică a cuplei de frecare (peria) și care ar afecta suprafața de frecare.

Determinarea efortului maxim de compresiune p_{\max} pentru contacte liniare și de suprafață este prezentată conform [P3] în tabelul 2.9 pentru un coeficient de frecare $f = 0.3$ (figura 2.42.).

Fig. 2.42. Forma suprafeței de contact și distribuția presiunilor în cazul contactului liniar.

În relațiile ce privesc cuplele de frecare cu contact liniar sau de suprafață coeficientul K_a exprimă așa-numitul efect de muchie. Valoarea sa depinde de forma colțurilor și marginilor periei și poate varia cu câteva ordine de mărime. Pentru raze mai mari de racordare s-a stabilit experimental [B2] valoarea $K_a = 2 \dots 3$ iar pentru muchii ascuțite se poate atinge valoarea $K_a = 1000$.

Tabelul 2.9.

contact	suprafața de contact	τ_{max}	adâncimea (lui τ_{max}) y'	p_{max}
liniar	o fâșie	$0.3 p_{max}$	$0.786 b$	$\frac{N'}{\pi \cdot b}$ ($N' = F / \text{mm}$)

În cazul existenței unui strat de peliculă disturbatoare pe suprafața de frecare se aplică aceleași relații de mai sus dacă grosimea minimă a stratului superficial $h_{min} \leq 0.125 \text{ mm}$ în cazul contactului de suprafață [P2]. Dacă condiția nu este îndeplinită, în calculul de uzare se va lua în considerare și materialul de bază al stratului peliculei, caz în care se aplică stratului și substratului pentru aceleași valori F și τ_{max} relația 2.132..

Pentru verificarea unui anumit tip de cuplă de frecare la condiția de uzură minimă impusă (fără determinarea lui τ_{max}) se pot utiliza valorile sarcinilor admisibile F_{a1} și F_{a2} pentru perie respectiv inel [P2]. Dacă una din aceste valori va fi mai mică decât sarcina F , atunci nu se va asigura criteriul de uzare minimă propus. Se va examina în expresia sarcinii admisibile care parametru poate fi modificat pentru obținerea celei mai mari creșteri a valorii acesteia.

Relațiile de calcul ale sarcinii admisibile $F_{a1,2}$ sunt prezentate în continuare.

- *cilindru / plan* (cilindru de rază R_1 în mișcare de rotație pe plan fix):

$$F_{a1} = 27.39 \cdot (K_1 + K_2) \cdot L \cdot R_1 \cdot \left[\frac{\gamma_R \cdot \tau_{c1}}{K_a \cdot (1+f)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{x \cdot y \cdot n_r} \right)^{\frac{2}{9}} \quad (2.129.)$$

$$F_{a2} = 32.07 \cdot (K_1 + K_2)^{\frac{5}{4}} \cdot L \cdot R_1 \cdot \left[\frac{\gamma_R \cdot \tau_{c2}}{K_a \cdot (1+f)} \right]^{\frac{9}{4}} \cdot \left(\frac{1}{x \cdot y \cdot n_r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.130.)$$

$\cos \psi = 1$, a - raza de curbură a muchiiilor periei, L - lungimea periei,

$$K_a = \left(1 + \frac{R_1}{a} \right) \cdot \left(\frac{2}{n_1 \cdot n_2} \right) \quad (2.131.)$$

$$\text{Constantele} \quad K_{1,2} = (1 - \nu_{1,2}^2) / E_{1,2} \quad (2.132.)$$

unde $\nu_{1,2}$ sunt coeficienții Poisson respectiv $E_{1,2}$ sunt modulele de elasticitate ale materialelor cuplei, γ_R este coeficientul de uzare (tabelul 2.8.) iar $\tau_{c1,2}$ se determină din diagrama din figura 2.43.

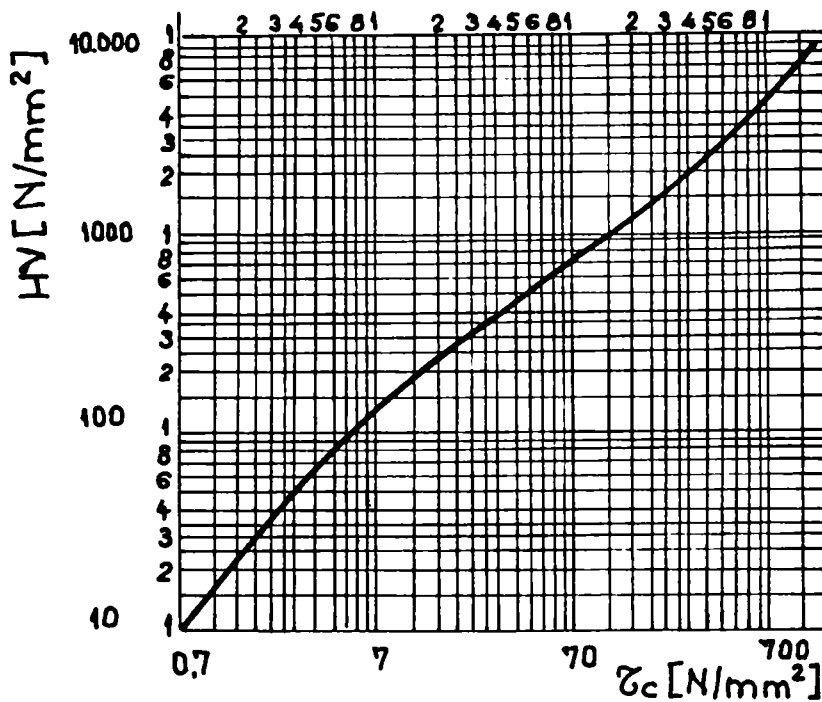


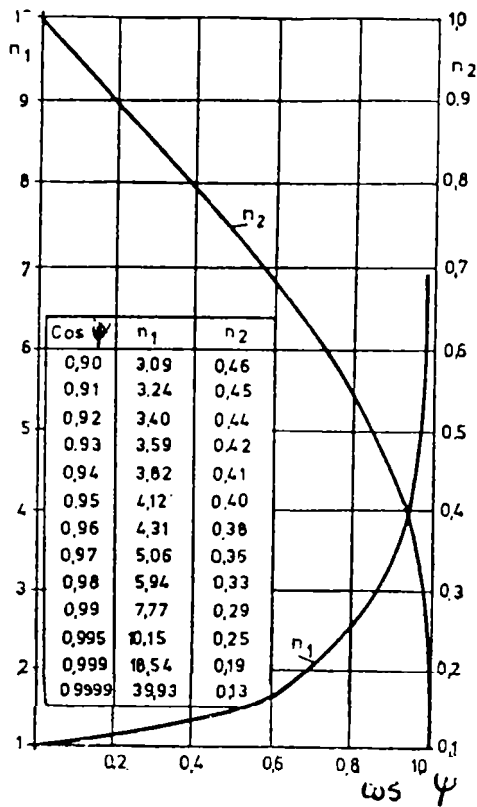
Fig. 2.43. Diagrama duritate HV funcție de efortul unitar de curgere la forfecare τ_c , conform [P2].

Coeficienții $n_{1,2}$ ai geometriei corpurilor de contact sunt dați în funcție de $\cos \psi$ (care este dependent de razele principale de curbură ale celor două corpuri în zonele de contact și de unghiul dintre planele principale de curbură, cele în care apar raze de curbură maxime) în figura 2.44.

- *sabot / cilindru* (cilindru în rotație R_2 pe sabot R_1 , $R_1 = R_2 = R$, $\alpha \leq 180^\circ$ pentru sabot tronconic, a - raza de racordare a muchiiilor, L - lungimea generatoarei comune).

$$F_{a_1} = 1.535 \cdot a^{\frac{1}{9}} \cdot \left(\frac{R \cdot L \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{K_a} \right) \cdot \left[\frac{\gamma_R \cdot \tau_{c_1}}{(0.25 + f^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \cdot \left(\frac{1}{x \cdot y \cdot n_r} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (2.133.)$$

$$F_{a_2} = 2.953 \cdot \left(\frac{R \cdot L \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{K_a} \right) \cdot \left[\frac{\gamma_R \cdot \tau_{c_2}}{(0.25 + f^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \cdot \left(\frac{1}{x \cdot y \cdot n_r} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (2.134.)$$



f reprezintă coeficientul de frecare al cuplei, x este timpul de funcționare al cuplei în ore / lună, y este durata de funcționare în luni iar n_r reprezintă numărul de rotații al inelului.

Fig. 2.44. Coeficienții n_{1,2} funcție de cos ψ [P2].

În cazul în care nu este respectată inegalitatea $F_{a1,2} > F$ se pot aduce anumite îmbunătățiri de natură tribologică perechii de materiale aflate în contact cum ar fi: mărirea razei de racordare, îmbunătățirea condițiilor de ungere, mărirea lungimii de contact sau în ultimă instanță reducerea corespunzătoare a sarcinii.

Rezultatele obținute conform [H1] presupun un model cu două suprafețe, având rugozitățile sferice rigide N_u și N_L uniform distribuite de înălțime z în mișcare de alunecare pe o distanță L_f sub sarcina F. Volumul particulei este dependent de sarcină, care condiționează adâncimea la care apare efortul unitar maxim de forfecare și respectiv mărimea acestuia. Pentru o singură deplasare a unei asperități de pe suprafața superioară s-a ajuns la o relație de forma:

$$\frac{V_u}{L_f} = K \cdot \frac{N}{HB_1} \tag{2.135.}$$

unde

- V_u - volumul de material uzat de pe suprafața inferioară,
- HB_1 - duritatea inițială a suprafeței inferioare de lungime L_f ,
- K – factor ce se determină cu relația 2.136.:

$$K = \frac{0.001^n \cdot \eta \cdot \gamma}{\pi \cdot \sigma_r^m} \cdot \frac{(\sigma \cdot \lambda)^{\frac{t-n+m-2}{2}}}{a \cdot \frac{2+m-n+t}{2}} \cdot \left(\frac{C}{\pi \cdot B \cdot c} \right)^{\frac{m+t}{n-1}} \cdot \frac{\left(\frac{m+t}{2} \right)}{\left(1 + \frac{n}{2} \right)} ! \quad (2.136.)$$

cu

n - indicele care definește durificarea în urma frecării,

m - constanta de oboseală,

η - densitatea de distribuție a asperităților,

γ, t - constantele ce definesc mărimea particulei de uzură,

σ_r - efortul unitar de rupere,

σ - abaterea standard a distribuției,

λ - constanta ce definește mărimea unui singur contact,

a - raza asperității,

C - constanta ce definește relația sarcină - suprafață reală,

c - constanta ce definește efortul unitar de compresiune,

B - mărimea efortului unitar de curgere.

Relația 2.141. constituie un exemplu de complexitate a coeficientului de uzură și de dificultate de modelare și calcul a acestuia. Dacă nu s-ar fi putut obține conform 2.140. proporționalitatea lui V_u cu distanța L_f și sarcina F și invers proporționalitatea cu duritatea inițială HB_1 ar fi fost dificilă explicarea mecanismului de oboseală al uzurii care este justificat experimental și a stat la baza modelului considerat. În multe cazuri efortul de forfecare la suprafață este mai mic față de sarcinile normale.

Uzarea corozivă, deteriorarea suprafețelor de contact se datorează acțiunii factorilor chimici agresivi și presupune corelarea unor efecte multiple cum ar fi cele electrice, mecanice, chimice (efectul electrotribochimic).

Acceptând unele simplificări impuse de complexitatea proceselor de oxidare și uzare se poate deduce o relație a vitezei de uzare funcție de solicitare și de caracteristicile materialului [Q1].

Ipotezele avute în vedere sunt:

- ◆ temperatura determinată în procesul de oxidare este temperatura de volum a corpului,
- ◆ la o anumită grosime a stratului de oxid acesta se desprinde devenind particula de uzură,
- ◆ procesul de oxidare și uzare are loc pe vârful asperităților iar particulele de uzare sunt de dimensiuni mici.

Grosimea stratului de oxid h are expresia:

$$h = C \cdot \ln\left(\frac{t}{B} + 1\right) \quad (2.137.)$$

unde

C - coeficient dependent de temperatură,

t - timp,

B - constantă de material.

Dependența de temperatură a coeficientului C este o relație de tip Arrhenius:

$$C = C_0 \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \theta_v}} \quad (2.138.)$$

și înlocuind în relația 2.134.:

$$h = \frac{C_0}{B} \cdot t \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \theta_v}} \quad (2.139.)$$

unde

C₀ - constantă,

Q - căldura de activare,

R - constanta gazelor perfecte,

θ_v - temperatura de volum.

Grosimea la care are loc desprinderea particulei de oxid este h_c, corespunzător timpului t_c. Volumul materialului uzat V_c în timpul t_c este:

$$V_c = A \cdot h_c \quad (2.140.)$$

unde

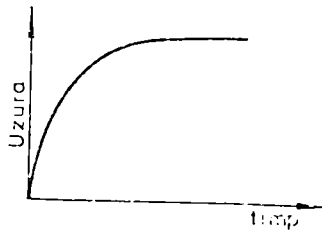
A = F / HB - aria reală de contact în cazul contactului plastic (F - sarcina, HB - duritatea materialului mai moale).

Din relația 2.139. rezultă expresia vitezei medii de uzare v_{um} funcție de proprietățile de material HB, C₀, B, Q și regimul de funcționare al cuplei de frecare respectiv sarcina F, viteza de alunecare și coeficientul de frecare:

$$v_{um} = \frac{h_c \cdot A}{t_c} = \frac{F \cdot C_0}{B \cdot HB} \cdot e^{-\frac{Q}{R \cdot \theta_v}} \quad (2.141.)$$

Evoluția parabolică (figura 2.45.) indică formarea unui strat (film) de reacție aderent cu caracter de protecție pe suprafața cuplei de frecare (pelicula disturbatoare). Prin solicitări mecanice acest strat de suprafață este deteriorat,

accelerându-se astfel coroziunea și uzarea. Stratul de protecție creat inițial ajuns la o anumită grosime se rupe și se reface (figura 2.46. a.). Uzarea suprafeței metalice evoluează aleator (figura 2.46. b.) prin efectul uzării electrotribochimice [P2]. Uzarea de coroziune electrotribochimică prezintă un caracter discontinuu.



Acțiunea chimică a mediului ambiant al cuplei de frecare este continuă. Coroziunea evoluează în funcție de perechea de materiale și de parametrii fizico-chimici ai acesteia (figura 2.45.) [P2].

Fig. 2.45. Evoluția parabolică a uzurii în timp la coroziunea unei suprafețe metalice.

Ea este declanșată de concentrarea unor cantități mari de energie pe microzonele de contact, distribuite statistic pe suprafața de frecare.

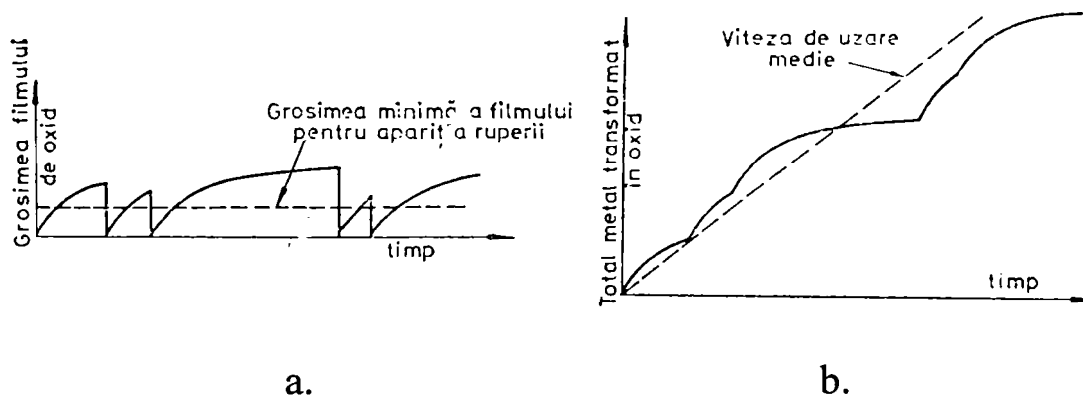


Fig. 2.46. a.- Producerea și ruperea peliculei disturbatoare, b.- uzarea suprafeței metalice.

Coroziunea de fretare constituie o parte a coroziunii electrotribochimice și apare când suprafețele de frecare sunt supuse simultan acțiunii sarcinii normale și unor oscilații de mică amplitudine (minim $8 \cdot 10^{-9}$ mm), având un caracter puternic distructiv asupra cuplei de frecare perie-inel. Pierderea în greutate prin uzura de fretare este conform [P2]:

$$U_f = \left(K_0 \cdot F^{\frac{1}{2}} - K_1 \cdot F \right) \cdot \frac{N_c}{\Phi} + K_2 \cdot h \cdot F \cdot N_c \quad (2.142.)$$

unde

F - sarcina,

N_c - numărul de cicluri,

Φ - frecvența,

h - amplitudinea,

K_0, K_1, K_2 - constante.

Uzarea uniformă a suprafețelor de contact ale periilor contactelor electrice se dorește minimă dar în condiții de funcționare îndelungată și la turații mari pot apare efecte negative prin formarea unor suprafețe foarte lucioase. Acestea sunt supuse fenomenelor aerodinamice iar contactul electric va deveni imperfect. La viteze mici de funcționare și densitate joasă de curent pot apare microjoncțiuni ca urmare a aderenței dintre suprafețele extrem de netede (efectul stick-slip). Fenomenul uzării periilor depinde în mod hotărâtor de condițiile de funcționare, de perechile de materiale folosite și de mediul de lucru. La mașinile electrice staționare se recomandă valori ale intensității liniare de material îndepărtat în unitatea de timp situate în intervalul $[2\div 7]$ mm / 1000 h. Spre exemplu la o lungime utilă a periei de 20 mm va rezulta o durată de viață a acesteia cuprinsă între $[2600\div 10000]$ h.

În cazul sistemelor liniare se exprimă intensitatea liniară prin mm de material îndepărtat la 1000 km parcurși. În acest caz se admit valori cuprinse între $[0.2\div 0.35]$ mm / 1000 km [4].

Uzarea electrotribochimică a inelelor colectoare are ca efect apariția petelor sau / și arsurilor superficiale ale suprafețelor de contact, cauzele fiind de natură triboelectrică (arc electric datorat contactului imperfect și abraziune).

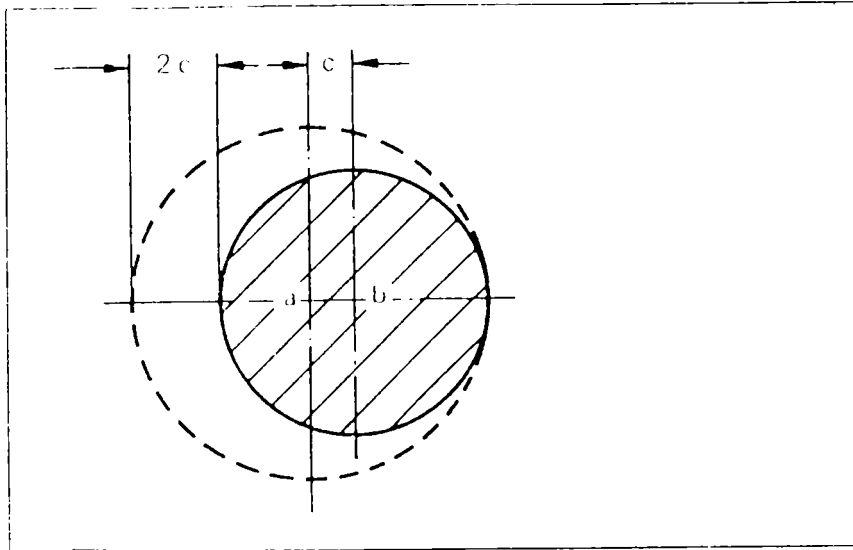
În cazul nefuncționării o perioadă de timp a perechii de piese perie-inel colector poate apare uzarea corozivă datorată umidității mediului ambiant, perechile transformându-se în elemente galvanice.

Uzarea abrazivă a inelelor colectoare poate duce la formarea unor mici canale în profunzimea stratului dăunătoare contactului electric. Cauzele acestui fenomen sunt multiple. Microparticulele abrazive din aer (de exemplu praful) pătrund în zona de alunecare, fixându-se pe suprafața periei. Componentele minerale din grafit pot constitui o altă cauză a uzării prin abraziune a inelului colector. În cazul mașinilor electrice la care colectorul este foarte puțin încălzit se realizează slab conducția prin pelicula disturbatoare, apărând fenomenul fritării. În punctele prin care trece curentul temperatura crește foarte mult realizându-se vaporizarea metalului colectorului. Acesta se depune nedorit și neuniform pe suprafața de frecare. În cazul inelelor din Cu apare migrația de material pe perii datorată sensului câmpului electric. Microparticulele din Cu se transformă în micropile abrazive, producând zgărierea inelelor colectoare.

Umiditatea ridicată a mediului ($> 2 \text{ g} / \text{m}^3$) poate duce la oxidarea metalului din componența contactului și la apariția fenomenului electrolizei. Uleiurile și unsoarele care pătrund în zona de contact formează pelicule izolatoare ducând la fenomenul fritării. Uleiul încălzit puternic își poate modifica structura cocsificându-se. Gazele agresive (clor, sulf, amoniac, bioxid de sulf etc) pot provoca uzare corozivă prin deteriorarea peliculei disturbatoare și prin apariția scânteii.

Prelucrarea necorespunzătoare a suprafețelor poate duce la oscilații și vibrații, respectiv la uzura periei și la întreruperea nedorită a contactului. La turații medii se admit abateri ale rugozității inelului de maximum 50 μm [4].

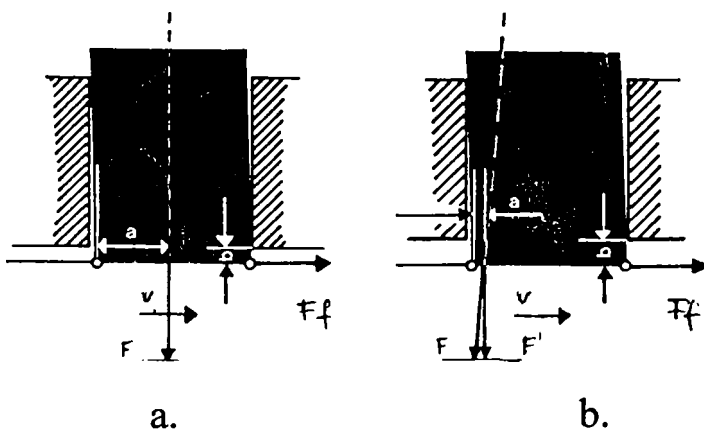
Spre exemplu în cazul prelucrării defectuoase a unui inel colector (figura 2.47.) cu excentricitatea c , apare o bătaie radială datorată neregularităților formei acestuia care poate deteriora contactul [4].



a.

b.

Fig. 2.47. a.- Bătaia radială a inelului colector, b.- diagramă înfășurătoare a inelului cu bătaie radială.



a.

b.

Presiunea periei pe inel acționează în interiorul suprafeței de așezare a periei pe inel (figura 2.48.) pentru eliminarea vibrațiilor, respectiv pentru o conducție optimă de curent.

$$a.) \text{ stabil : } F \cdot a > F_f \cdot b \quad (2.143.)$$

$$b.) \text{ labil : } F' \cdot a = F_f \cdot b \quad (2.144.)$$

Fig. 2.48. Direcția de acțiune a presiunii de contact (a.- poziție stabilă, b.- poziție labilă).

În cazul apariției deformațiilor termice în timpul funcționării contactului este necesară stabilizarea termică a inelului colector.

Se recomandă ungerea suprafețelor de contact pentru diminuarea frecării cu un strat subțire de parafină [4].

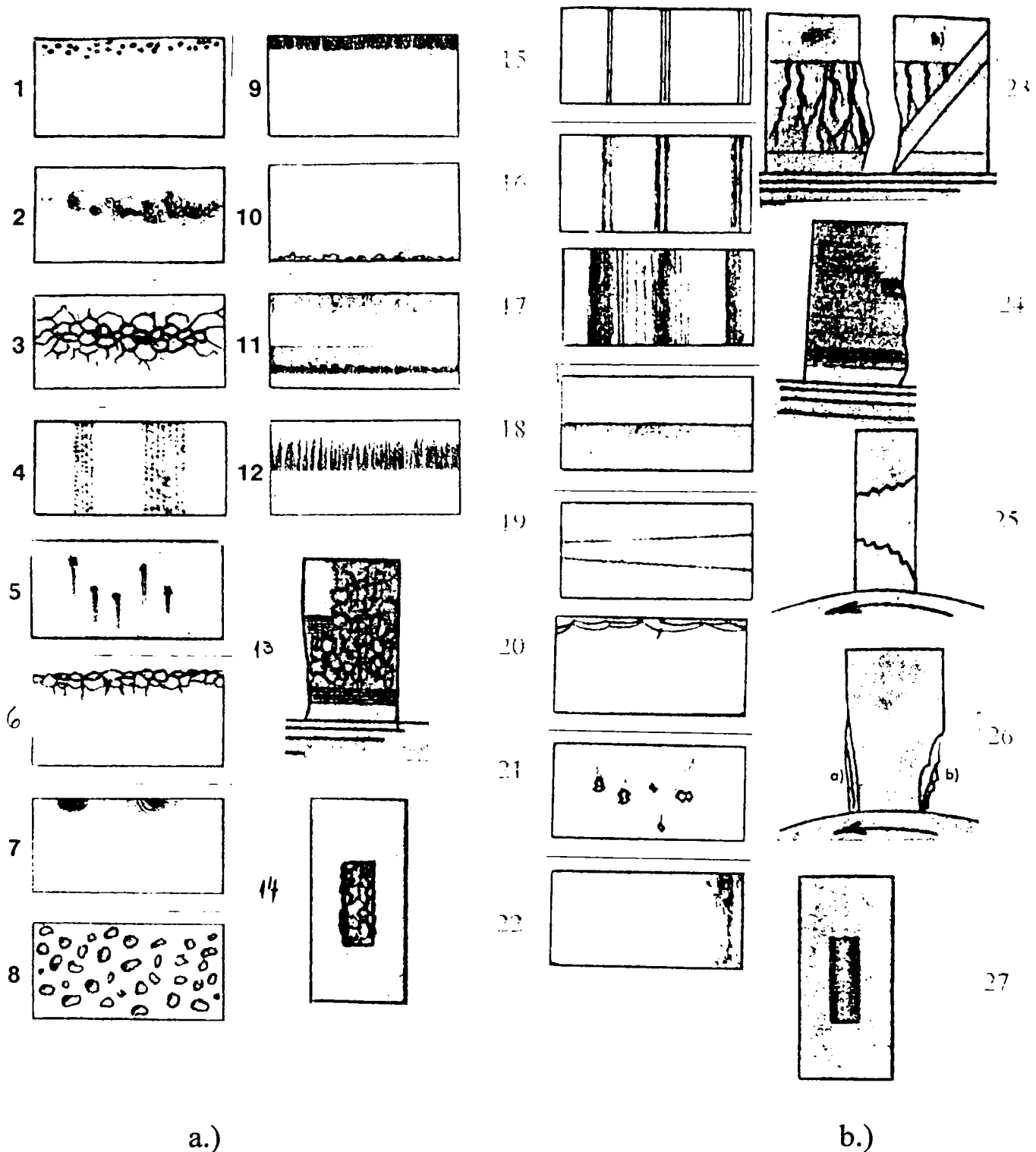


Fig.2.49. Alura periilor uzate

(a.-uzura electrică : 1-puncte datorate arcului electric, 2-pete difuze în zona de contact, 3-suprafață arsă și ruptă, 4-rizuri, 5-comete, 6-arsuri ale muchiei, 7-puncte de topire în zona muchiei, 8-cratere, 9-arsuri electrice ale muchiei, 10-ciupituri ale muchiei, 11-arsură de forma inelului, 12-benzi arse, 13-ardere datorată curentului de trecere, 14-ardere datorată scânteilor și arcului electric,

b.-uzura mecanică : 15-striuri, 16-crestături fine, 17-benzi de rizuri, 18, 19-semisuprafețe uzate, 20-fisuri ale muchiei, 21-cratere de cupru, 22-benzi mate

datorate picăturilor de ulei, 23-uzare datorată prafului, 24-modificarea suprafeței, 25-fisuri datorate vibrațiilor, 26-exfoliere și crăpare, 27-uzare datorată presării).

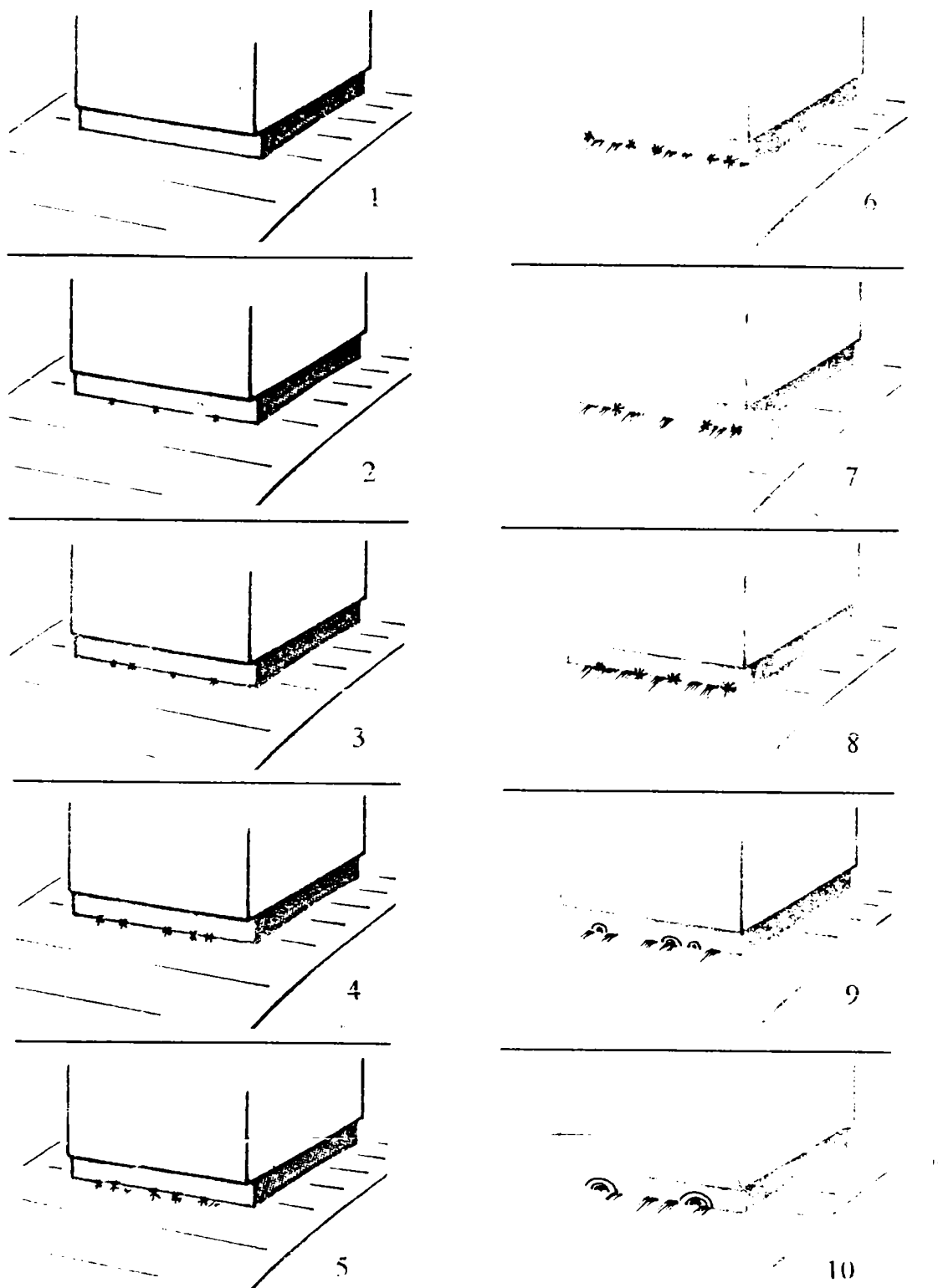


Fig. 2.50. Scântelele și uzura periilor

(1-lipsa scântelor, 2-scântei slabe intermitente, 3-scântei slabe, constante, 4-scântei de culoare roșie, destul de puternice, 5, 6, 7-foc intens, 8-scântei puternice de culoare verde, 9-puncte slabe de topire, 10-puncte de topire intensă).

În figura 2.49. se exemplifică alura câtorva suprafețe uzate ale periilor, în figura 2.50. scântele și efectul acestora asupra cuplei de frecare iar în figura 2.51. starea suprafețelor uzate ale inelelor colectoare [4]:

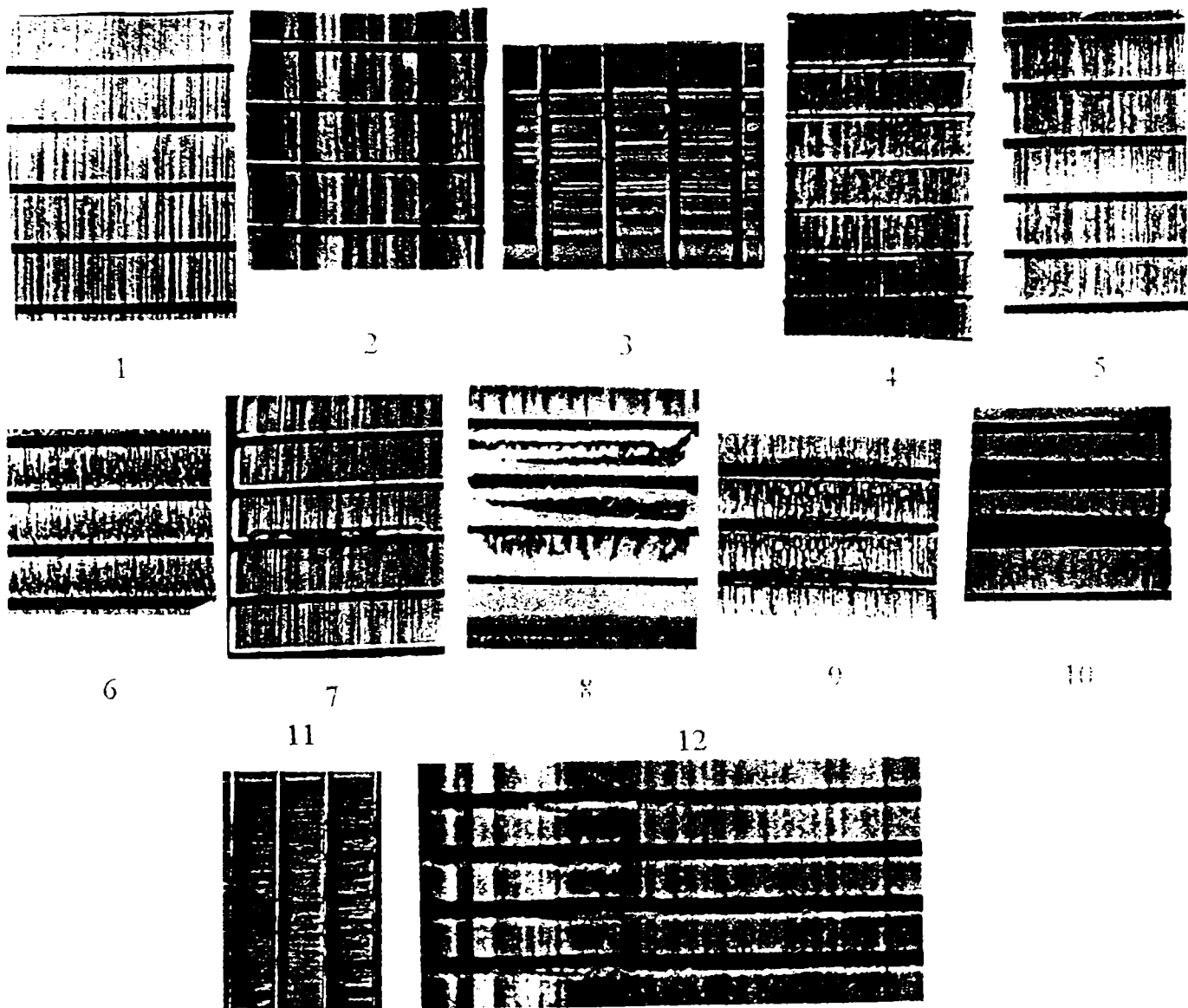


Fig. 2.51. Alura inelelor colectoare uzate (1-alura normală a peliculei disturbatoare, 2-formarea benzilor, 3-peliculă zgâriată datorită gazelor, prafului din atmosferă, 4-peliculă pătată datorită vibrațiilor, 5-lamele pătate cu puncte datorită curentului prea mare, 6-arsuri și cratere datorate presiunii prea scăzute și vibrațiilor, 7-topirea cuprului sub formă de cratere, 8-arderi, 9-arderi și puncte datorate arcului electric, 10-fâșii arse datorită scânteiilor, 11-arsuri puternice din cauza vibrațiilor și presiunii prea scăzute, 12-striuri, arsuri datorită mediului și presiunii periei).

Uzarea electromecanică a perechilor de materiale este influențată hotărâtor de valorile presiunii specifice la care este supus contactul electric.

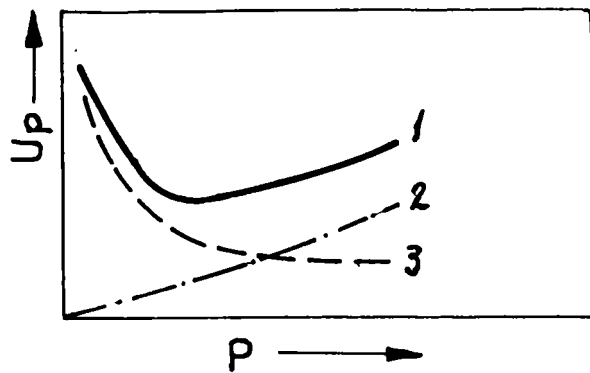


Fig. 2.52. Dependența dintre uzarea periei și presiunea de contact.
(1-uzarea totală, 2-uzarea mecanică, 3-uzarea electrică)[4]

În tabelul 2.10. se prezintă câteva valori orientative ale presiunii de contact p dintre perie și inelul colector ale diverselor firme producătoare.

2.3.3. Lubrificarea contactului electric

În condițiile de frecare ale contactului electric mobil se utilizează cu precădere lubrifianți solizi. Explicația procesului de frecare în prezența lubrifiantului solid este dată pe baza teoriei forfecării microjoncțiunilor a lui Bowden, Holm, Merchant, [P1], [P2], [B5]. Dacă filmul de lubrifiant este subțire și elastic, coeficientul de frecare cinetic f_k rezultă din:

$$f_k = \frac{S_m \cdot \tau_r + (1 - S_m) \cdot \tau_{rf}}{p_c} \quad (2.145.)$$

unde

S_m - cota parte din aria reală de contact necoperită de lubrifiant,

τ_r, τ_{rf} - rezistențele la forfecare ale materialului de bază și ale lubrifiantului solid,

p_c - presiunea de curgere a materialului de bază.

În cazul filmului continuu cu $S_m = 0$ rezultă o valoare minimă a lui f_k , analog relației 2.91.:

$$f_k = \tau_{rf} / p_c \quad (2.146.)$$

iar când filmul este uzat sau îndepărtat cu $S_m = 1$:

$$f_k = \tau_r / p_c \quad (2.147.)$$

Tabelul 2.10.

<i>tipul mașinii electrice</i> v [m/s], $\theta_{colcător}$ [°C]	<i>presiunea specifică</i> $p \cdot 10^4$ [N/m ²] [7]	$p \cdot 10^4$ [N/m ²] [15] <i>fix - oscilant</i>	$p \cdot 10^4$ [N/m ²] [14]	$p \cdot 10^4$ [N/m ²] [13]	$p \cdot 10^4$ [N/m ²] [4]
motoare universale	2-4	2-2.5 -	-	-	-
mașini electrice de comutație 40, 90	1.8-3	- -	1.8-3	2-3	2-2.5
mașini electrice cu inel alunecător de tensiuni joase 40, 90	1.5-2.5	2 2.5-3.5	2	2.5	2-2.5
motoare de tramvaie 50, -	3.5-5	3 -5 -	până la 5	3-4	3.5
motoare de trenuri 50, -	2.5-4	3-5 -	2.5-3.5	-	2.5-3.5
motoare ale utilajelor de ridicat și transportat 50, 90	4.5-6	- -	până la 4	2.5-3	2.5-4
turbo- generatoare 55, 90	-	1.5-2.5 -	-	1.3-2	2
motoare de c.c. 50, -	-	1.5-2 2-3.5	-	-	2-2.5
motoare de c.a. 80, -	-	1.8-2 2.5-3	-	-	1.3-2.5

Lubrifiantul solid trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- ⇒ rezistență redusă la forfecare și duritate redusă pentru un coeficient de frecare cât mai mic,
- ⇒ bună aderență la materialul de bază, continuitatea filmului și durabilitate prin posibilitatea regenerării,

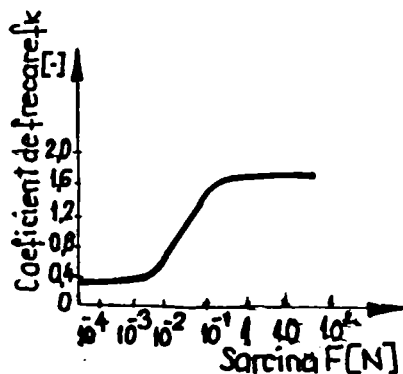
Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

- ⇒ elasticitate, bună conductibilitate și stabilitate termică, densitate redusă,
- ⇒ conductibilitate electrică și inerție chimică,
- ⇒ granulație redusă, uniformă și lipsa particulelor abrazive,
- ⇒ lipsă de corozivitate.

Grafitul facilitează frecarea prin alunecarea straturilor interpușe suprafețelor de contact și are o rezistență redusă la forfecare. Prin rolele de grafit formate în strat se transformă mișcarea de alunecare în mișcare de rostogolire, aceasta ducând la o valoare redusă a coeficientului de frecare. În timpul frecării pe suprafața de contact se formează un strat complex de metal, oxid metalic și pachete orientate de grafit cu proprietăți bune de frecare. În aer grafitul poate fi utilizat până la $\theta = 350$ °C. Prezența unor molecule străine adsorbite între straturile de grafit (O_2 , H_2O , CO_2) sunt cauza valorii mai reduse a coeficientului de frecare a grafitului în aer umed.

Pentru funcționarea optimă a cuplei de frecare granulația grafitului trebuie să fie de 1-2 μm și se recomandă [P2] ca straturile cristaline de grafit să fie distribuite paralel la direcția mișcării.

Straturile metalice moi se caracterizează prin rezistență redusă la forfecare, ceea ce conduce la valori reduse ale coeficientului de frecare. Din această categorie fac parte straturile din Ag, Zn, Cu care se depun pe suprafața unui metal mai dur.



Unele pelicule metalice se pot forma prin aliere sau transfer în timpul frecării celor două suprafețe în contact. Proprietățile lubrifiante ale acestor pelicule depind de grosimea lor și de caracteristicile suprafeței suport [M1].

Oxidul de Cu realizează în timpul funcționării un proces dinamic de rupere și refacere, ce conduce la o valoare relativă dură a coeficientului de frecare. CuO prezintă un f_k scăzut până la o anumită sarcină (figura 2.53.)

Fig. 2.53. Variația coeficientului de frecare în prezența oxidului de Cu.

În figurile 2.54., 2.55. se prezintă dependența coeficientului de frecare de viteza de alunecare și de sarcină pentru grafit.

Funcționarea optimă a unei cuple de frecare cu un element din material sinterizat cu proprietăți autolubrifiante este determinată de compoziția materialului, de calitatea și cantitatea grăunților de pulbere, de lubrifiantul solid impregnat (grafit). În tabelul 2.11. se prezintă câteva materiale sinterizate folosite în construcția contactelor electrice [P2].

Dependența rezistenței la uzură a câtorva materiale folosite în construcția contactelor electrice de tipul uzării este prezentată în figura 2.56. [P2].

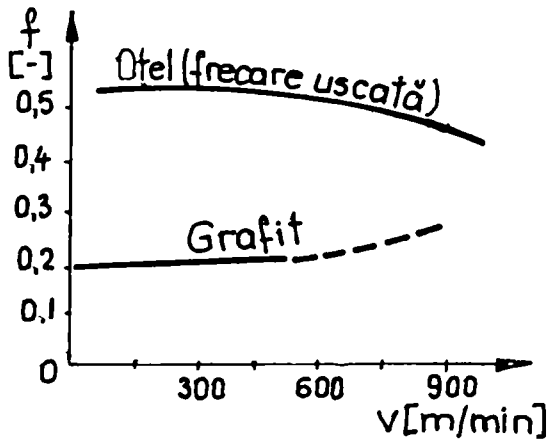


Fig. 2.54. Dependența coeficientului de frecare de viteza de alunecare.

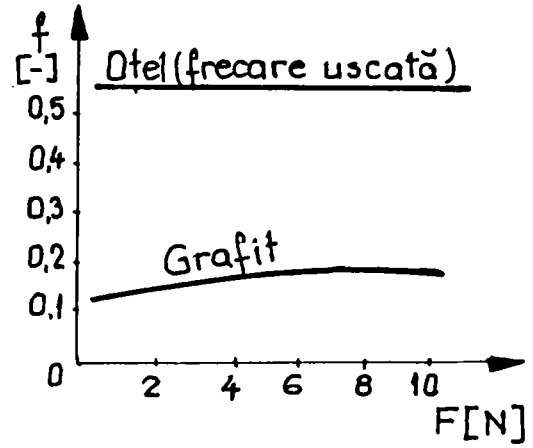


Fig. 2.55. Dependența coeficientului de frecare de sarcină.

Tabelul 2.11.

tip	compoziție	duritate HB [N/mm ²]	porozitate [%]
bronz sinterizat	90 % Cu, 10 % Sn	380	20
bronz sinterizat	86 % Cu, 10 % Sn, 4 % C	350	15
bronz sinterizat	89 % Cu, 10 % Sn, 1 % grafit	-	31, 29, 25

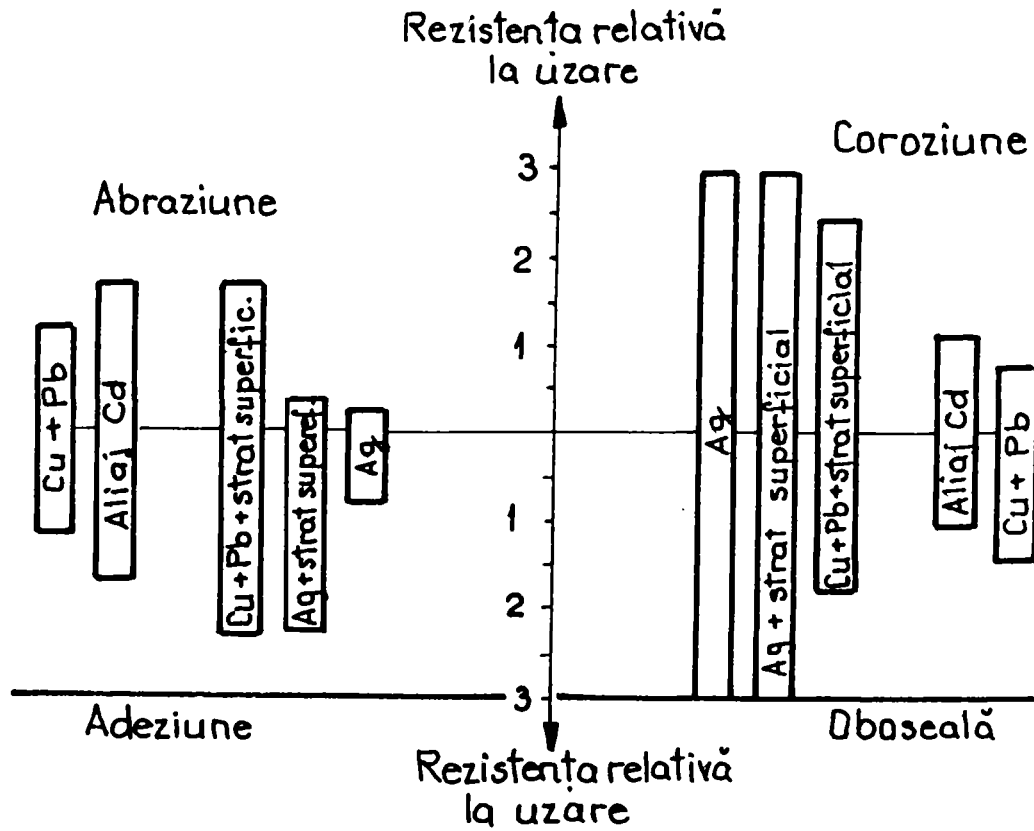


Fig. 2.56. Dependența rezistenței la uzură a câtorva materiale pentru contacte electrice de tipul uzării

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Cap. 3. Considerații teoretice privind calculul contactului liniar

3.1. Contactul liniar. Deformații elastoplastice.

Analiza trecerii din domeniul elastic în cel elastoplastice privind calculul deformațiilor și tensiunilor prezintă interes în principal din cel puțin două puncte de vedere [M3], [20]:

- ajută la modelarea procesului de frecare-uzare a suprafețelor de contact ale pieselor, cu referire la testele de duritate și la evidențierea unor proprietăți de material ce țin de structura intimă a acestuia,
- permite înțelegerea contactului real al suprafețelor cuplei de frecare, cu implicații asupra unor aspecte tribologice (distribuția presiunii de contact, apariția microsudurilor, aria reală de contact etc.).

Contactul liniar dintre un cilindru de diametru d_1 (inelul) și un plan (peria) este redat în figura 3.1. unde s-a notat cu q sarcina ce revine unității de lungime de contact sau intensitatea liniară a sarcinii, cu F forța de apăsare și cu l lungimea de contact. Suprafața de contact se transformă în acest caz dintr-o elipsă într-un dreptunghi. Curbura redusă Σk a unui astfel de contact are expresia [P4]:

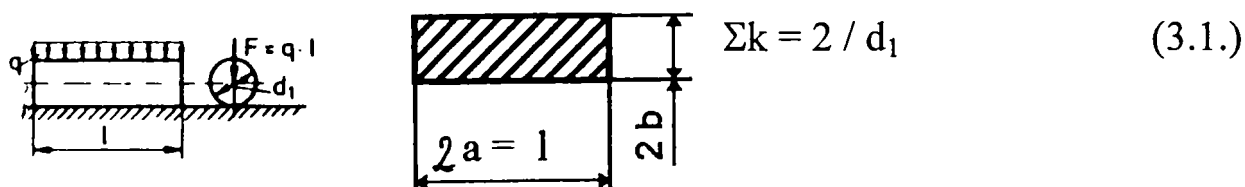


Fig. 3.1. Contactul liniar cilindru-plan

Calculând presiunea hertziană în cazul contactului liniar se deduce valoarea maximă a presiunii aplicată pe aria de contact p_{\max} conform [P4], [19]:

$$p_{\max} = \frac{4}{\pi} \cdot p = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F}{2 \cdot b \cdot l} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{F}{b \cdot l} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{q}{b} \quad (3.2.)$$

unde

p - presiunea hertziană medie pe suprafața de contact,

b - semilățimea dreptunghiului de contact.

Semiaxele suprafeței “eliptice” în cazul general (în cazul analizat dreptunghiulare) de contact $2a$ și $2b$ sunt:

$$2a = 1 \quad \text{și} \quad b = \sqrt{\frac{4 \cdot F(1 - \nu^2) \cdot d_1}{\pi \cdot E \cdot l}} \quad (3.3.), (3.3'.)$$

în care

ν - coeficientul Poisson,

E - modulul de elasticitate longitudinal al materialului considerat.

Inlocuind relația 3.3.' în 3.2. rezultă presiunea hertziană maximă:

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{F \cdot E}{\pi \cdot d_1 \cdot l \cdot (1 - \nu^2)}} \quad (3.4.)$$

Covalschi a determinat o relație pentru variația diametrului plasat pe direcția sarcinii. Deși din calculele matematice ar ieși ∞ [P4], deformația (sau apropierea celor două corpuri) δ este finită și depinde de deformațiile din punctul de contact și de deformațiile întregului corp:

$$\delta = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot q}{\pi \cdot E} \cdot \left(\ln \frac{d_1}{b} + 0.407 \right) \quad (3.5.)$$

Pentru contactul liniar cilindru-plan determinarea stării plane de tensiune se face cu ajutorul calculului tensiunii tangențiale principale [P4], [19] situată sub suprafața de contact τ , respectiv prin determinarea tensiunilor normale σ_y , σ_z reprezentate pentru $y = 0$ în figura 3.2., în care z reprezintă adâncimea de situare a tensiunii. Tensiunea tangențială principală prezintă un maxim la o anumită adâncime sub suprafața de contact. Se observă că cea mai mare valoare a acestei mărimi se situează la $\tau = 0.3 \cdot p_{\max}$, la o adâncime $z / b = 0.78$.

Starea de tensiune pentru $y = 0$ este definită de relațiile 3.6., 3.7. și 3.8.:

$$\frac{\sigma_z}{p_{\max}} = -\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}} \quad (3.6.)$$

$$\frac{\sigma_y}{p_{\max}} = 2 \cdot \left(\frac{z}{b}\right) - \frac{1 + 2 \cdot \left(\frac{z}{b}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}} \quad (3.7.)$$

$$\frac{\tau}{p_{\max}} = \frac{z}{b} - \frac{\left(\frac{z}{b}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}} \quad (3.8.)$$

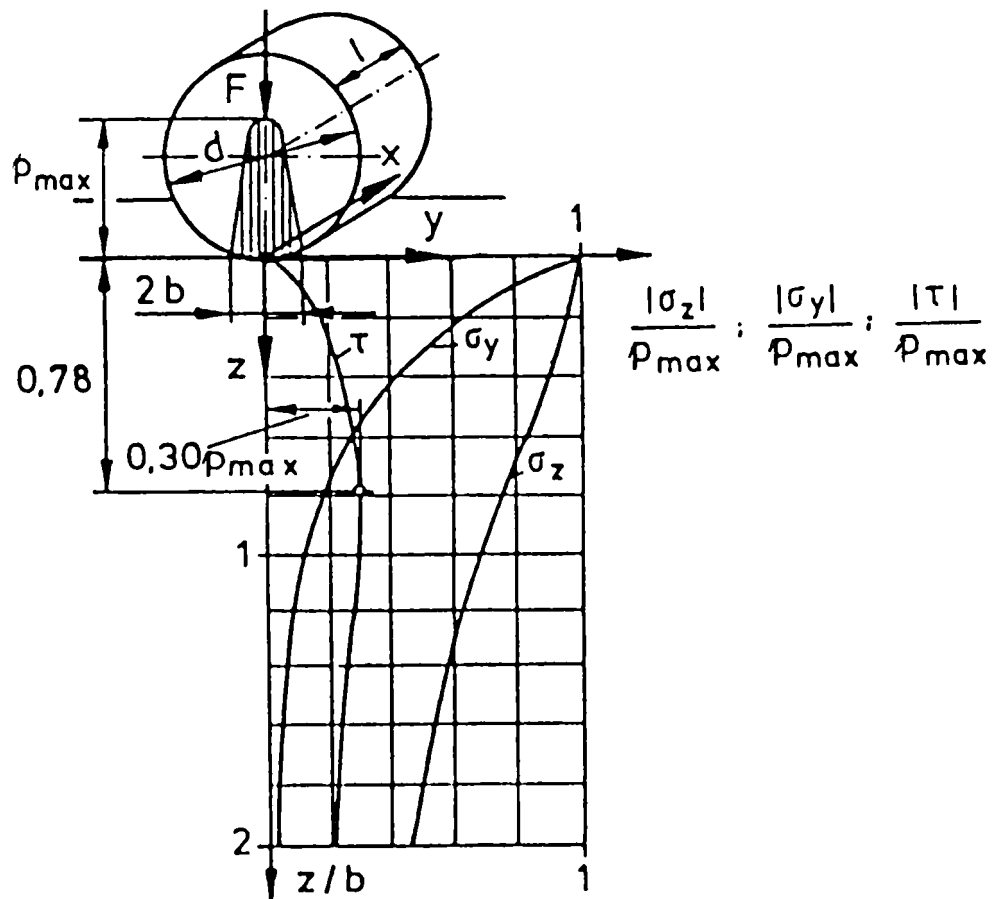


Fig. 3.2. Starea plană de tensiune în cazul contactului liniar

În mod similar se determină starea de tensiune spațială a contactului liniar cilindru-plan în cazul $x = y = 0$ (figura 3.3.). Starea de tensiune este definită în acest caz de relațiile 3.9., 3.10. și 3.11..

$$\frac{\sigma_x}{p_{\max}} = -2 \cdot \nu \cdot \left[\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2} - \left(\frac{z}{b}\right) \right] \quad (3.9.)$$

$$\frac{\sigma_y}{P_{\max}} = \left[\frac{1 + 2 \cdot \left(\frac{z}{b}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}} - 2 \cdot \left(\frac{z}{b}\right) \right] \quad (3.10.)$$

$$\frac{\sigma_z}{P_{\max}} = -\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}} \quad (3.11.)$$

Ecuatiile de mai sus reprezintă tensiunile maxime raportate la presiunea hertziană maximă, corespunzătoare coordonatelor $x = y = 0$. Ele se bazează pe luarea în considerare a stării de deformare plană ($\epsilon_x = 0$).

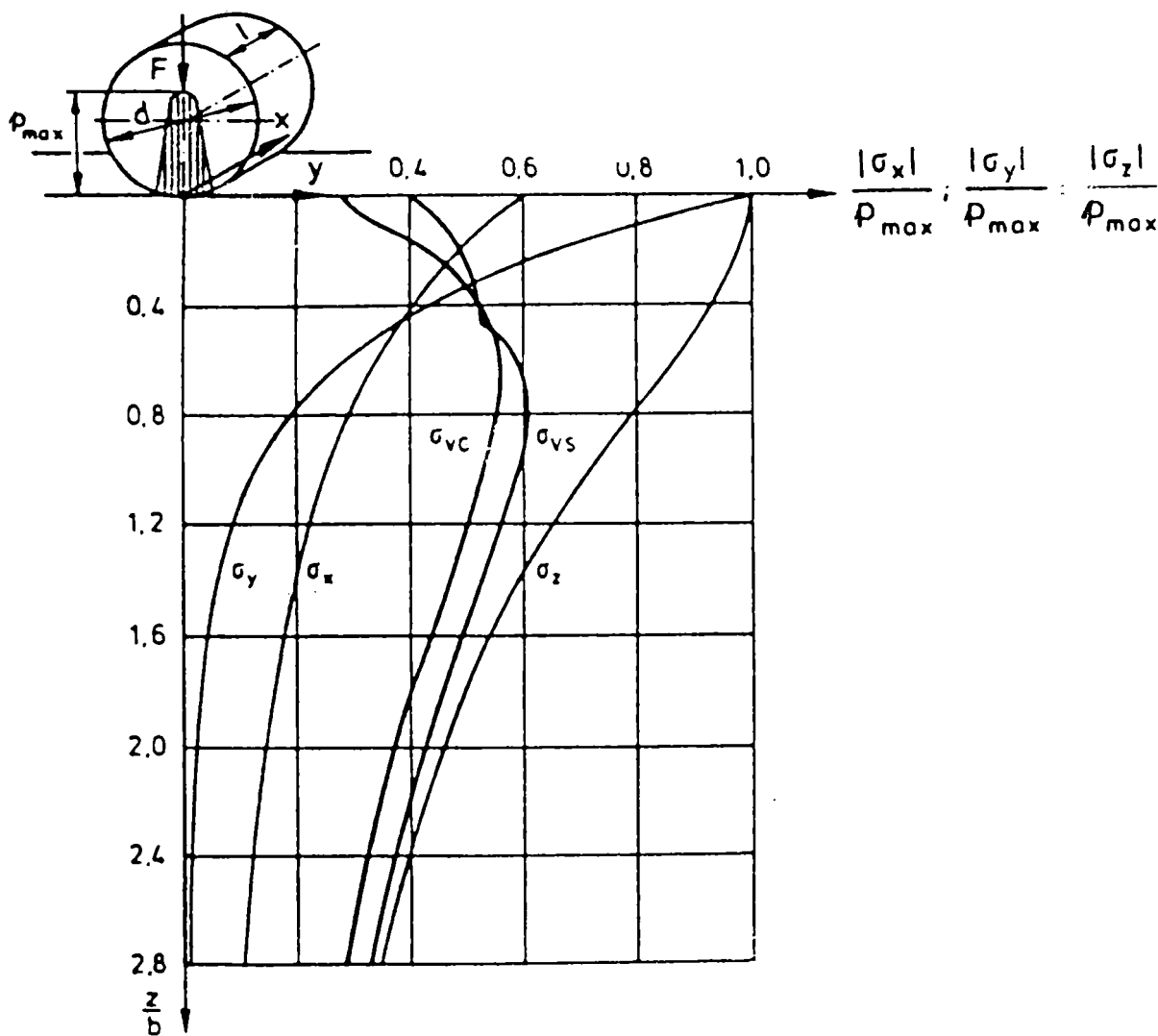


Fig. 3.3. Starea de tensiune spațială a contactului

Ipotezele de rupere, respectiv de deformație elastoplastică în zona de contact ale Științei rezistenței materialelor determină solicitările la contactul hertzian prin intermediul tensiunilor echivalente, în funcție de valorile tensiunilor normale principale σ_x , σ_y , σ_z [P4], [19],[K6]. Cele două ipoteze, dovedit ca fiind cele mai apropiate de realitate sunt ipoteza tensiunii tangențiale principale maxime pe axa Oz (notată cu indexul S, teoria Tresca-St. Venant) și ipoteza lucrului mecanic de variație a formei (notată cu indexul G, teoria Hencki-von Mises) [19].

Conform ipotezei tensiunii tangențiale principale maxime se presupune că curgerea elastoplastică a materialului începe în momentul în care tensiunea tangențială atinge o valoare critică într-unul din punctele de contact, independent de felul stării de tensiune. Tensiunea echivalentă σ_{VS} (figura 3.3.) va fi :

$$\sigma_{VS} = 2 \cdot \tau_{\max} = \max\{\sigma_z - \sigma_y, \sigma_z - \sigma_x, \sigma_y - \sigma_x\} \quad (3.12.)$$

Conform ipotezei Hencki-von Mises (a lucrului mecanic de variație a formei notată cu G) deformația elastoplastică a materialului apare în momentul în care un element de volum depășește pragul lucrului mecanic de variație a formei. In acest caz tensiunea echivalentă σ_{VG} (figura 3.3.) se determină conform relației:

$$\sigma_{VG} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]} \quad (3.13.)$$

In figura 3.3. se observă că tensiunea echivalentă maximă apare conform ambelor ipoteze considerate în substratul de contact:

◆ ipoteza tensiunii tangențiale principale maxime:

$$\sigma_{VS_{\max}} = 0.6 \cdot p_{\max}, \text{ la adâncimea } z = 0.78 \cdot b \quad (3.14.), (3.14'.)$$

◆ ipoteza lucrului mecanic de variație a formei:

$$\sigma_{VG_{\max}} = 0.56 \cdot p_{\max}, \text{ la adâncimea } z = 0.71 \cdot b \quad (3.15.), (3.15'.)$$

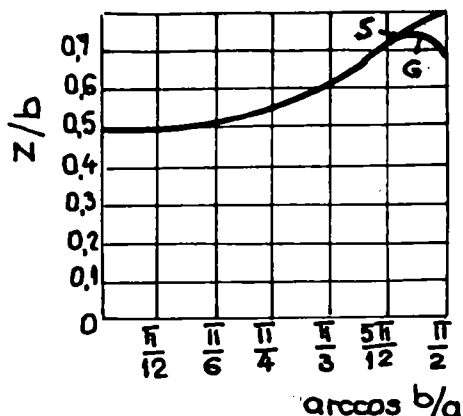
Pentru evitarea deformației plastice a materialului trebuie îndeplinită următoarea condiție, conform ipotezei Tresca-St. Venant [19]:

$$\sigma_{VS_{\max}} < R_{p0.2} \quad (3.16.)$$

Presiunea hertziană maximă admisă va fi pentru un material cu limita de curgere $R_{p0.2}$:

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

$$p_{\max a} < 1.67 \cdot R_{p0.2} \tag{3.17.}$$



În figura 3.4. [K6] sunt prezentate adâncimile z / b de sub suprafața de contact în direcția Oz unde se află tensiunile echivalente maxime în funcție de raportul $\beta = b / a$, respectiv $\arccos (b / a)$.

Fig. 3.4. Adâncimea deformației cu tensiunea echivalentă maximă în funcție de pata de contact.

În tabelul 3.1. sunt date valorile tensiunilor echivalente maxime $\sigma_{vS, vG} / p$ și adâncimile la care acestea se situează pe axa Oz pentru suprafața de contact liniară [K6].

Tabelul 3.1.

ipoteza	$\beta = b / a = 1, z / b$	$\varepsilon = \pi / 2$, contact liniar, σ_v / p
S	0.401	0.765
G	0.481	0.710

Relația 3.13. se mai poate scrie și sub forma [P4]:

$$\sigma_{vG} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1-2 \cdot \nu}{\nu}\right)^2 \cdot \sigma_x^2 + 3 \cdot \left[(\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 \right]} \tag{3.18.}$$

unde cu ν s-a notat:

$$\nu = \frac{\sigma_x}{\sigma_y + \sigma_z} \tag{3.19.}$$

Înlocuind în penultima relație valorile tensiunilor pentru diverse valori ale coeficientului de frecare și prin calcule numerice se obțin curbele tensiunilor echivalente din semispațiul elastic σ_{vG} cu considerarea forțelor de frecare pe suprafața de contact, cu valori ale coeficienților de frecare f de 0.1, 0.15, 0.2, 0.3 [P4] (figura 3.5.). Se observă că tensiunile echivalente au sens invers față de tensiunile

normale. În cazul frecării se observă o variație a tensiunilor atât pe suprafața de contact cât și sub suprafața de contact. Cu cât coeficientul de frecare este mai mare, cu atât maximul solicitării se apropie de suprafața de contact. Pentru coeficienți de frecare $f > 0.2$ maximul solicitării se deplasează pe suprafață (figura 3.5. d.) și este evident că la coeficienții de frecare $f < 0.1$ nu apare o mărire evidentă a solicitării în cazul suprafețelor perfect netede.

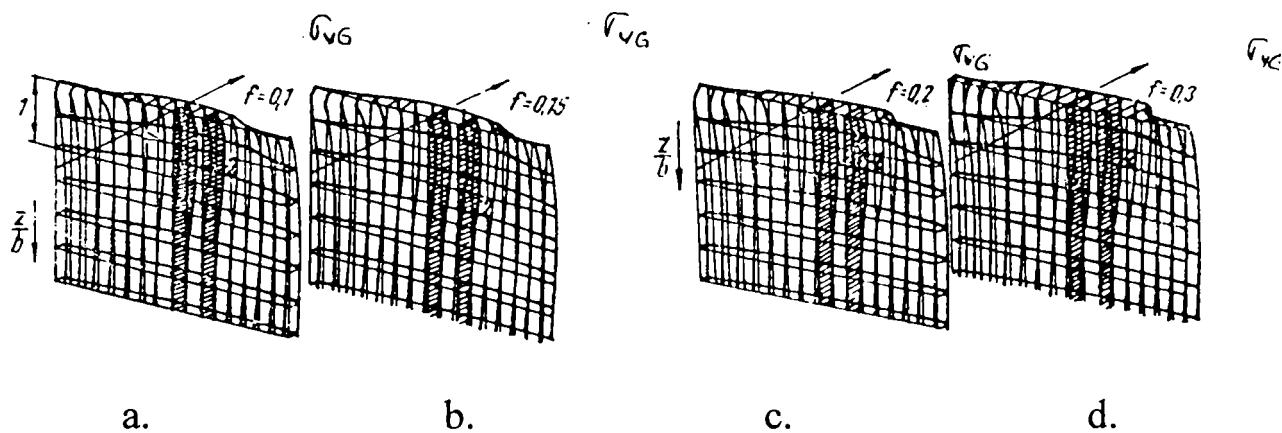


Fig. 3.5. Curbele tensiunilor echivalente σ_v din semispațiul elastic cu considerarea forțelor de frecare

În figura 3.6. se prezintă zonele deformabile ale materialului în funcție de tensiune, respectiv de adâncimea stratului de contact [19]:

- zona 1: în zona de apariție a tensiunii maxime se depășește limita de curgere a materialului. Această deformare plastică apare în cazul presiunii hertziene mari.
- zona 2: materialul se deformează plastic dacă adâncimea de durificare a materialului este necorespunzătoare.
- zona 3: materialul se deformează plastic dacă duritatea în profunzime a materialului este prea scăzută.

Apariția deformațiilor elastoplastice superficiale se desfășoară în cazul contactului liniar cilindru-plan în patru etape [20]:

⇒ în etapa I (a-a') apar deformațiile elastice (figura 3.7. a.),

⇒ în etapa II (b-b') (figura 3.7. b.) apar deformații plastice (respectiv ecruisare) la o adâncime corespunzătoare efortului tangențial maxim. Aceste deformații se prezintă la început în microvolumele de material și apoi se extind sub forma unor bombări care duc la mărirea suprafeței de contact și respectiv la micșorarea presiunii de contact. Mărimea bombării depinde de compatibilitatea materialelor în contact. În zona bombării asperitățile suprafeței se păstrează ca mărime dacă suprafața este prelucrată îngrijit; în caz contrar acestea se distrug.

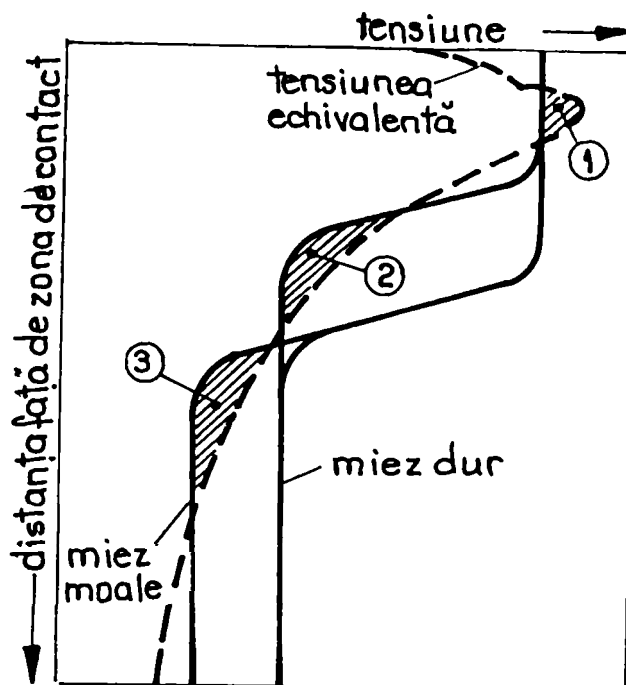


Fig. 3.6. Zonele de deformare plastică a materialului

Deformațiile pieselor din etapele I și II se determină cu ajutorul relațiilor lui Hertz.

⇒ în etapa III (c-c') (figura 3.7. c.) deformația plastică se propagă spre suprafață și se poate măsura. În această etapă deformația elastică este încă preponderentă.

⇒ în etapa IV (figura 3.7. d.) deformația plastică se extinde pe o mare parte a zonei de contact. Se apreciază că în acest caz deformația elastică reprezintă numai 10 % din cea totală.

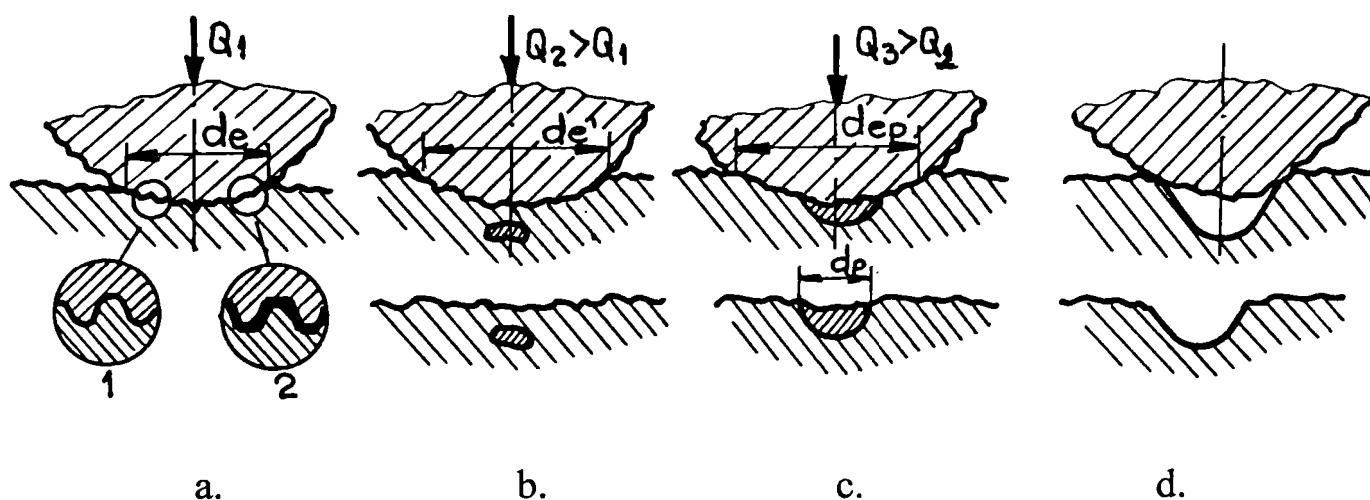
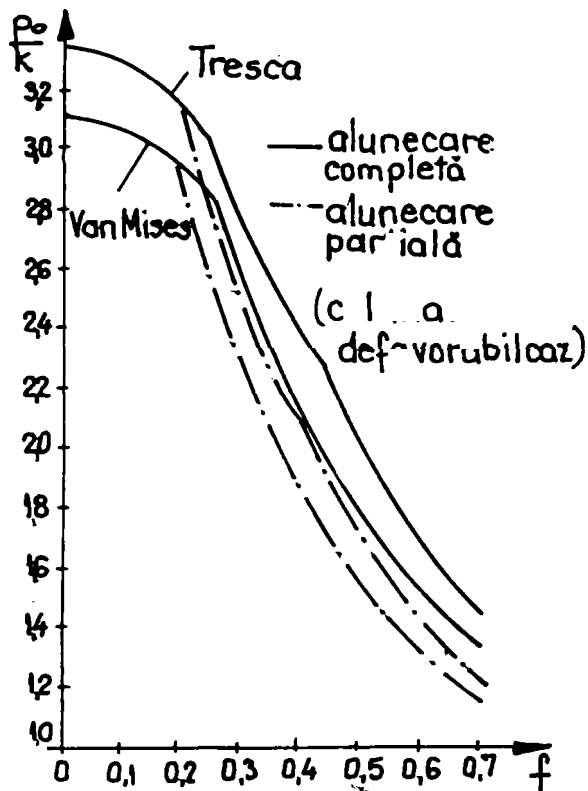


Figura 3.7. Etapele deformației elastoplastice

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare



Conform [H8] valoarea presiunii la care apar primele deformații plastice p_0 depinde de raportul dintre forța tangențială de transmis Q și forța normală aplicată F și de coeficientul de frecare f (figura 3.9.). In figura 3.8. se prezintă dependența presiunii maxime de coeficientul de frecare f .

Fig. 3.8. Presiunea maximă funcție de coeficientul de frecare

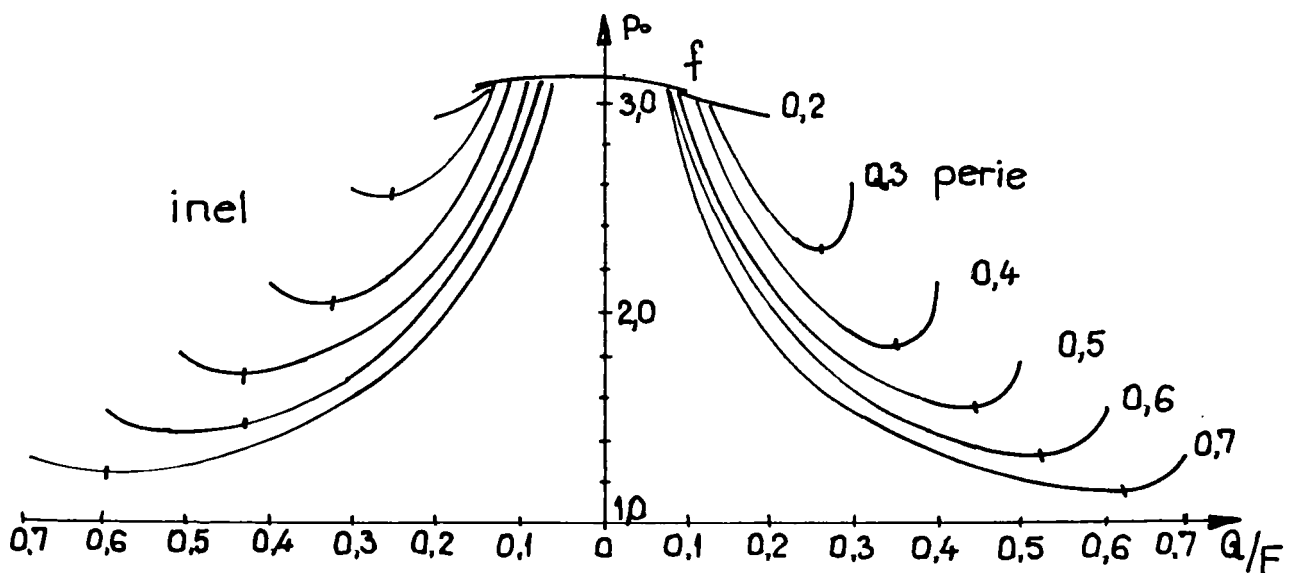


Fig. 3.9. Presiunea la care apar deformațiile plastice în cazul contactului liniar

3.2. Cavitația zonei marginale a contactului cuplei de frecare

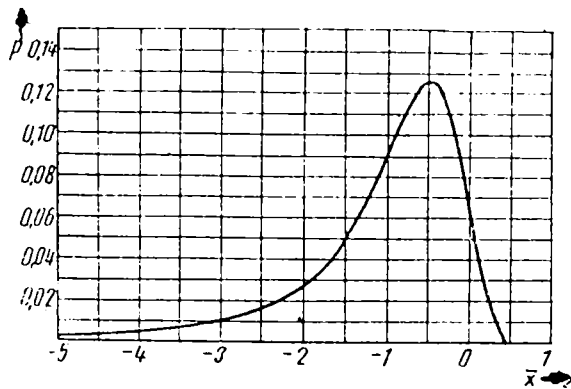


Fig.3.10. Curba de presiune Martin

În zona marginală a cuplei perie-inel către ieșirea din contact unde curba presiunii se termină în spațiul divergent există condițiile ca presiunea să scadă sub valoarea presiunii mediului ambiant, respectiv să apară o depresiune reprezentată în figura 3.10. [D2].

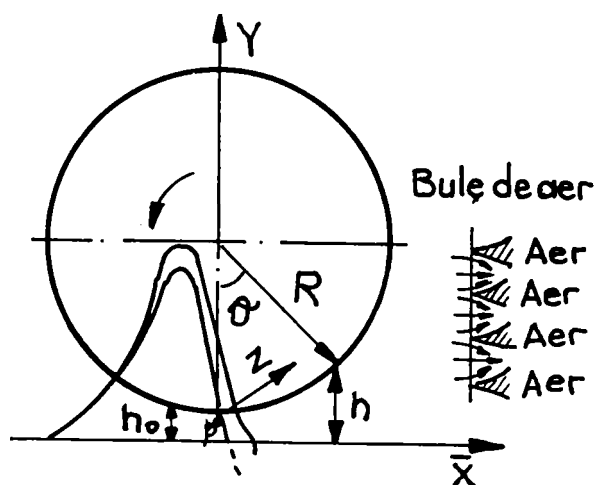


Fig.3.11. Depresiunea în spațiul de divergență

Tendința de formare a unei depresiuni în spațiul de divergență poate să ducă la ruperea filmului de peliculă disturbatoare respectiv la cavitație (figura 3.11.), eliberându-se gaze dizolvate sub formă de bule.

Condițiile limită a cavitației sunt:

$$p = \frac{dp}{d\theta} = 0 \quad , \quad \theta = \theta_{\min} \quad (3.20.)$$

Zona de cavitație se termină în general într-un punct mai mic sau egal cu R, la un unghi θ cuprins între θ_{\min} și $\pi / 2$. Deoarece zonele prin care se realizează conducția au lățimi foarte mici în zona cavitată, contribuția la forțele tangențiale de suprafață în aceste regiuni este nesemnificativă.

3.3. Contactul cuplei cu straturi subțiri depuse

În acest caz unul dintre elemente (peria) este compus dintr-un material antifricțiune cu duritatea mult mai mică decât a celuilalt element (inelul) iar între cele două elemente se interpune un strat subțire format din pelicula disturbatoare.

Analiza se va face la contactul unei rugozități parabolice rigide “i” cu un plan acoperit cu un strat moale, subțire de grosime “h”. Sarcina totală F se obține prin însumarea sarcinilor preluate de cele n_r asperități din zona de contact:

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

$$F = \int_0^n F_i \cdot dn_r \quad (3.21.)$$

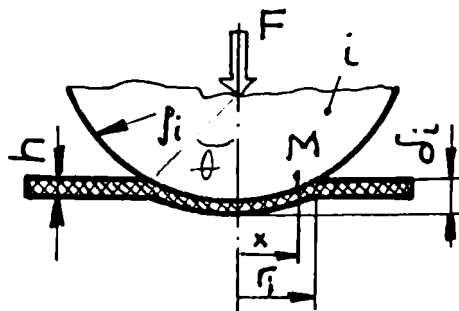


Fig. 3.12. Contactul rugozitate - strat subțire depus

Se consideră [M4] că distribuția de presiuni dintre rugozitatea i și stratul subțire este conform figurii 3.12 de forma:

$$p(x) = \frac{1}{\pi \cdot \theta \cdot \sqrt{r_i^2 - x^2}} \cdot \left\{ \delta_i + 2 \cdot \gamma \left(1 - 2 \cdot \frac{x^2}{r_i^2} \right) + C_1 \cdot \left(\delta_i - \frac{2}{3} \cdot \gamma \right) + C_2 \cdot \left[2 \cdot \delta_i \cdot \left(\frac{x^2}{r_i^2} - \frac{1}{3} \right) - \frac{4}{3} \cdot \gamma \cdot \left(\frac{x^2}{r_i^2} - \frac{1}{5} \right) \right] \right\} \quad (3.22.)$$

unde $\gamma = \frac{r_i^2}{2 \cdot \rho_i}$ iar C_1 și C_2 sunt parametri care depind de modul de rigidizare a stratului subțire pe suportul său. Notând cu $h_s = h / r_i$ grosimea relativă a stratului în dreptul rugozității i , constantele C_1 și C_2 au expresiile:

$$C_1 = \frac{2 \cdot a_0}{\pi \cdot h_s} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot a_0}{\pi \cdot h_s} + \left(\frac{2 \cdot a_0}{\pi \cdot h_s} \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot a_0}{\pi \cdot h_s} \right)^3 + \frac{8 \cdot a_1}{3 \cdot \pi \cdot h_s^3} \right] \quad (3.23.)$$

$$C_2 = \frac{4 \cdot a_1}{\pi \cdot h_s^3} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot a_0}{\pi \cdot h_s} \right) \quad (3.24.)$$

Parametrii a_0 și a_1 se calculează cu integrala:

$$a_j = \frac{(-1)^j}{(2 \cdot j)!!} \cdot \int_0^\infty [1 - N(u) \cdot u^{2 \cdot j}] du \quad (3.25.)$$

pentru $j = 0$ și respectiv $j = 1$. În absența frecării stratului cu suportul său (cazul I):

$$N(u) = \frac{ch2u - 1}{2u + sh2u} \quad (3.26.)$$

iar când stratul este bine fixat pe suport (cazul II):

$$N(u) = \frac{2 \cdot (3 - 4 \cdot \nu_p) \cdot sh2u - 4u}{2 \cdot (3 - 4 \cdot \nu_p) \cdot ch2u + 1 + (3 - 4 \cdot \nu_p)^2 + 4 \cdot u^2} \quad (3.27.)$$

Integrând relația 3.22. rezultă sarcina F_i preluată de asperitatea i :

$$F_i = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{r_i} p(x) \cdot x dx = \frac{2 \cdot r_i}{\theta} \cdot \left[(1 + C_1) \cdot \left(\delta_i - \frac{2}{3} \cdot \gamma \right) + \frac{2}{3} \cdot C_2 \cdot \left(\delta_i - \frac{14}{15} \cdot \gamma \right) \right] \quad (3.28.)$$

Din condiția $p(r) = 0$ rezultă :

$$\delta_i = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \left(1 + \frac{C_1}{3} + \frac{8 \cdot C_2}{15} \right)}{1 + C_1 + \frac{4 \cdot C_2}{3}} \quad (3.29.)$$

Mărimile adimensionale caracteristice stratului sunt:

$$\overline{F_i} = \frac{F_i \cdot \theta}{h^2}, \quad \overline{r_i} = \frac{r_i}{h}, \quad \overline{\delta_i} = \frac{\delta_i}{h}, \quad \overline{\rho_i} = \frac{\rho_i}{h} \quad (3.30.)$$

Inlocuind relația 3.28. în relația 3.30. rezultă:

$$\overline{F_i \rho_i} = \frac{4 \cdot r_i}{3} \cdot \frac{15 \cdot (1 + C_1) + 2 \cdot C_2 \cdot \left(5 - \frac{2 \cdot C_2}{3} \right)}{15 \cdot \left(1 + C_1 + \frac{4 \cdot C_2}{3} \right)} \quad (3.31.)$$

$$\overline{\delta_i \rho_i} = \overline{r_i}^2 \cdot \frac{1 + \frac{C_1}{3} + \frac{8 \cdot C_2}{15}}{1 + C_1 + \frac{4 \cdot C_2}{3}} \quad (3.32.)$$

3.4. Distribuția presiunii reale dintre asperități la cuplele de frecare

Simulând contactul celor două suprafețe printr-un model cu o suprafață rugoasă cu o singură microasperitate iar cealaltă suprafață perfect netedă (conform figurii 3.13) se obține conform [D4] ecuația:

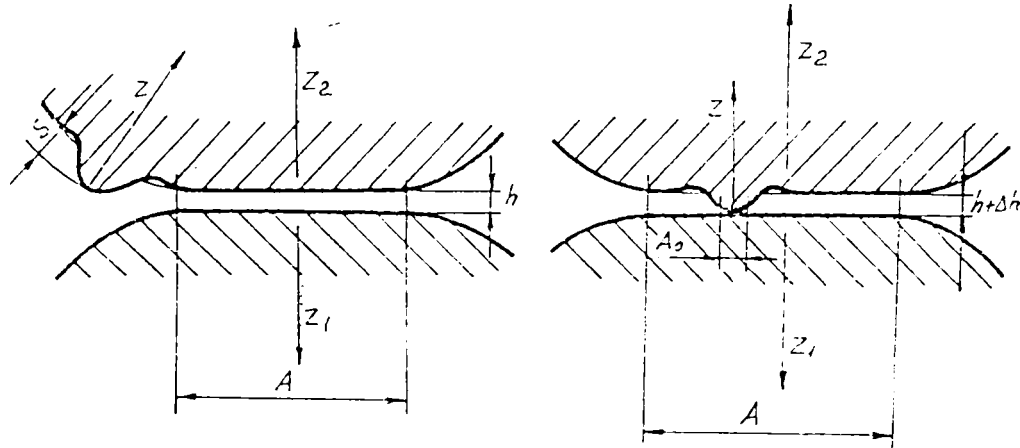


Fig. 3.13. Geometria modelului de contact

$$\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \cdot \iint_{A_0} \frac{P_a(x_0, y_0) - P_f(x_0, y_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} dx_0 dy_0 = S - h - z_{(x, y)} \quad (3.33.)$$

unde

⇒ $E_{1, 2}$, $\nu_{1, 2}$ reprezintă modulele de elasticitate, respectiv coeficienții Poisson ai celor două suprafețe,

⇒ p_f , p_a sunt presiunea hidrodinamică din film, respectiv presiunea dintre asperități.

Ecuția analogă din teoria contactului hertzian liniar este:

$$\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \cdot \iint \frac{P_z(x', y')}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}} dx' dy' = \delta - A \cdot x^2 - B \cdot y^2 \quad (3.34.)$$

Din asemănarea ultimelor două relații rezultă că necunoscuta reprezintă o presiune hertziană pe A_0 :

$$P_a(x, y) - P_f(x, y) = P_H(x, y) \quad (3.35.)$$

sau

$$P_a(x, y) = P_H(x, y) + P_f(x, y) \quad (3.35'.)$$

Presiunea pe un microcontact se compune dintr-o presiune hertziană determinată de întrepătrunderea microasperităților (S-h) și din presiunea fluidului (lichid sau gaz). Relația 3.35'. corespunde contactului unei suprafețe lise cu o suprafață rugoasă cu o singură asperitate. Contactul real presupune însă frecarea unui număr mare de asperități. Similar se obține ecuația în situația microcontactelor multiple [D3]:

$$\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \cdot \left[\iint_{A_{0i}} \frac{P_{ai} - P_f}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} dx_0 dy_0 + \sum_{j=1}^{N-1} \iint_{A_{0j}} \frac{P_{aj(x_0,y_0)} - P_{f(x_0,y_0)}}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} dx_0 dy_0 \right] = S - h - z_{(x,y)} \quad (3.36.)$$

Indicele “i” se referă la microcontactul inițial și indicele “j” la cele (N-1) microcontacte datorate celorlalte asperități. In ecuația 3.36. se observă apariția celui de-al doilea termen care reprezintă deplasarea suplimentară datorată celor (N-1) microcontacte:

$$W_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \cdot \sum_{j=1}^{N-1} \iint_{A_{0j}} \frac{P_{aj(x_0,y_0)} - P_{f(x_0,y_0)}}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} dx_0 dy_0 \quad (3.37.)$$

sau

$$W_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \cdot F_0 \cdot \sum_{j=1}^{N-1} \frac{1}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \quad (3.37.')$$

Pentru ca relația 3.33. să rămână valabilă ar trebui ca termenul 3.37. să fie neglijabil sau constant, trecând în partea dreaptă a relației drept o constantă. In general numărul de microcontacte posibile pentru o arie nominală de 1 mm² este de circa 2000-2500, neputându-se neglija deplasarea suplimentară W_s . Sarcina concentrată F_0 fiind constantă, se determină variația sumei la modificarea poziției punctului de referință (x_i, y_i) pe microaria de contact A_{0i} . Prin determinări succesive se demonstrează matematic că variația sumei ia valori sub 1%, respectiv că deplasarea suplimentară determinată de cele (N-1) microasperități este practic constantă la modificarea poziției punctului curent pe microaria A_{0i} , respectiv relația 3.36. poate fi scrisă în mod similar cu relația 3.33.:

$$\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \cdot \iint_{A_{o_i}} \frac{p_{ai} - p_{fi}}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} dx_0 dy_0 = S - h - k - z_{(x,y)} \quad (3.38.)$$

Din asemănarea relației 3.38. cu relația 3.34. rezultă că numărătorul ($p_{ai} - p_{fi}$) este o presiune hertziană p_{Hi} pe microasperitatea A_{o_i} sau:

$$p_{ai} = p_{Hi} + p_{fi} \quad (3.39.)$$

adică presiunea pe un microcontact este compusă dintr-o presiune hertziană suprapusă peste presiunea generală din fluid.

3.5. Lubrificația cu gaze în regim turbulent

Turbulența apare la turații foarte mari la cuplele lubrificate cu gaze [C5]. Se studiază comportarea asimptotică a ecuației diferențiale a presiunilor la viteze mari și influența forțelor de inerție, care pot modifica calitativ comportarea cuplei de frecare. În cazul lubrificației cu gaze intervine efectul compresibilității acestora prin dependența calitativă a distribuției presiunilor de parametrul adimensional H :

$$H = \frac{\mu \cdot \omega}{p_0 \cdot \psi^2} \quad (3.40.)$$

unde

μ - vâscozitatea cinematică,

ω - viteza unghiulară de rotație a inelului,

p_0 - presiunea atmosferică,

$\psi = c / r$ - jocul relativ (c - jocul radial, r - raza suprafeței de contact).

S-a constatat matematic că la viteze mari influența turbulenței asupra presiunilor devine neglijabilă. Se consideră cazul mișcărilor bidimensionale cu exponentul politropic al evoluției gazului lubrifiant $\chi = 1$. Ecuația presiunilor "p" va fi conform [C5]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = p'(x, v) = \frac{\mu \cdot v}{2} \cdot \frac{k_x(x, v)}{h^2(x)} \cdot \left[1 - \frac{C_1}{p(x, v) \cdot h(x)} \right] \quad (3.41.)$$

unde

x - coordonată,
 v - viteza inelului,
 k_x - parametru care depinde de numărul Reynolds,
 h - grosimea stratului de gaz,
 C_1 - constantă de integrare.

Formal soluția ecuației 3.41. poate fi scrisă :

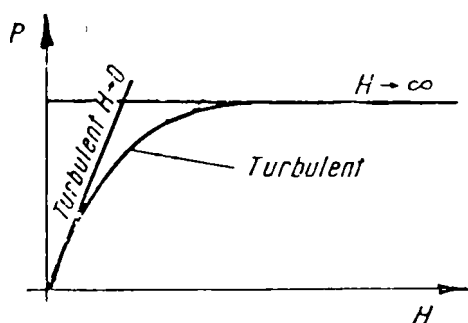
$$p(x, v) = \frac{\mu \cdot v}{2} \cdot \left[\int_0^x \frac{k_x(x', v)}{h^2(x')} dx - C_1 \int_0^x \frac{k_x(x', v)}{p(x', v) \cdot h^3(x')} dx' \right] + C_2 \quad (3.42.)$$

Determinându-se constantele de integrare C_1 și C_2 :

$$C_1 = \frac{\int_0^l \frac{k_x(x', v)}{h^2(x')} dx' - \frac{2 \cdot (p_0 - p_1)}{\mu \cdot v}}{\int_0^l \frac{k_x(x', v)}{p(x', v) \cdot h^3(x')} dx'} \quad ; \quad C_2 = p_0 \quad (3.43.)$$

respectiv pentru

$$C_1 = p(x_0, v) \cdot h(x_0) \text{ rezultă } p'(x_0, v) = 0, \quad (3.44.)$$



se poate concluziona că presiunile și derivata presiunilor (cel mult cu excepția unui număr finit de puncte) rămân mărginite (limitate) când viteza relativă dintre cele două suprafețe crește foarte mult $H \rightarrow \infty$, $v \rightarrow \infty$ sau când numărul Reynolds crește foarte mult. Rezultanta presiunilor p trebuie să fie o curbă continuă care la numere H mari devine tangentă la dreapta ce definește valoarea presiunii maxime (figura 3.14.).

Fig. 3.14. Influența numărului H asupra rezultantei presiunilor

Pentru lubrifiția cu gaze introducerea efectului forțelor de inerție conduce la introducerea unui parametru suplimentar (numărul Mach), care poate influența cantitativ și calitativ fenomenul. Astfel pentru lubrifiția cu gaze la viteze mari este important să se cunoască influența componentelor forțelor de inerție în afara tensiunilor turbulente, respectiv influența numărului Mach [C5] (ecuația globală 3.45.).

Ecuația 3.45. sugerează o comportare diferită a mișcării pentru $M_* < 1$ și $M_* > 1$, analogă scurgerii subsonice și supersonice prin ajutaje (figura 3.15.).

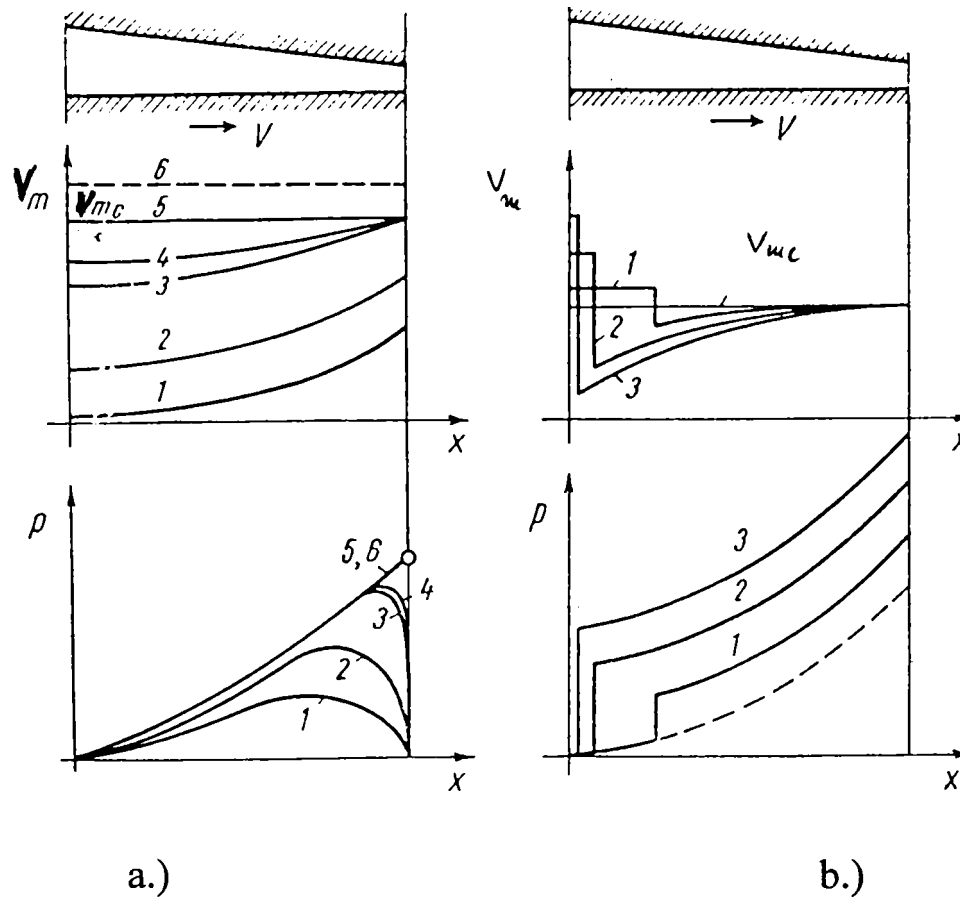


Fig. 3.15. Variația vitezelor medii v_m și a presiunilor p cu viteza v , ținându-se seama de forțele de inerție

(a.- regim subcritic, critic, supracritic; b.- regim supersonic în ipoteza producerii unei unde de șoc normale)

$$(1 - M_*^2) \cdot \frac{dv_m}{v_m} = \left(M_*^2 \cdot f - \frac{dh}{dx} \right) \cdot \frac{dx}{h} \quad (3.45.)$$

unde

M_* - numărul Mach,

v_m - viteza medie,

$f = \tau / (v^2 \rho / 2)$ - coeficientul de frecare ,

τ - tensiunea de frecare,

ρ - densitatea.

Rezultă deci că influența forțelor de inerție este redusă și se poate chiar neglija pentru viteze curente $M_* \ll 1$. Pentru viteze mai mari influența forțelor de inerție va fi în continuare redusă, deoarece vitezele critice sunt aproape imposibil de atins.

3.6. Problema mecanoenergetică a contactului

In cazul conectărilor multiple și de durată, principala formă de pierdere de energie este cea prin radiație (de transfer de căldură către mediul ambiant). Relația care caracterizează acest fenomen este:

$$Q_f \cdot z = \alpha \cdot A \cdot (\theta - \theta_0) \Rightarrow \theta - \theta_0 = \frac{Q_f \cdot z}{\alpha \cdot A} \quad (3.46.)$$

unde Q_f - lucrul mecanic al forțelor de frecare la fiecare conectare [J],

z - numărul de conectări pe oră [h^{-1}],

α - coeficientul transferului de căldură [$J / (h \cdot m^2 \cdot ^\circ C)$],

A - suprafața radiantă a cuplei [m^2],

θ - temperatura [$^\circ C$],

θ_0 - temperatura inițială (a mediului ambiant) [$^\circ C$].

Coeficientul transferului de căldură α depinde de viteza de ventilație a aerului respectiv de viteza de rotație a inelului v [m / s] după cum urmează:

$$\alpha = (4.6 + 1.05 \cdot v) \cdot 10^4 \left[\frac{J}{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C} \right] \quad \text{pentru } v < 3.5 \text{ m/s}, \quad (3.47.)$$

$$\alpha = (1.88 + 2.5 \cdot v^{0.75}) \cdot 10^4 \left[\frac{J}{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C} \right] \quad \text{pentru } v \geq 3.5 \text{ m/s} \quad (3.48.)$$

La funcționarea cuplei de frecare perie-inel trebuie să se ia în considerare în calculele termice puterea specifică admisibilă (datorată forțelor de frecare) q_a [W / m^2], care poate fi determinată experimental.

$$Q_f \leq q_a \cdot A_r \cdot i \cdot \frac{1}{z} \quad (3.49.)$$

A_r - aria reală de frecare a cuplei [m^2],

i - numărul perechilor de cuple de frecare aflate concomitent în contact [-],

z' - numărul conectărilor într-o secundă [s^{-1}].

Puterea specifică efectivă datorată forțelor de frecare q_{ef} va trebui să îndeplinească condiția:

$$q_{ef} \leq q_a \quad (3.50.)$$

Puterea specifică efectivă poate fi diminuată prin mărirea suprafeței totale de frecare respectiv folosirea cuplelor multiple și a materialelor cu coeficient de frecare mai mare, prin fixarea rigidă a periei și prin folosirea unor materiale stabile termic.

În figura 3.16. sunt marcate mărimile care stau la baza calculului procesului de frecare - uzare fundamentat pe forța elementară de frecare dF_f și pe aria de contact dA , ce permit calculului momentului de frecare M_f , unde:

$p(\alpha)$ reprezintă presiunea distribuită în contactul perie - inel,

b - lățimea contactului,

f - coeficientul teoretic de frecare,

r - raza inelului,

α, α_m - unghiurile suprafeței de contact.

$$dF_f = f \cdot p(\alpha) \cdot dA \quad (3.51.)$$

$$dA = r \cdot b \cdot d\alpha \quad (3.52.)$$

Momentul de frecare elementar este:

$$dM_f = f \cdot r \cdot p(\alpha) \cdot dA \quad (3.53.)$$

iar momentul de frecare rezultat va fi:

$$\begin{aligned} M_f &= 2 \cdot \int_0^{\alpha} f \cdot r \cdot p(\alpha) dA = \\ &= 2 \cdot \int_0^{\alpha} f \cdot r^2 \cdot b \cdot p(\alpha) d\alpha = \quad (3.54.) \\ &= 2 \cdot f \cdot r^2 \cdot b \cdot \int_0^{\alpha} p(\alpha) \cdot d\alpha \end{aligned}$$

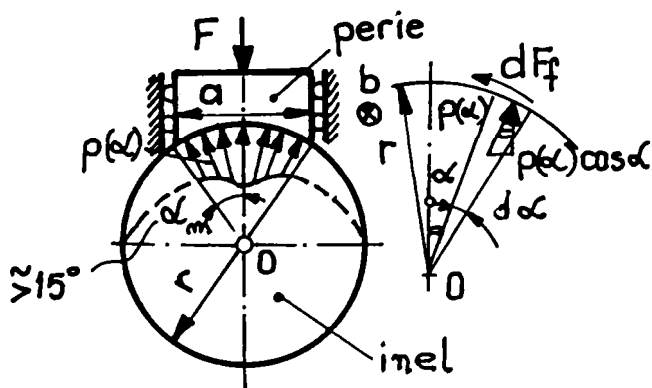


Fig. 3.16. Reprezentarea forțelor și presiunilor

Se observă că pentru determinarea momentului de frecare trebuie cunoscută valoarea $p(\alpha)$.

Este necesară observarea modului în care are loc uzarea elementelor conjugate perie - inel aflate în contact forțat.

Se constată că atunci când periile sunt ghidate riguros pe direcție radială în raport cu inelul, uzarea periei și inelului are loc în straturi paralele, adică este

uniformă. Volumul de material îndepărtat prin uzare dV este proporțional cu lucrul mecanic elementar al forțelor de frecare dW :

$$dV = q_v \cdot dW \tag{3.55.}$$

unde q_v reprezintă factorul de uzare specifică sau:

$$\begin{aligned} dV &= dA \cdot s(\alpha) = q_v \cdot dM_f \cdot \varphi = \\ &= q_v \cdot f \cdot r \cdot p(\alpha) \cdot dA \cdot \varphi \end{aligned} \tag{3.56.}$$

unde unghiul parcurs de un punct considerat pe inel poate fi exprimat în funcție de numărul de rotații complete N :

$$\varphi = 2 \cdot \pi \cdot N \tag{3.57.}$$

Relația 3.57. permite exprimarea grosimii stratului îndepărtat (figura 3.17.):

$$s(\alpha) = q_v \cdot f \cdot r \cdot p(\alpha) \cdot c \tag{3.58.}$$

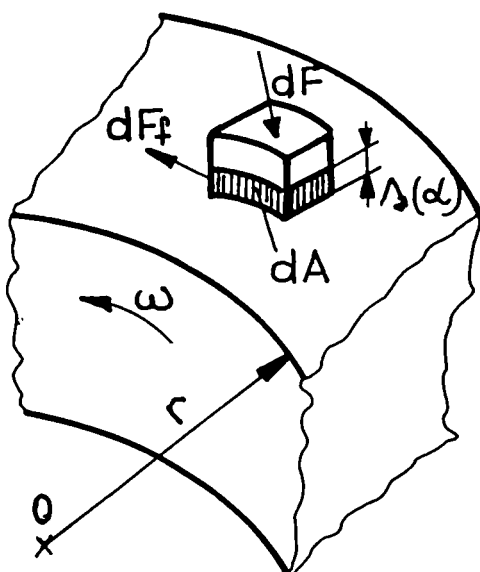


Fig. 3.17. Procesul de uzare al contactului perie - inel

Revenind la observația că $s(\alpha)$ este o valoare constantă, rezultă că și presiunea se poate considera constantă:

$$p(\alpha) = \frac{s(\alpha)}{q_v \cdot f \cdot r \cdot \varphi} = p^* = const. \tag{3.59.}$$

Observația permite rezolvarea integralei 3.54., care va avea soluția:

$$M_f = 2 \cdot f \cdot r^2 \cdot b \cdot p^* \cdot \int_0^{\alpha_m} d\alpha = 2 \cdot f \cdot r^2 \cdot b \cdot p^* \cdot \alpha_m \tag{3.60.}$$

iar forța normală de apăsare va fi:

$$F = 2 \cdot \int_0^{\alpha_m} p^* \cdot \cos \alpha \cdot dA = 2 \cdot \int_0^{\alpha_m} p^* \cdot \cos \alpha \cdot r \cdot b \cdot d\alpha =$$

$$2 \cdot p^* \cdot r \cdot b \cdot \int_0^{\alpha_m} \cos \alpha \cdot d\alpha = 2 \cdot p^* \cdot r \cdot b \cdot \sin \alpha_m \quad (3.61.)$$

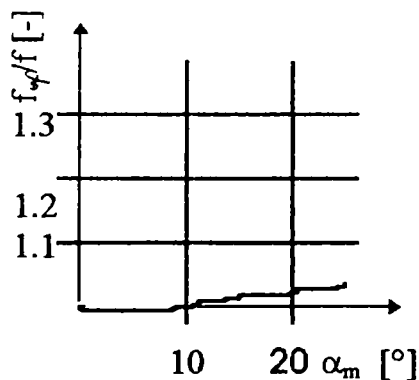
Momentul forțelor de frecare poate fi exprimat și în funcție de forța normală:

$$M_f = 2 \cdot f \cdot r^2 \cdot b \cdot p^* \cdot \alpha_m = f_{ef} \cdot F \cdot r = 2 \cdot f_{ef} \cdot p^* \cdot r^2 \cdot b \cdot \sin \alpha_m \quad (3.62.)$$

unde prin f_{ef} s-a notat coeficientul de frecare corespunzător contactului pe suprafață cilindrică.

$$f_{ef} = f \cdot \frac{\alpha_m}{\sin \alpha_m} \quad (3.63.)$$

Valoarea coeficientului efectiv de frecare f_{ef} crește în raport cu coeficientul de frecare f pe suprafețe plane conform relației 3.63. .

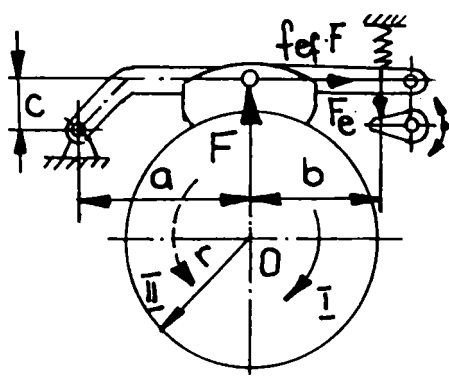


Prin mărirea unghiului α_m crește valoarea coeficientului de frecare. Această creștere este practic nesemnificativă în cazul contactelor alunecătoare pentru că la un unghi de cel mult 15° (20°) creșterea valorii f_{ef} este mai mică de 2% (figura 3.18.).

Fig. 3.18. Dependența frecării de unghiul suprafeței de contact

În majoritatea aplicațiilor la care periile sunt amovibile se apelează la soluția periilor articulate (figura 3.19.).

Variantele acestea prezintă avantaje privind montarea, respectiv demontarea ușoară și scăderea pretențiilor privitoare la toleranțele de execuție ale reperelor. În acest caz uzura periilor nu mai este uniformă. Muchia care intră prima în contact cu inelul rotitor se uzează mai mult.



$$F_e \cdot (a + b) + f_{ef} \cdot F \cdot c - F \cdot a = 0 \quad (3.64.)$$

și

$$F = \frac{M_f}{r \cdot f_{ef}} \quad (3.65.)$$

Fig. 3.19. Fixarea articulată a periei

Din relațiile 3.64. și 3.65. rezultă momentul forțelor de frecare în sensul de rotație I:

$$M_f = \frac{F_e \cdot r \cdot f_{ef} \cdot (a + b)}{a - c \cdot f_{ef}} \quad (3.66.)$$

Se observă că pentru raportul $a / c = f_{ef}$ momentul de frecare $M_f \rightarrow \infty$ (teoretic sistemul se blochează).

În sensul de rotație II rezultă o diminuare a momentului de frecare:

$$M_f = \frac{F_e \cdot r \cdot f_{ef} \cdot (a + b)}{a + c \cdot f_{ef}} \quad (3.67.)$$

Pentru soluția constructivă a suportului periei cu $c = 0$ momentul de frecare și procesul disipativ sunt independente de sensul de rotație al inelului.

Periile duble articulate sunt folosite atunci când este necesară realizarea unui contact electric cu rezistență electrică micșorată sau la funcționarea în mediu lubrificat. În acest caz rolul uneia din cele două perii este de raclare (îndepărtare) a peliculei de lubrifiant iar al celei de-a doua de realizare a contactului propriu-zis.

$$F_e \cdot b \cdot \sin \alpha + f \cdot F_1 \cdot c - F_1 \cdot a = 0 \quad (3.68.)$$

$$M_{f1} = f \cdot F_1 \cdot r \quad (3.69.)$$

$$F_1 = \frac{F_e \cdot b \cdot \sin \alpha}{a - c \cdot f} \quad (3.70.)$$

$$M_{f1} = \frac{f \cdot F_e \cdot b \cdot r \cdot \sin \alpha}{a - c \cdot f} \quad (3.71.)$$

$$F_e \cdot b \cdot \sin \alpha - f \cdot F_2 \cdot c - F_2 \cdot a = 0 \quad (3.72.)$$

$$M_{f2} = f \cdot F_2 \cdot r \quad (3.73.)$$

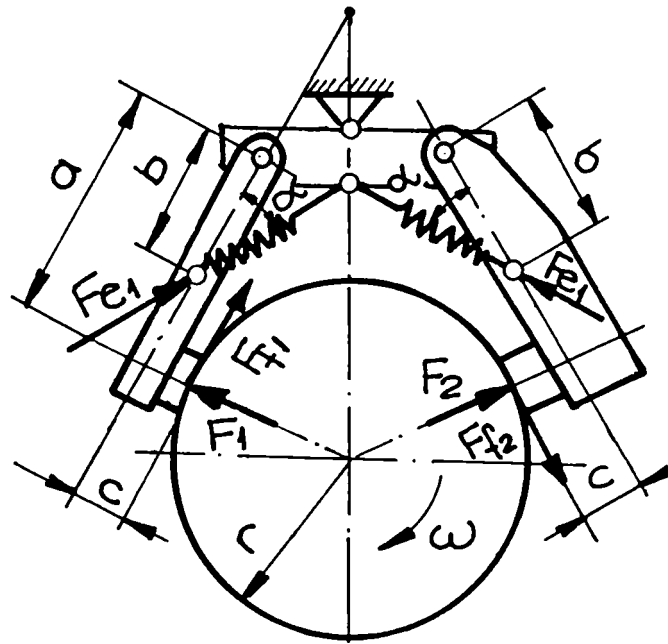


Fig. 3.20. Cuplă cu perii pereche

$$F_2 = \frac{F_e \cdot b \cdot \sin \alpha}{a + c \cdot f} \quad (3.74.)$$

$$M_{f2} = \frac{f \cdot F_e \cdot b \cdot r \cdot \sin \alpha}{a + c \cdot f} \quad (3.75.)$$

Momentul forțelor de frecare va fi în acest caz:

$$M_f = M_{f1} + M_{f2} \quad (3.76.)$$

$$M_f = \frac{2 \cdot f \cdot a \cdot F_e \cdot b \cdot r \cdot \sin \alpha}{a^2 - c^2 \cdot f^2} \quad (3.76'.)$$

Rezultă că $F_1 > F_2$, condiție favorabilă îndepărtării lubrifianului la funcționarea în mediu lubrificat.

Din analiza informațiilor din domeniu rămân deschise cercetării probleme referitoare la următoarele aspecte:

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

- ⇒ utilizarea unor materiale noi (aliaje, materiale sinterizate sau compozite) cu performanțe superioare,
- ⇒ miniaturizarea componentelor și a produselor din domeniul comutației,
- ⇒ creșterea fiabilității contactelor și garantarea unui număr sporit de comutări,
- ⇒ mărirea vitezelor de comutare, a sarcinilor specifice și perfecționarea mijloacelor de protecție.

Printre problemele rămase deschise cercetării pot fi menționate:

- ◆ evidențierea influenței microgeometriei (a rugozității) inelelor asupra rezistenței de contact,
- ◆ influența stick - slipului asupra rezistenței electrice de contact,
- ◆ influența vitezei relative și a presiunii asupra rezistenței de contact la unele materiale indigene,
- ◆ încălzirea și uzarea elementelor contactelor alunecătoare,
- ◆ cercetarea parametrilor contactelor alunecătoare pentru prelevarea informației,
- ◆ influența poziționării (a dispunerii) înclinate a periilor în raport cu direcția radială a inelelor la contactele electrice alunecătoare cu sens unic de rotație
- ◆ influența combinațiilor de perechi de materiale.

Capitolul 4. Instalații, echipamente experimentale și metodică de cercetare folosite la studiul comportamentului contactelor alunecătoare

4.1. Instalații și echipamente experimentale

4.1.1. Structura instalațiilor experimentale

Analiza factorilor principali care influențează rezistența electrică de trecere a contactelor alunecătoare necesită derularea unui program sistematic de încercări. Instalația proiectată și realizată acoperă cerințele pentru că permite modificarea, reglarea și măsurarea parametrilor cinematici, mecanici, tribologici și electrici ce intervin în astfel de investigații. La conceperea structurală a standului s-a avut în vedere ca obiectiv principal posibilitatea de modificare în limite largi a parametrilor amintiți pentru simularea cât mai fidelă a condițiilor reale de funcționare.

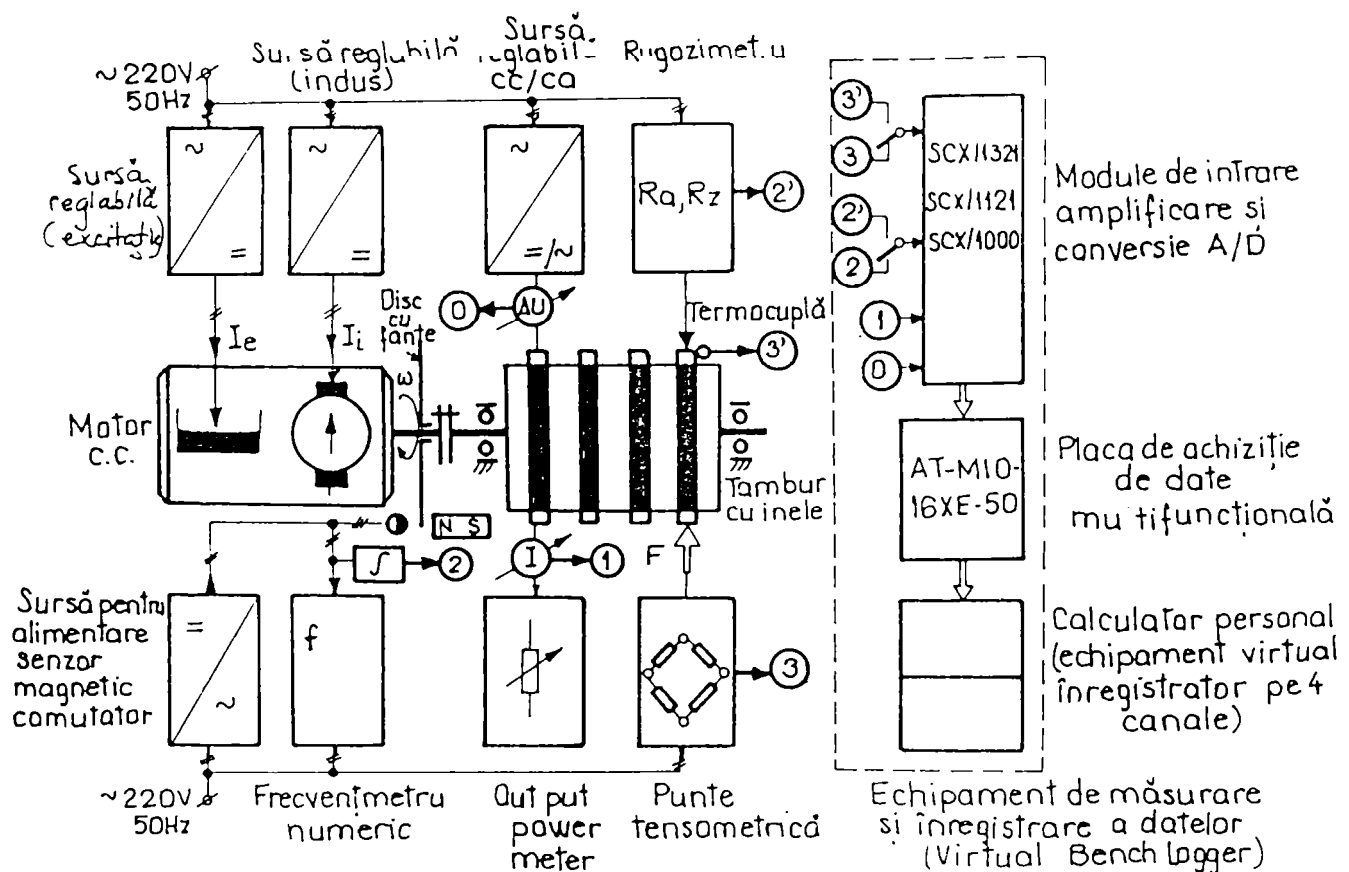


Fig.4.1 Schema bloc a instalației principale pentru studiul contactelor alunecătoare

S-a recurs la metode de comandă și reglare controlabile și stabile, la mijloace și metode de măsurare, înregistrare și prelucrare a informației cu echipamente și programe de calculator performante care asigură investigațiilor o precizie ridicată.

Structura sistemului de investigare este prezentată în figura 4.1.

Părțile componente ale schemei bloc sunt:

- sursele și sistemul de acționare electrică a instalației;
- ansamblul tambur cu inelele alunecătoare și suporturile cu periile de contact;
- montajul pentru măsurarea vitezei unghiulare a tamburului cu inelele colectoare;
- sistemul de tensionare și măsurare a forței de interacțiune perie-inel;
- măsurarea microgeometriei suprafețelor de contact;
- măsurarea temperaturii elementelor contactelor alunecătoare;
- montajul pentru reglarea densității curentului și măsurarea rezistenței electrice a contactului alunecător;
- sistemul de măsurare cu achiziție de date Virtual Bench Logger (modulele funcționale și placa de achiziție de date pentru prelucrarea informației prin PC).

În fotografia din figura 4.2. este prezentată o vedere de ansamblu a instalației experimentale.

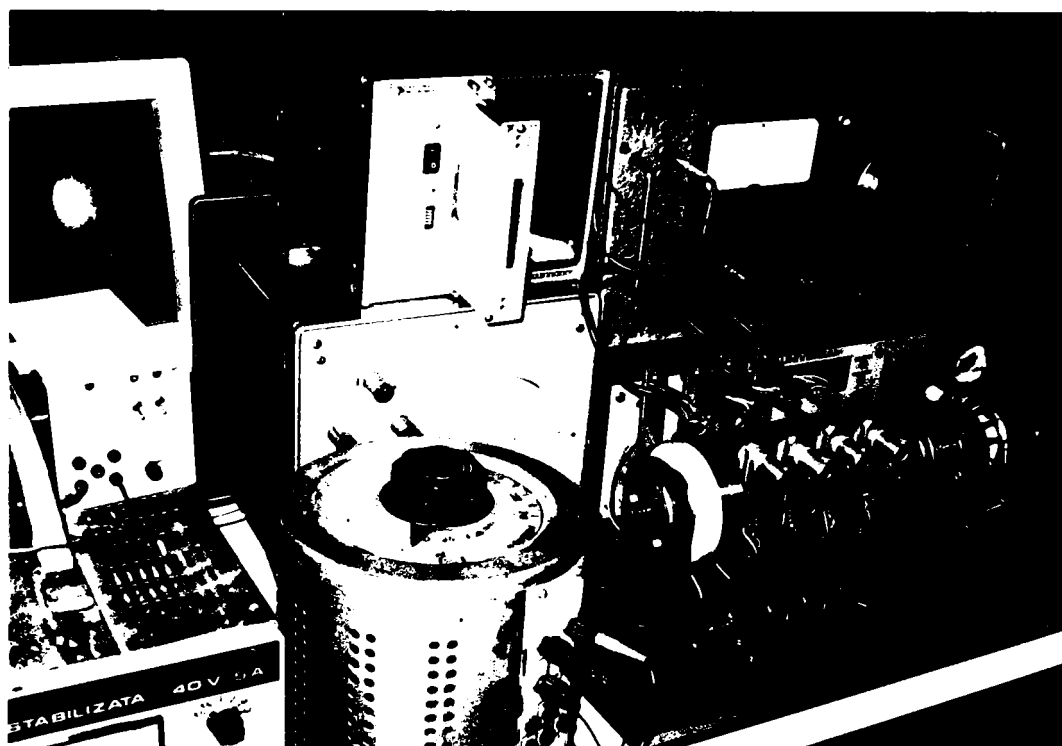


Fig.4.2. Instalația experimentală principală

4.1.2 Sistemul de acționare electrică

Ținându-se seama de particularitățile impuse cercetării contactelor alunecătoare (gamă largă și stabilă de reglare a vitezei unghiulare), s-a recurs la acționarea cu ajutorul unui motor de curent continuu cu excitație separată.

Reglarea vitezei în acest caz până la valoarea nominală a vitezei unghiulare (turației) se realizează prin modificarea tensiunii aplicate indusului (rotorului) motorului electric. Reglarea vitezei unghiulare peste valoarea nominală se obține prin scăderea fluxului, adică prin scăderea curentului de excitație.

S-a optat pentru motorul de curent continuu cu excitația independentă tip “Electrotehnica MSAR 10 E 100” care are următorii parametri:

- puterea nominală $P_n = 150 \text{ W}$;
- momentul de torsiune (cuplul) nominal $M_n = 3,6 \text{ Nm}$;
- turația nominală $n_n = 5000 \text{ min}^{-1}$;
- tensiunea nominală indus și excitație U_{in} și $U_{en} = 42 \text{ V}$;
- curentul nominal în indus $I_{in} = 4,5 \text{ A}$;
- curentul nominal de excitație $I_{en} = 0,4 \text{ A}$

Schema electrică de alimentare și reglare a vitezei este prezentată în figura 4.3.

Motorul electric este montat pe batiu în consolă prin intermediul unui suport. Îmbinarea demontabilă a motorului pe suportul propriu s-a realizat printr-un grup de patru șuruburi. Pe capătul arborelui motorului s-a fixat cu ajutorul unui știft transversal flanșa cuplajului elastic cu bolțuri și inele din cauciuc pentru compensarea abaterilor axiale și unghiulare. Cu cele trei șuruburi ale cuplajului elastic s-a montat și discul cu cele trei fante ale sensorului magnetic comutator.

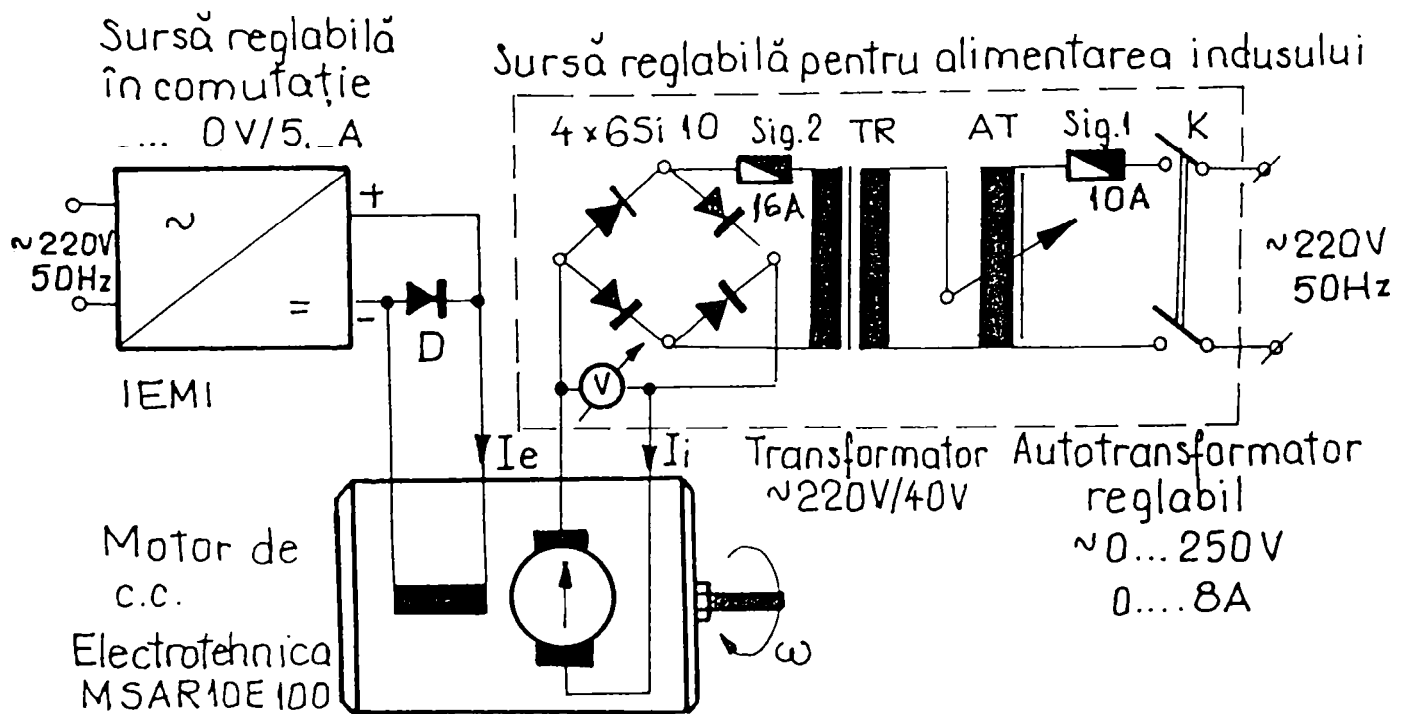


Fig. 4.3. Schema bloc a sistemului de acționare

4.1.3 Ansamblul tambur cu inelele alunecătoare și suportii periilor de contact

Pe tamburul cu lungime de 155 mm și diametrul de 95 mm sunt montate echidistant prin strângere câte patru perechi de inele din bronz și tot atâtea din oțel. Cotele inelelor sunt $\phi 95 / \phi 82 / 10$ mm.

Pentru asigurarea unei centrări foarte bune cu o bătaie radială mai mică de 40 μm (clasa VII-a de precizie conform STAS 7391/5-74) s-a montat pe arbore tubul izolat al tamburului printr-o centrare realizată cu o îmbinare demontabilă prin strângere pe suprafețe conice (figura 4.4.).

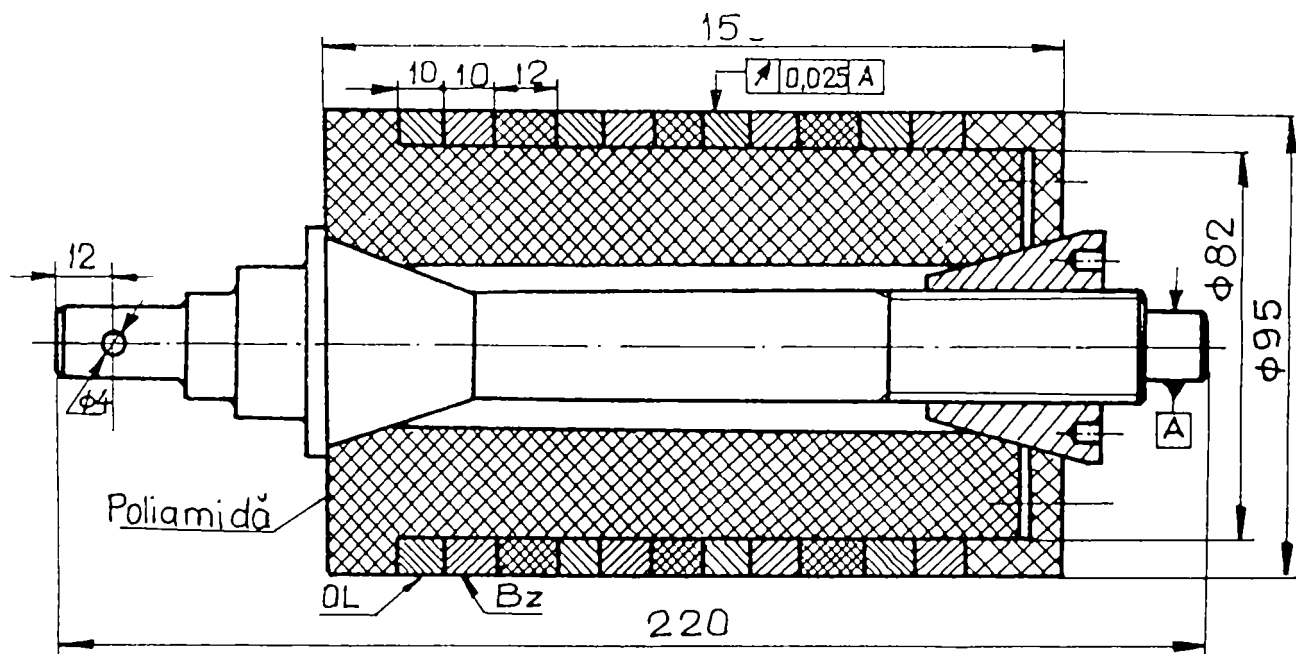


Fig.4.4 Schița tamburului cu inelele alunecătoare.
Secțiune și cote principale

Suporturile periilor de contact constituie ansambluri de câte patru pârghii articulate la unul din capete și dispuse diametral opus în raport cu tamburul. Capetele libere permit tensionarea contactului perie-inel cu ajutorul unor dispozitive de încărcare formate pentru fiecare pereche de suporturi dintr-un șurub de forță cu piuliță de reglaj la unul din capete și dintr-un arc elicoidal de compresiune la capătul opus. Șurubul de forță și arcul elicoidal sunt legate între ele printr-o lamelă de arc curbată preformată pe care sunt lipite timbrele tensometrice pentru măsurarea forței. În zona de mijloc a pârghiei este fixat demontabil suportul izolat al periei. Dimensiunile periei în secțiunea principală sunt de 8 x 8 mm. Periile utilizate la încercări sunt din fabricația ROFEP Urziceni (STR 1570/1/7-89), destinate echipării electromotoarelor auto Dacia și Olcit.

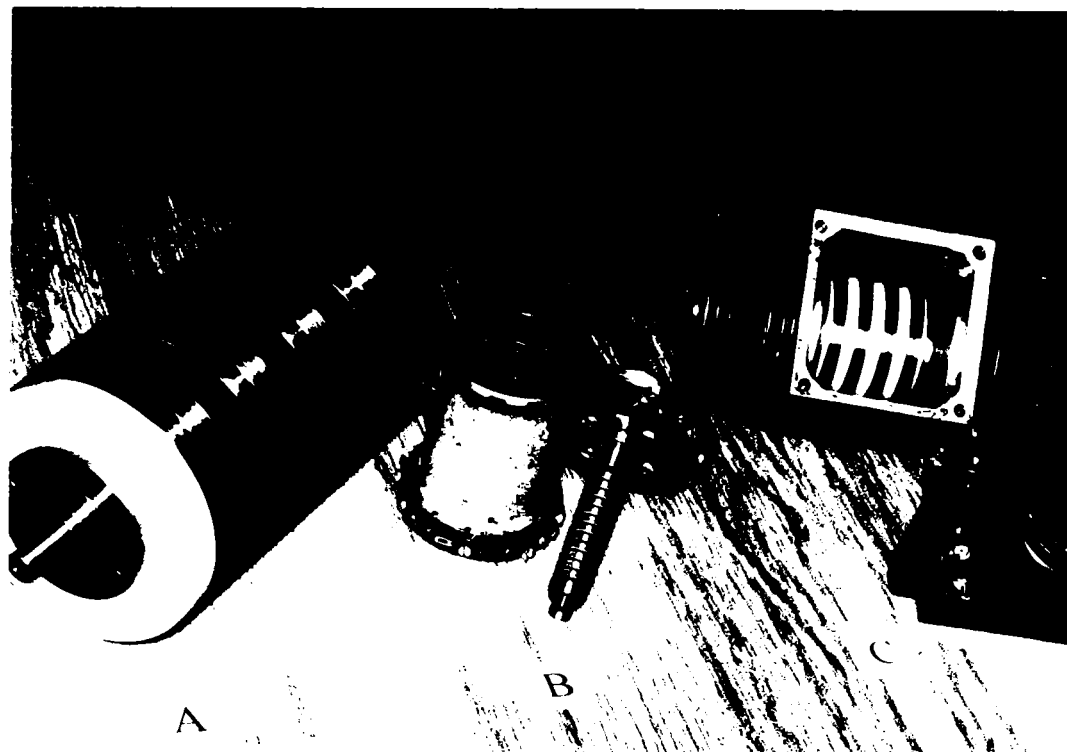


Fig.4.5 Ansambluri de sisteme cu inele colectoare

a. -tamburul standului de încercare; b. -rotorul cu 12 inele din Ag tip HBM SK12; c. -rotorul cuplei torsiometrice tensometrice model Philips PR 9520

Ansamblul blocului de perii al standului poate fi deplasat și fixat lateral cu câte 10 mm pentru trecerea contactului periiilor de pe inele din bronz pe cele din oțel și invers. Ansamblul blocului de perii poate fi deplasat și în direcție laterală, caz în care periiile pot fi dispuse în raport cu raza tamburului sub un unghi ce poate fi modificat în domeniul de $[-15^0 \dots +15^0]$.

4.1.4 Măsurarea vitezei unghiulare a tamburului cu inele colectoare

Instalația experimentală este prevăzută cu posibilitatea de măsurare a frecvenței mișcării de rotație (turației) cu ajutorul unui senzor magnetic comutator de tipul β SM 234, bazat pe efectul Hall. Soluția conferă datelor măsurării vitezei o înaltă precizie. În figura 4.6 este prezentată schema bloc a montajului senzor-echipament de măsurare.

Conversia D/A impusă de sistemul de achiziție de date este soluționată de un circuit integrator de tipul R-C. Etalonarea și măsurarea digitală directă a informației se realizează cu ajutorul unui numărător universal (frecvențmetru electronic) de tipul IEMI E 0202.

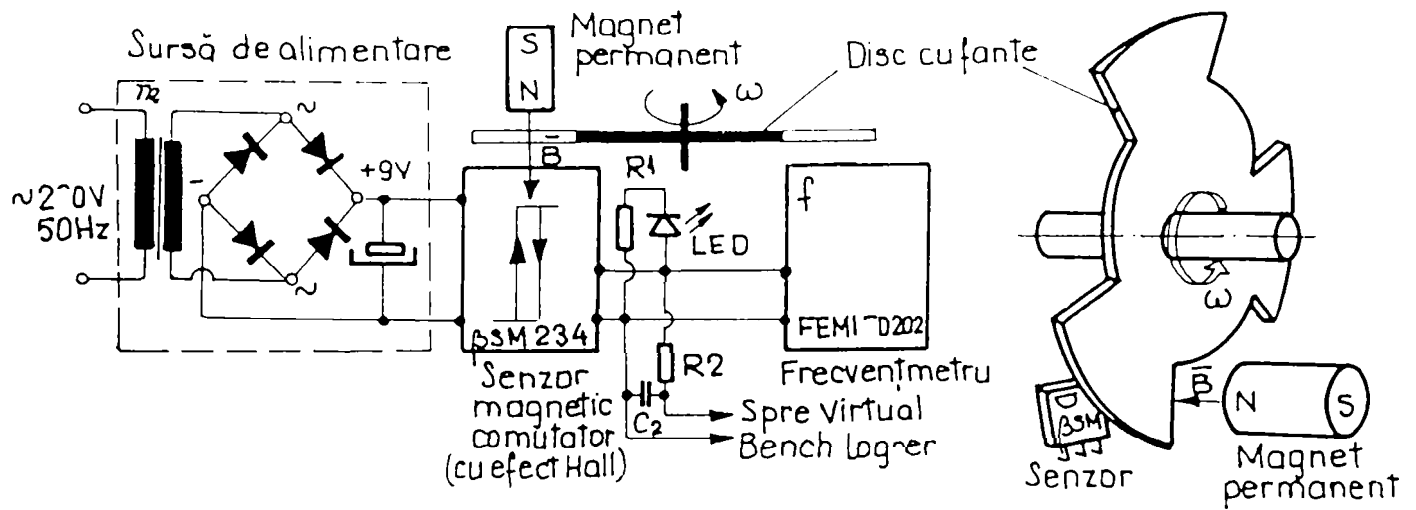


Fig. 4.6. Schema bloc pentru măsurarea vitezei unghiulare

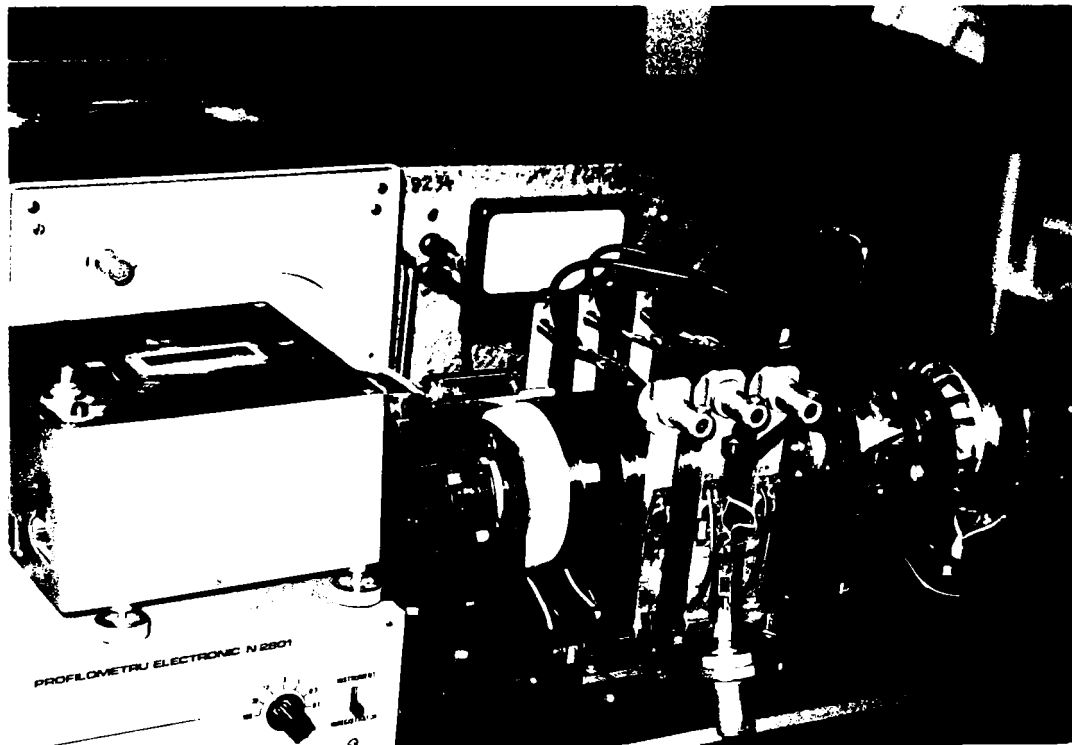


Fig.4.7. Vedere a sistemului de măsurare a vitezei cu senzor Hall

Între senzorul comutator și magnetul permanent de formă cilindrică s-a interpus un disc cu trei fante (cu diametrul de 90 mm și grosimea de 1 mm) confecționat din tablă de oțel. Montajul generează impulsuri astfel încât la fiecare salt al câmpului magnetic, adică la trecerea din starea “saturată” în starea “blocată” sau invers a triggerului Schmitt integrat în senzor numărătorul să contorizeze câte un impuls.

Alimentarea montajului este asigurată de către o sursă de curent continuu (redresor stabilizat de 9V / 0,5A).

4.1.5 Sistemul de tensionare și măsurare a forței de interacțiune perie-inel

La derularea programului experimental introducerea și prelevarea semnalului electric în și din contactul alunecător s-a realizat cu o pereche de perii identice poziționate diametral opus la periferia inelului. Pentru crearea unor condiții similare la intrarea respectiv ieșirea semnalului din contactele alunecătoare s-a impus condiția ca forțele de interacțiune, respectiv presiunile medii la nivelul celor două contacte să fie egale.

Soluția prezentată schematic în figura 4.8 satisface condițiile menționate mai sus. Forța de interacțiune este creată cu ajutorul unui mecanism cu șurub M6 în lungime de 50 mm. Tija șurubului este îmbinată la unul din capetele lamei dinamometrice printr-un știft transversal. La extremitatea opusă a lamei transmiterea forței se face printr-un arc elicoidal de compresiune, care permite pe de o parte o reglare fină a forței de apăsare, pe de altă parte o variație redusă a forței reglate cauzată de uzarea periiilor. Sistemul de tensionare acționează la extremitățile libere ale perechilor de pârghii port perii articulate.

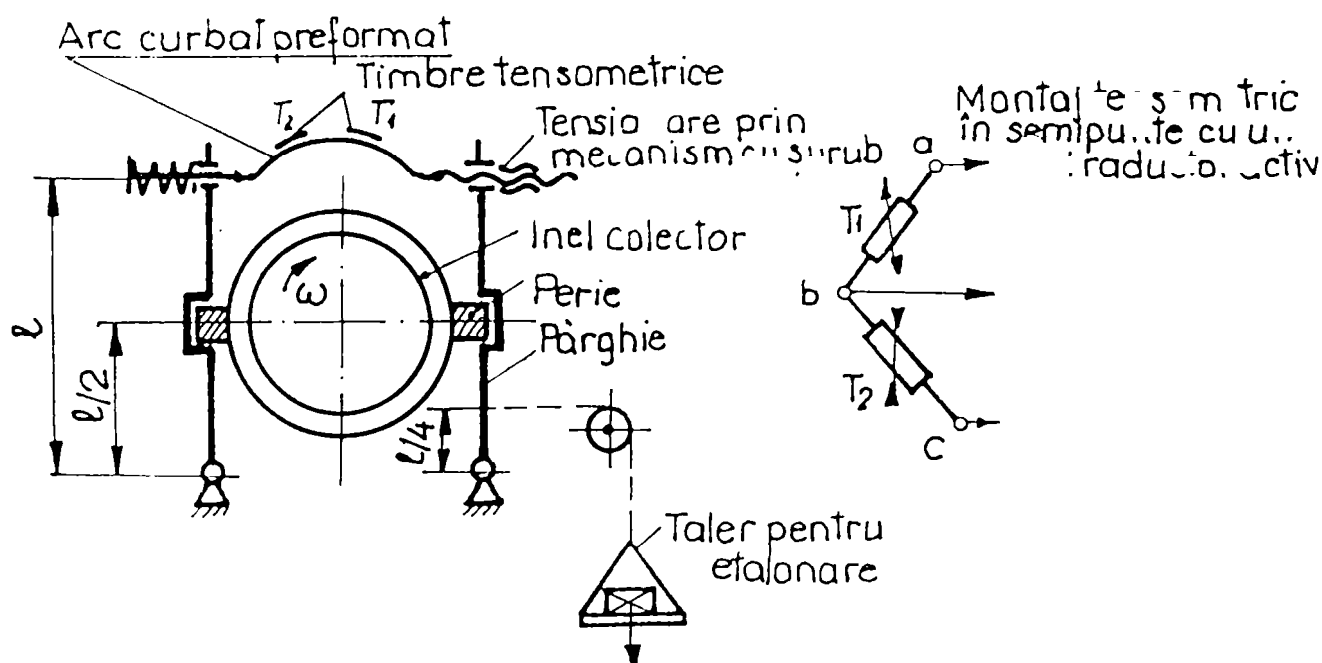


Fig.4.8. Schema de principiu a sistemului de tensionare și de măsurare a forței de interacțiune la nivelul contactului alunecător

Având în vedere că lungimea pârghiei între punctul de articulație și cel de aplicare a forței este de 140 mm iar periiile sunt poziționate față de punctul de articulație la o distanță de numai 70 mm adică la mijloc, rezultă că forța ce acționează asupra elementelor componente ale contactului alunecător este dublă față de forța reglată și măsurată la nivelul sistemului.

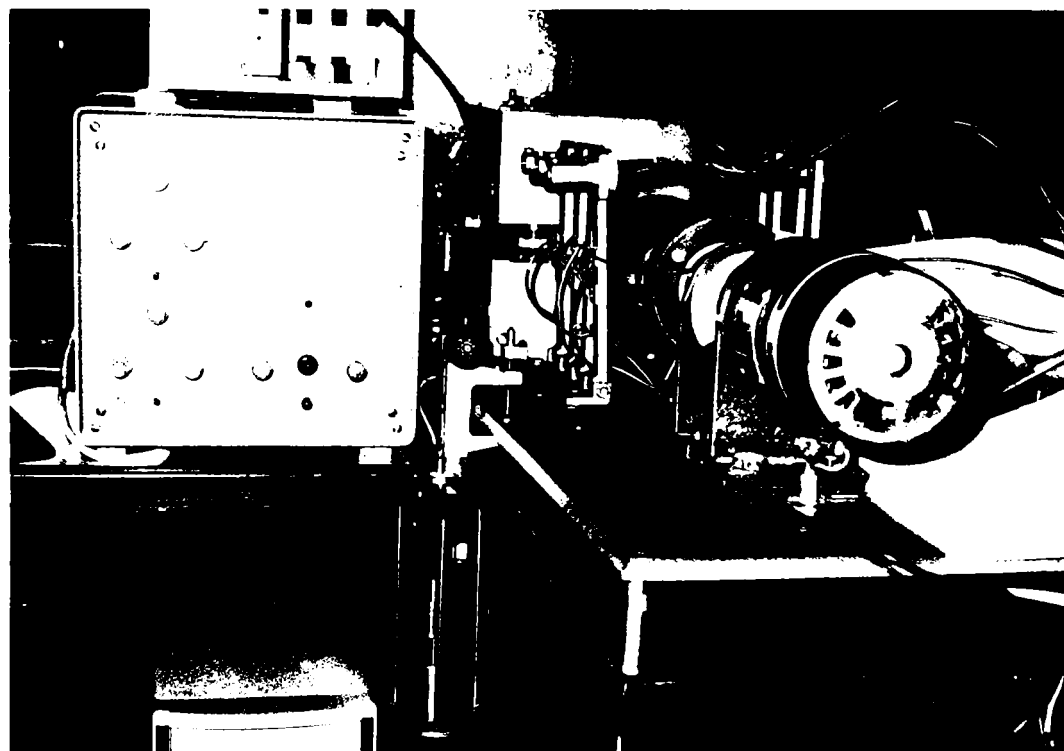


Fig.4.9 Montajul pentru etalonarea traductorului dinamometric tensometric

Măsurarea forței este realizată pe cale tensometrică rezistivă. Schema electrică de măsurare este în semipunte cu un traductor activ dispus longitudinal pe lamela din oțel arc iar traductorul compensator de temperatură este lipit transversal pe aceeași lamelă. Factorul de amplificare al montajului este în acest caz $1+\nu$ (ν - coeficientul lui Poisson) adică 1,3. Pentru creșterea sensibilității traductorului lamela elastică a fost adusă la forma de arc curbat preformat. Sistemul de tensionare și măsurare s-a multiplicat de patru ori pentru a crea posibilitatea efectuării de încercări simultane în condiții de tensionare dorite pe fiecare din seturile de contacte alunecătoare.

4.1.6. Măsurarea microgeometriei suprafețelor de contact

Măsurarea microgeometriei suprafețelor active ale inelelor colectoare s-a efectuat cu profilmetrul (rugozimetrului) electronic IEMI N 2801 prevăzut cu mecanismul de antrenare N 2801 M (figura 4.10). Semnalul analogic furnizat la ieșirea aparatului s-a cuplat la un canal de intrare al înregistratorului sistemului de achiziție de date.

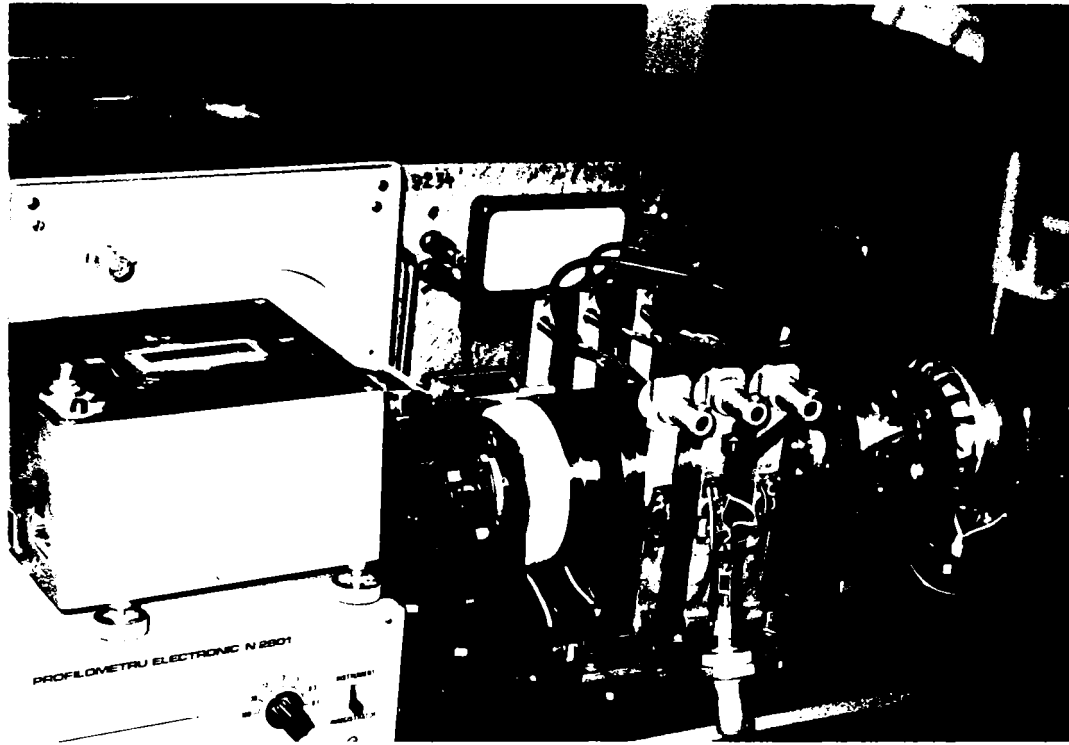


Fig.4.10. Vedere a montajului pentru măsurarea microgeometriei inelului

4.1.7. Măsurarea temperaturii elementelor contactelor alunecătoare

Pentru măsurătorile de temperatură s-a folosit o termocuplă miniaturală de tipul J (cu tensiunea de ieșire $-8,1 \text{ mV}$ la -210° C și $21,8 \text{ mV}$ la 400° C), conform schemei din figura 4.11.

Traductorul s-a cuplat la intrarea modulului de condiționare a semnalului din complexul de măsurare prevăzut cu sistemul de achiziție de date.

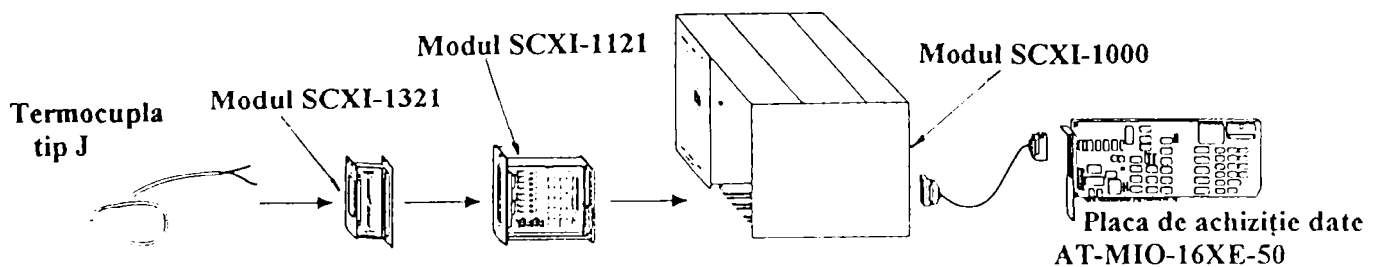


Fig. 4.11 Schema bloc pentru măsurarea temperaturii medii a periilor și inelelor

Conșiderații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

4.1.8. Montajul pentru reglarea densității curentului și măsurarea rezistenței electrice a contactului alunecător

Rezistența ohmică medie de contact s-a determinat prin raportarea valorilor măsurate pentru căderea de tensiune la intensitatea curentului electric de trecere prin cele două contacte alunecătoare înseriate. Montajul permite efectuarea măsurătorilor atât în curent continuu cât și în curent alternativ (la frecvența rețelei de 50 Hz sau 5 kHz în cazul frecvenței purtătoare furnizată de punțile tensometrice).

Valorile efective cât și cele momentane pot fi măsurate direct cu aparate adecvate sau înregistrate cu echipamentul de achiziție de date conform schemei de bloc din figura 4.12. Sursele de alimentare au fost astfel selectate încât să permită investigarea comportamentului contactelor alunecătoare la valori stabilite pentru densitățile de curent. Aceste densități se pot modifica fie prin reglarea fină a tensiunii sursei de alimentare, fie prin schimbarea în trepte a rezistenței de sarcină.

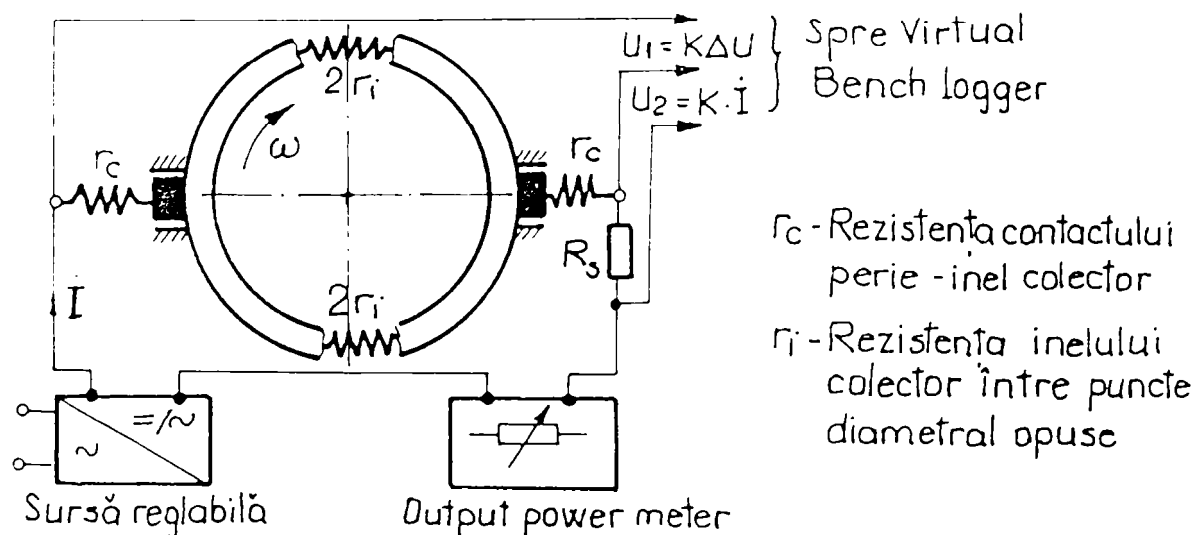


Fig.4.12 Măsurarea parametrilor electrice la contactele alunecătoare

4.1.9. Sistemul de măsurare cu achiziție de date Virtual Bench Logger

Echipamentul de măsurare universal de înaltă performanță utilizat în cadrul programului experimental permite măsurarea prin intermediul traductoarelor și a senzorilor a unui important număr de mărimi fizice. Schema bloc a echipamentului este prezentată în figura 4.13.

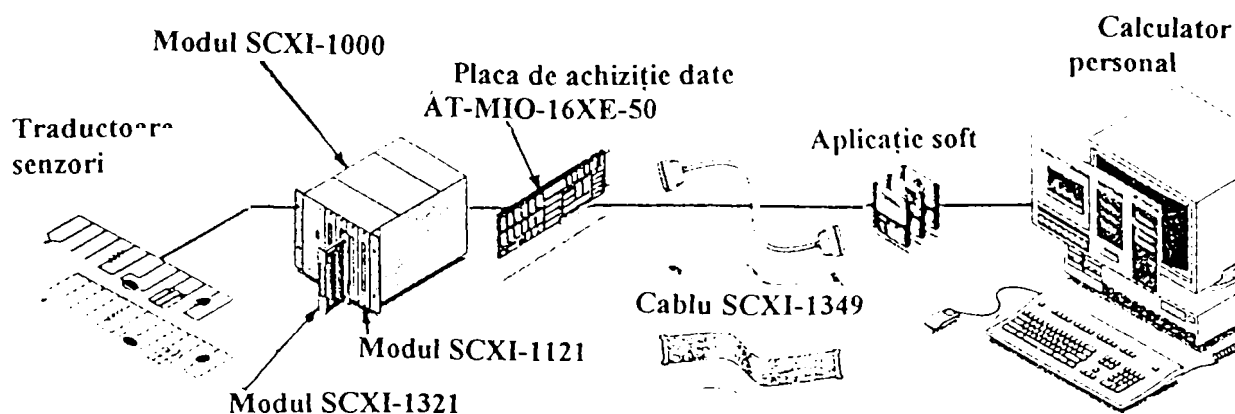


Fig.4.13 Schema bloc a sistemului de achiziție de date Virtual Bench Logger

Funcțiile și caracteristicile blocurilor sunt:

-modulul SCXI-1321 bloc terminal special pentru punți tensometrice care permite reglarea la zero a offsetului și calibrarea șuntului pentru punțile tensometrice;

-modulul SCXI-1121 bloc intermediar care permite măsurarea simultană pe patru canale a unor semnale ce nu pot depăși 250 Vrms. Modulul oferă patru surse izolate de excitație în curent sau tensiune continuă cu 3,33V sau cu 10V pentru măsurători tensometrice sau termice cu termorezistențe. Amplificarea programabilă în trepte acoperă intervalul [1...2000];

-modulul SCXI-1000 reprezintă șasiul prevăzut pentru patru module de intrare. Prin acesta se asigură mediul ecranat pentru condiționarea semnalelor, asigurarea alimentării blocurilor prin sursă de zgomot redus, răcirea forțată a echipamentului și conectarea modulelor spre placa de achiziție de date prin trei bus-uri (magistrale) de semnale interne;

-modulul AT-MIO-16XE-50 constituie blocul de bază al sistemului, adică placa de achiziție de date multifuncțională. Prin aceasta se pot asigura 16 canale de intrare analogice de 16 bit, 2 canale de ieșire analogice de 12 bit, 8 canale digitale Input/Output, TTL și 2 counter/timer la 20 MHz. Placa include și drivere pentru softul de configurare NI-DAC sub Windows 95.

Aplicația soft Data Logger multicanal este preluată de pe compact disc. Placa de achiziție de date s-a instalat într-un calculator personal prevăzut cu CD-ROM 24X, al cărui RAM este de 32 Mb, cu hard de 2,1Gb și care funcționează cu frecvența de tact de 233 MHz.

4.1.10. Stand pentru încercarea contactelor alunecătoare pentru prelevarea informației de la traductoare și senzori

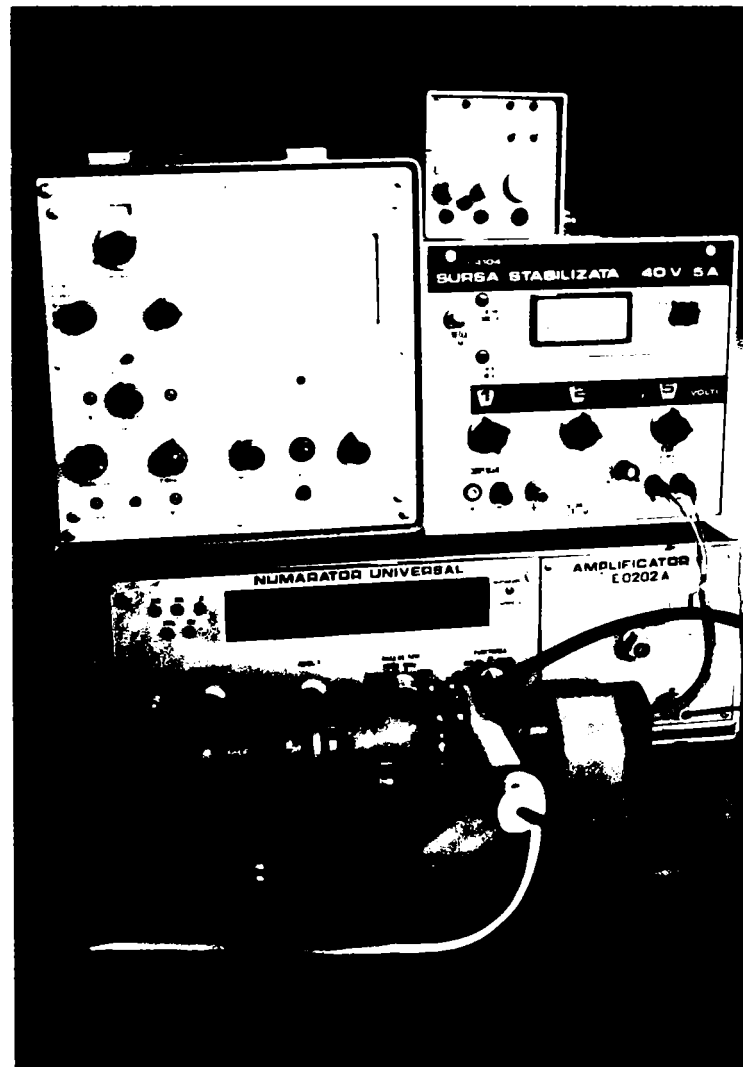


Fig. 4.14 Standul pentru încercarea contactelor pentru prelevarea informației

Structura instalației experimentale pentru prelevarea informației din figura 4.14 este asemenea celei pentru standul a cărei schemă bloc este prezentată în figura 4.1.

Ansamblul celor 12 contacte alunecătoare supuse încercărilor prezintă particularități în privința materialelor (inele din argint, perii din grafit cu argint), prin valori reduse ale densității curentului, fie că este continuu sau alternativ, prin limitarea încălzirii la temperaturi mai mici de 70°C și datorită limitării vitezei periferice la cel mult 30 m/s. Puterea mecanică necesară acționării standului este de 50 W.

Măsurarea vitezei unghiulare este realizată prin reflexie, cu ajutorul sistemului optoelectronic LED-fototranzistor. În montajul de măsurare circuitul integrat formator al semnalului digital este $\beta\text{E } 555 \text{ N}$.

4.2. Metodica de cercetare

4.2.1. Condiții necesare realizării investigațiilor experimentale

Investigarea comportamentului contactului electric alunecător presupune:

a) posibilitatea de modificare în limite largi :

-a **presiunii p** exercitate la nivelul contactului perie inel. În acest scop sistemul de tensionare acoperă domeniul de valori cerut de programul experimental.

Controlul forței de apăsare și implicit a presiunii de contact este asigurată de traductorul dinamometric format din arcul lamelar curbat preformat pe care s-au lipit două timbre tensometrice HBM de 120 Ohmi cu baza de 1,5 mm. Pentru calibrarea traductorului dinamometric se utilizează montajul prezentat principial în figura 4.8 unde la capătul firului trecut peste un scripete fix, centrat printr-un rulment radial se află talerul cu greutatea calibrate. După etalonare montajul permite modificarea și măsurarea continuă a forței, respectiv a presiunii la nivelul contactului electric alunecător. Sistemul de încărcare poate dezvolta o forță necesară cuprinsă în intervalul [0...12,8] N căreia îi corespunde o presiune medie ce poate fi modificată în domeniul de [0...0,2] MPa. Prin faptul că valorile limită superioare depășesc de [5...6] ori valorile medii uzuale folosite în exploatare, investigația poate fi extinsă și pentru studierea comportării contactelor alunecătoare în condiții grele din punct de vedere al stării de tensiune;

-a **vitezei unghiulare ω (a turației n) relative** la nivelul contactului perie-inel. Schema electrică din figura 4.3 evidențiază faptul că motorul de curent continuu cu excitația independentă răspunde necesităților în cele mai bune condiții. Controlul vitezei se face cu o mare precizie conferită de metoda și sistemul de măsurare digital (senzor magnetic comutator, disc cu fante și frecvențmetru numeric). Structura blocurilor de alimentare indus-excitație permite reglarea și controlul vitezei unghiulare în limitele foarte largi cuprinse în domeniul [0...700] s⁻¹ (corespunzător unei turații de cca 0...7000 min⁻¹) adică la viteze periferice care pot atinge 70 m/s;

-a **densității curentului j** prin contactul electric. Măsurarea rezistenței de contact în acest caz se face indirect și anume prin raportarea căderii de tensiune la intensitatea curentului electric ce străbate contactul alunecător. Măsurarea parametrilor tensiune-curent se asigură prin aparate electronice de măsură iar informația este înregistrată cu ajutorul echipamentului computerizat. Densitatea de curent rezultă prin raportarea valorii intensității curentului electric ce străbate contactul la aria acestuia practic numeric egală cu aria periei. În programul experimental modificarea densității curentului electric se obține prin două modalități:

-pentru o rezistență de sarcină constantă fixată la comutatorul output power meter-ului, se modifică tensiunea sursei de alimentare sau

-la o tensiune de alimentare fixată în curent continuu sau alternativ (la 50 Hz respectiv 5 kHz), prin modificarea valorii rezistenței de sarcină a output power meter-ului sau prin schimbarea valorii în cazul folosirii decadelor de rezistențe. Montajul electric poate asigura modificarea densității de curent până la valori de ordinul a $2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ valoare ce depășește de [5..15] ori valorile densităților de curent întâlnite în exploatare;

b) controlul periodic al stării:

-din punct de vedere **micro- și macrogeometric al suprafețelor** elementelor de contact. Măsurarea toleranțelor la circularitate și la cilindricitate (STAS 7391/2-74), toleranța la coaxialitate (STAS 7391/4-74), precum și toleranța bătăii radiale (STAS 7391/5) se realizează cu dispozitivări prevăzute cu comparatoare de precizie (fig.4.15) iar starea suprafețelor de contact îndeosebi a inelului, cu ajutorul unui rugozimetru electronic cuplat la sistemul de măsurare computerizat. Măsurătorile se repetă după un anumit ciclu de funcționare;

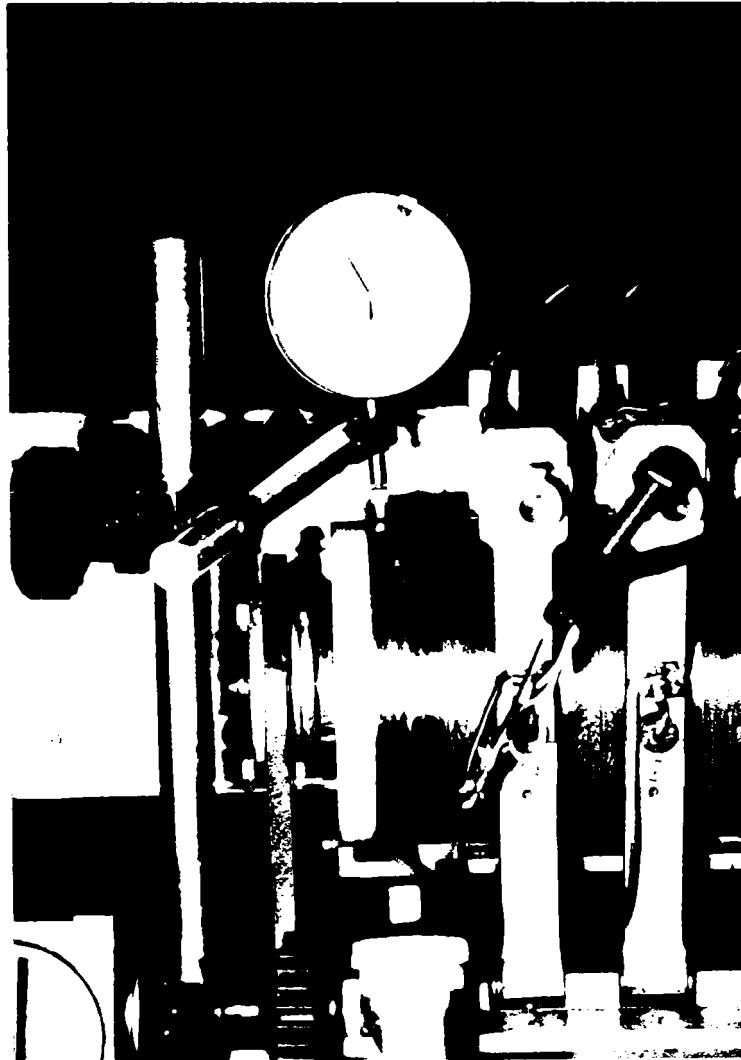


Fig.4.15 Măsurarea bătăii radiale a tamburului cu inelele alunecătoare



- de încălzire prin măsurarea **temperaturii medii** a elementelor de contact. În acest scop măsurarea temperaturii se realizează periodic cu ajutorul termocuplei miniaturale de tipul J. Informația prelevată și înregistrată pe unul din canalele echipamentului de măsură scoate în evidență intensitatea procesului disipativ care se află în strânsă corelație cu durabilitatea contactului alunecător. Trebuie remarcat faptul că temperaturile admisibile în exploatare sunt limitate la valori de [100...110]⁰C în cazul periilor pe bază de grafit și a colectoarelor din cupru sau a aliajelor acestuia, respectiv maxim [60...70]⁰C în cazul periilor din grafit cu argint și a inelelor din argint sau a aliajelor acestuia;

-prin exercitarea **influenței mediului** asupra parametrilor electromecanici și tribologici. Prezintă un interes aparte acele cazuri mai rar întâlnite în exploatare la care contactul electric trebuie să funcționeze în mod nedorit fie în mediu lubrificat fie în mediu agresiv poluat din punct de vedere fizico-chimic (praf, fluide agresive etc.)

4.2.2. Particularități determinante desfășurării cercetărilor experimentale

În funcție de destinația și de particularitățile constructiv-funcționale, contactele electrice alunecătoare se împart conform clasificării prezentate în figura 1.2. în trei grupe distincte:

-**pentru prelevarea informației de la traductoare sau senzori** aflați în mișcare relativă de rotație sau translație în raport cu echipamentul staționar de măsurare înregistrare și prelucrare a datelor. În acest caz cerințele de bază vizează asigurarea pentru contactul electric al unor proprietăți și calități dintre cele mai bune. Prin aceasta se înțelege crearea unei valori cât mai scăzute a rezistenței de contact și o fluctuație minimă a valorii acesteia. Se știe că variația rezistenței contactului alunecător poate fi principala sursă de zgomot în semnalul de informație. În cadrul încercărilor se ține seama de faptul că densitățile de curent transferate prin contactele destinate vehiculării informației, confecționate pe bază de metale nobile (aur, argint, grafit argintat etc.) au cele mai scăzute valori, acestea situându-se la nivelul miliamperilor sau cel mult al zecilor de miliamperi pe mm².

Trebuie să se țină seama că pe lângă funcționarea în curent continuu sau alternativ la frecvența rețelei în numeroase aplicații ca cele din cadrul tensometriei electrice rezistive sau a măsurării cu traductoare inductive contactele funcționează la frecvențe de 5 kHz, valoare standard a frecvenței purtătoare a celor mai multe echipamente tensometrice. Pentru micșorarea uzării aceste tipuri de contacte sunt amovibile, adică sunt acționate (contact închis) doar în perioada efectuării măsurărilor. Menținerea calității contactului impune includerea acestora în carcase

etanșate sau protejate. Caracteristică acestor contacte ce pot funcționa la cele mai ridicate turații este aria relativ mică atât a periilor de contact, cât și a razelor exterioare ale inelelor;

-pentru transferul semnalelor de comandă și reglare. Condițiile impuse acestor categorii de contacte se situează în zona intermediară între contactele alunecătoare folosite pentru măsurători și cele destinate transmiterii energiei electrice între surse și consumatori. Materialele elementelor de contact nu ridică pretenții deosebite. Specifice domeniului sunt inamovibilitatea contactului și densitățile de curent relativ scăzute.

-pentru transferul energiei electrice de la surse spre consumatori. Condițiile privitoare la calitatea rezistenței de trecere a contactului nu sunt atât de severe ca la cele din prima categorie. La acestea prioritatea se referă la siguranța în funcționare și garantarea durabilității prognozate. Densitățile mari ale curentului însoțite de efecte termice importante, descărcările electrice provocate de fenomenele de autoinducție ce provoacă uzura prin eroziune electrică și procesele complexe tribologice sunt principalele cauze de scoatere din uz a acestor categorii de contacte.

4.2.3. Etapele pregătitoare ale programului de încercări

După alegerea materialelor pentru perii respectiv inele, după uzinarea și montarea acestora ca și componente ale modelelor experimentale, programul pregător pentru efectuarea încercărilor se derulează etapizat după cum urmează:

- a. se controlează dimensiunile principale, apoi se măsoară bătaia radială a inelelor montate pe tamburul de încercare a standului;
- b. se măsoară rugozitatea pe circumferință, respectiv pe direcția generatoarei;
- c. se verifică dimensiunile principale ale periilor; dacă este necesar acestea se ajustează, apoi se montează în suporturi și se conectează la sursa, respectiv sarcina din circuitul electric;
- d. calibrarea traductorului tensometric se efectuează cu ajutorul sistemului format din scripete-taler-greutăți. Pentru diferite încărcări valorilor citite la instrumentul de afișare a datelor punții tensometrice se obțin valori ce permit trasarea dependențelor diviziuni/N respectiv diviziuni/MPa pentru măsurarea forței de interacțiune, respectiv pentru determinarea presiunii medii dintre perie și inelul colector;
- e. pentru etalonarea sistemului de control a vitezei blocurile redresoare comandate ale motorului se cuplează la rețea, apoi tensiunea aplicată la bornele indusului se modifică convenabil pentru baleierea domeniului de viteze sub valoarea nominală. În tot acest timp, înfășurarea de excitație este alimentată la tensiunea nominală. Creșterea turației peste valoarea sa nominală (5000 min^{-1}) se obține prin scăderea fluxului, adică prin micșorarea tensiunii respectiv a curentului de

excitație, menținându-se tensiunea de la bornele indusului la valoarea nominală de 42 V;

- f. pentru calibrarea traductorului de viteză (format din senzorul comutator magnetic cu efect Hall, discul cu fante și magnetul permanent) elementul etalon utilizat a fost numărătorul electronic universal IEMI E 0202. Pentru a putea fi înregistrat și prelucrat, semnalul de viteză generat de traductor sub formă digitală a fost convertit D/A cu ajutorul circuitului integrator RC;
- g. măsurătorile de temperatură cu ajutorul microtermocuplei J nu necesită etalonare prealabilă. Sistemul de înregistrare a informației Virtual Bench Logger impune doar efectuarea setării corespunzătoare în programul de măsurare a temperaturii.

Etapele pregătitoare pentru încercările cu ajutorul standului pentru prelevarea informației sunt practic identice cu cele prezentate mai sus.

4.2.4. Observații preliminare la stabilirea programului de cercetări experimentale

Metodologia de investigare a contactelor electrice alunecătoare nu depinde de particularitățile constructive, structurale sau de rolul funcțional. În toate cazurile cerințele de natură electrică sunt opuse celor tribologice, mecanice respectiv termice.

Cu cât presiunea medie este mai mare la nivel microgeometric numărul punctelor constituente ale contactului crește, aria efectivă de trecere a purtătorilor de sarcină se mărește, în consecință rezistența electrică scade. Pe de altă parte, prin creșterea presiunii de contact cresc forțele de frecare, lucrul mecanic al acestor forțe, deci procesul disipativ.

Valoarea temperaturii măsurate constituie un indiciu al mărimii energiei de dislocație. Această energie influențează în mod determinant mărimea intensității procesului de uzare. Prin controlul temperaturii medii se poate limita disipația energetică la o valoare convenabilă ce nu periclitizează funcționarea și durabilitatea contactului electric. Ignorarea creșterii temperaturii peste limita stabilită pe cale experimentală (devenită ulterior recomandare) duce fără îndoială la uzarea prematură chiar la distrugerea rapidă atât a periilor cât și a inelelor.

La contactele alunecătoare destinate vehiculării informației creșterea temperaturii provoacă creșterea rezistenței de contact și a fluctuației valorii acesteia, deci a zgomotului cauzat în primul rând de încălzire.

Procesul disipativ este puternic influențat în sens defavorabil și de creșterea vitezei relative perie-inel. Uneori chiar la viteze reduse se instalează regimuri defavorabile contactului cauzate de apariția fenomenului de stick-slip. Stăpânirea fenomenelor de conducție electrică la contactele alunecătoare, procesele de frecare-

uzare cu toate consecințele, stabilirea unor regimuri de funcționare optimizate din punct de vedere electromecanic constituie priorități ale cercetării în domeniu.

4.2.5. Obiectivele programului de cercetare

Cercetarea are ca obiectiv principal investigarea influenței parametrilor electromecanici și tribologici în vederea stabilirii regimurilor funcționale care asigură optimizarea calității și durabilității contactelor electrice alunecătoare.

Pentru **contactele electrice alunecătoare destinate prelevării informației** (inele din argint, perii din grafit cu argint) se analizează influența vitezei periferice asupra valorii medii a rezistenței de contact și a fluctuației acesteia.

Determinările vizează funcționarea la viteze periferice reduse ($v < 0,5$ m/s), la viteze periferice medii ($v \in [0,5...5]$ m/s), respectiv la valori mari ale vitezei periferice ($v > 5$ m/s). Încercările se execută atât în curent continuu cât și în curent alternativ la frecvența standard de 5 kHz. Se determină în toate cazurile pentru presiuni de contact optime dependența de viteză a momentelor de frecare pentru pachetul de contacte alunecătoare. Măsurătorile se efectuează pe modelul format din ansamblul de contacte alunecătoare HBM Schleifringkopf SK 12. Pentru a se putea face o analiză comparativă se execută un program similar de măsurători în curent continuu și curent alternativ și asupra contactelor alunecătoare de mici dimensiuni, realizate cu perii din grafit și inele din bronz, care pot funcționa cu rezultate satisfăcătoare în aplicații orientate pe transferul semnalelor de comandă și reglare.

Pentru **contactele electrice alunecătoare destinate transferului energiei electrice de la surse la consumatori** formate din perii din grafit cu cupru și inele din bronz (soluția cu cea mai mare răspândire în aplicațiile practice) se analizează:

-influența stick-slipului asupra rezistenței de contact la viteze relative mici la care poate apare acest fenomen. Analiza modalității de evitare a stick-slipului prin modificarea orientării axei periei în raport cu direcția radială a inelului colector;

-căderea de tensiune pe contactul alunecător în funcție de densitatea curentului electric, de presiunea exercitată și de viteza relativă;

-încălzirea periilor și inelelor colectoare datorată proceselor disipative electrice cumulate cu cele de natură mecanică în funcție de densitatea curentului electric, de presiunea de contact și de viteza relativă dintre suprafețele conjugate;

-încălzirea produsă exclusiv prin procese disipative de frecare dependente de presiunea medie de contact și de viteza relativă la nivelul contactului alunecător;

-dependența rezistenței de contact și fluctuația valorii acesteia funcție de densitatea curentului, de starea de tensiune și de viteza relativă de alunecare;

-determinarea coeficientului specific de uzare a periei k_{up} în funcție de densitatea curentului electric și de puterea disipată specifică $(f.p.v)_{ef}$;

-determinarea influenței vitezelor relative foarte mari asupra condițiilor de realizare a contactului electric; studiul cauzelor care limitează funcționarea contactelor alunecătoare la viteze relative foarte mari.

Derularea programul de încercări oferă datele necesare stabilirii parametrilor funcționali care asigură calitate optimă contactului electric alunecător în condiții de îndeplinire a durabilității impuse.

Capitolul 5. Încercări experimentale

5.1 Obiectivele cercetării experimentale

Varietatea extrem de mare de materiale care stă la baza fabricației periilor colectoare este justificată de cerințele funcționale ale mașinilor, mijloacelor de transport, utilajelor, automatelor tehnologice pentru servirea sau controlul, elementelor constructive pentru automatizare și ale aparatelor de măsurat, ce înglobează în structură variate soluții de contacte alunecătoare. Este suficientă menționarea categoriilor de materiale, cum ar fi: metalele nobile, grafitul cu argint, grafitul sinterizat cu bronz sau cu alte metale, respectiv aliaje ce conțin adaosuri pentru ameliorarea comportamentului tribologic, cărbunele dur (având la bază cocsul), cărbunele cu grafit cu sau fără liant sintetic, grafitul natural și altele.

În privința inelelor colectoare varietatea de materiale este mult redusă. În această categorie predomină aliajele argintului, cuprul electrolitic, brozurile și oțelul utilizat relativ rar, fiind preferat când funcționarea are loc în mediu lubrificat.

Cu toate că pentru materialele care stau la baza fabricației periilor unele proprietăți fizico-mecanice diferă în limite largi, ca de exemplu rezistivitatea electrică $\rho_e \in [0.1 \dots 200] \mu\Omega \cdot m$, densitatea $\rho \in [1,18 \dots 7,7] \text{ kg/dm}^3$ sau duritatea $HB \in [10/20-60 \dots 10/100-100]$, parametrii funcționali se încadrează în domenii de existență relativ restrânse. Astfel densitatea admisibilă a curentului electric “j” variază până la valori de cel mult $(0,1 \dots 0,2) \text{ A/mm}^2$, presiunea medie perie-inel $p_{med} \in [20 \dots 40] \text{ kPa}$ iar vitezele relative depășesc de puține ori valorile limită de ordinul $v \in [30 \dots 40] \text{ m/s}$.

Este de remarcat faptul că în cadrul parametrilor funcționali normali amintiți căderea de tensiune pe contactul alunecător se situează într-un domeniu de valori relativ restrâns $\Delta U \in [0,2 \dots 1,5(2)] \text{ V}$. Fac excepție contactele aparatelor de măsurat realizate cu metale nobile, la care căderea de tensiune chiar și la densități semnificative ale curentului electric se situează doar la nivelul zecilor sau cel mult a sutelor de milivolți.

Pentru a putea răspunde unor probleme ce decurg din constatările menționate, programul experimental își propune să analizeze cu prioritate contactul alunecător realizat cu peria produsă și utilizată pe scară largă în țară, a cărei compoziție este dintre cele mai reprezentative domeniului. Acest material este folosit la toate contactele alunecătoare ale generatoarelor și motoarelor electrice ce echipază automobilele autohtone (Dacia, Olcit și ARO), precum și în alte aplicații din domeniul automatizărilor. Producător unic este S.C. ROFEP S.A. Urziceni, firmă specializată în realizarea de perii colectoare, memorii cu ferite, materiale pentru

circuite magnetice și magneți permanenți, precum și diferite alte produse realizate prin sinterizare.

Principalele caracteristici mecanice ale materialelor pentru perii sunt:

-densitatea $\rho \in [4,1 \dots 4,6]$ kg/dm³;

-duritatea HB 10/60 minim 65;

-compoziția: pulbere de cupru, grafit natural, pulbere de plumb și bisulfură de molibden.

Pentru a compara elementele specifice contactelor alunecătoare pentru transmiterea energiei și pentru transferul informației s-au determinat experimental și unii parametri calitativi ai contactului alunecător realizat cu perii din grafit cu argint și inele din argint. Încercările s-au efectuat asupra unui produs profesional și anume blocul de 12 contacte alunecătoare SK12 HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik).

Programul de încercări include și un studiu comparativ privind coeficienții de frecare proprii contactelor realizate cu perii sinterizate pe inele din bronz, respectiv perii din grafit pe inele din oțel.

5.2 Etalonarea dinamometrelor standului de încercări

Etalonarea celor patru dinamometre tensometrice cuplate la puntea de măsurare UM111 s-a efectuat cu greutăți calibrate aplicate pe talerul instalației de etalonare schițată în figura 4.8 și prezentată în fotografia din figura 4.9. Pentru creșterea preciziei s-a recurs la încărcarea sistemului de etalonare printr-o pârghie de clasa a II-a cu raportul 1/2, operația fiind făcută prin încărcări și descărcări succesive. Valorile obținute și prelucrate sunt prezentate în fișa de măsurători din figura 5.1. Domeniul de variație al forței de încărcare s-a acceptat de așa manieră, încât prin etalonarea sistemului de măsurare să poată fi făcute încercări până la presiuni de contact ce depășesc de (2...2,5) ori valorile uzuale. S-a avut în vedere totodată și posibilitatea de efectuare a investigațiilor în cadrul programului de simulare a funcționării la valori coborâte ale presiunii medii de contact, pentru a se analiza comportamentul contactului în regimuri funcționale situate în afara celor recomandate de literatura de specialitate.

După cum era de așteptat caracteristicile forță-deformație ale celor patru dinamometre realizate din oțel arc au caracter liniar, deși prezintă mici diferențe.

5.3 Măsurarea rugozității

Pentru măsurarea rugozității inelelor de contact s-a utilizat echipamentul prezentat în § 4.1.6. Ca urmare a faptului că cele 4+4 inele de contact au fost prelucrate în formă finală prin strunjire exterioară fină spre foarte fină cu avans longitudinal, rugozitatea s-a încadrat în limitele așteptate, $R_a \in [0,8 \dots 3,2]$ μm. Acest

Diviziuni Presiune Forta de
punte ten- de contact incarcare
sometrica p [kPa] F [N]

Dinamometrul 1

0	0	0
10	7.8	1
20.5	15.6	2
39.5	31.2	4
60	46.8	6
79	62.4	8
98	78	10

Dinamometrul 2

0	0	0
11	7.8	1
21	15.6	2
40	31.2	4
61	46.8	6
78	62.4	8
97	78	10

Dinamometrul 3

0	0	0
9	7.8	1
19	15.6	2
38	31.2	4
58	46.8	6
77	62.4	8
95	78	10

Dinamometrul 4

0	0	0
10	7.8	1
21	15.6	2
40.5	31.2	4
61	46.8	6
80	62.4	8
99	78	10

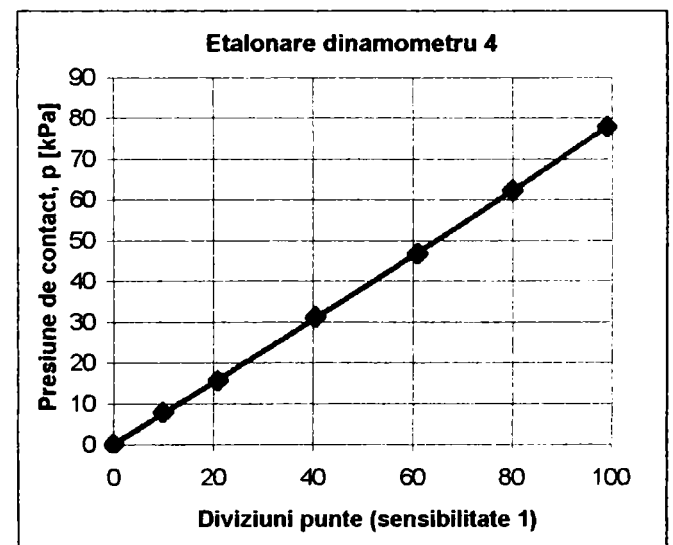
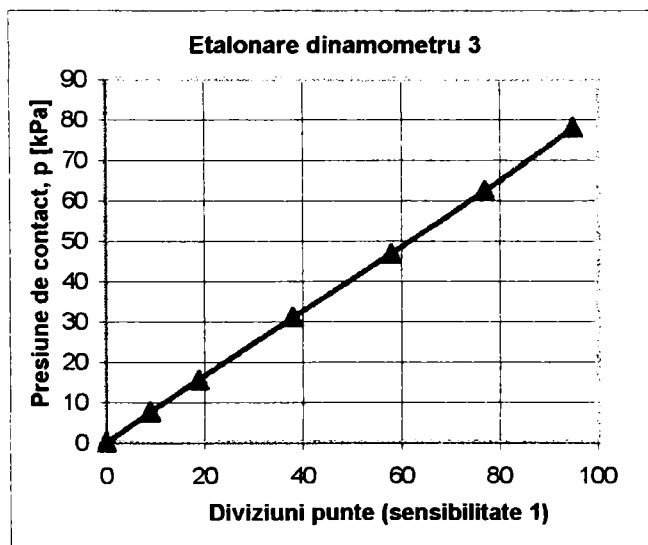
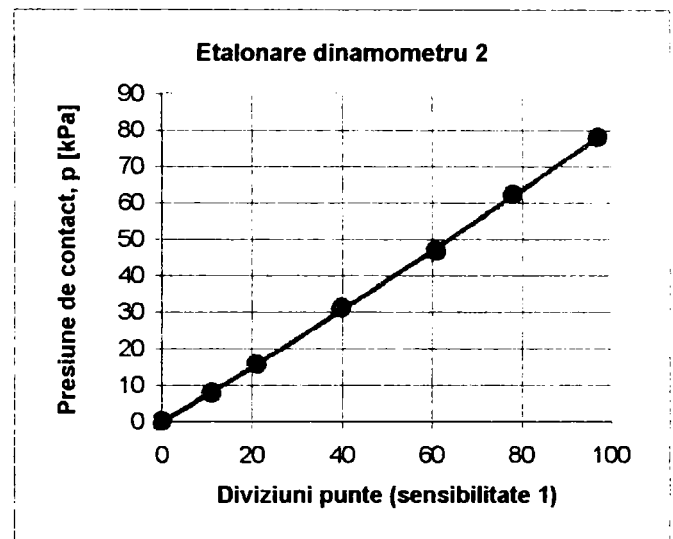
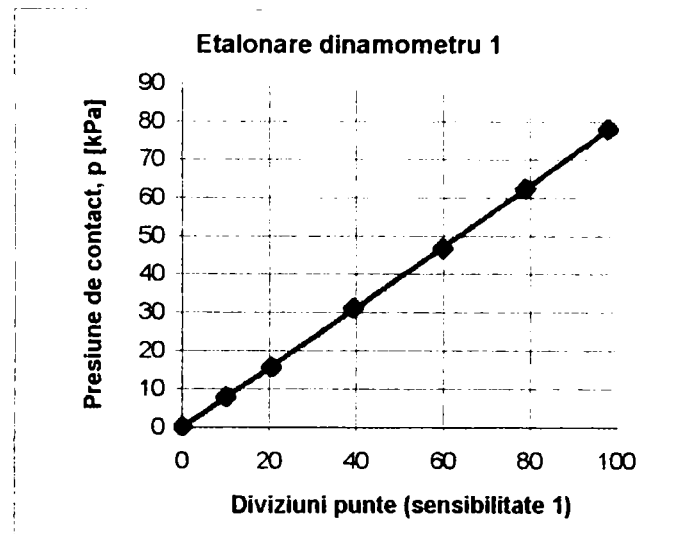


Fig.5.1 Etalonare dinamometre

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

fapt a fost confirmat și de măsurătorile efectuate. Pentru inelul 1 din bronz se exemplifică în figura 5.2 datele măsurate cu ajutorul rugozimetrului conectat la echipamentul VirtualBench-Logger. Setul de date a permis trasarea la scară a oscilogramei profilului zonei investigate. Valori similare s-au obținut și pentru celelalte inele din bronz sau oțel. La trasarea oscilogramei s-au utilizat doar primele 400 valori achiziționate.

Trebuie subliniat faptul că după 500 de ore de funcționare (durata programului de încercări privind uzarea) nu s-au observat schimbări semnificative privitoare la modificarea geometriei sau rugozității inelelor. Această constatare este susținută și prin compararea datelor respectiv oscilogramei din figura 5.3 ridicată pentru inelul 1 din bronz după numărul de ore de funcționare menționat. Salturile periodice de valori din oscilograme au apărut la inversările de sens ale vârfului palpatorului rugozimetrului.

5.4 Căderea de tensiune și rezistența joncțiunii la contactele alunecătoare

5.4.1 Factori de influență

Cercetarea comportamentului în exploatare a contactului depinde de un mare număr de factori de natură mecanică și electrică. Parametrii modificați în cadrul încercărilor au fost:

- viteza relativă de alunecare în limite de 0...30 m/s (0...6000 rot/min) prin modificarea tensiunii aplicate indusului motorului electric în domeniul (0...42) V în curent continuu. Măsurarea s-a efectuat cu mare precizie în impulsuri prin intermediul senzorului Hall inclus în montajul de măsurare prezentat în figura 4.6 iar pentru oscilografiera semnalului de viteză s-a cuplat un tahogenerator de curent continuu (micromotor cu magneți permanenți) la capătul liber al arborelui tamburului cu inelele alunecătoare. Seria de încercări s-a făcut la valorile medii de viteză de 30; 5; 0,5; 0,05 m/s și în repaus;
- presiunea medie de contact în limita valorilor prestabilite de 10, 20, 30 și 40 kPa cu ajutorul sistemului de încărcare de tipul șurub de forță-piuliță, asistat de traductoarele dinamometrice etalonate. Încercările au evidențiat faptul că la presiuni inferioare valorii de 10 kPa contactul electric devine nesigur prin variații foarte mari ale rezistenței ohmice iar la valori ce depășesc 40 kPa rezistența de contact se micșorează nesemnificativ; în schimb crește mult uzura. În acest caz la viteze ce depășesc 30 m/s încălzirea poate deveni periculoasă izolației conductoarelor prin creșterea temperaturii periei la peste 120 °C;

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

VIRTUALBENCH-LOGGER 2.1 REPORT

NATIONAL INSTRUMENTS

DATE CRE 23:15:31 3/9/99

USER Masurare de rugozitate

START COMMENT

inel 1 din bronz

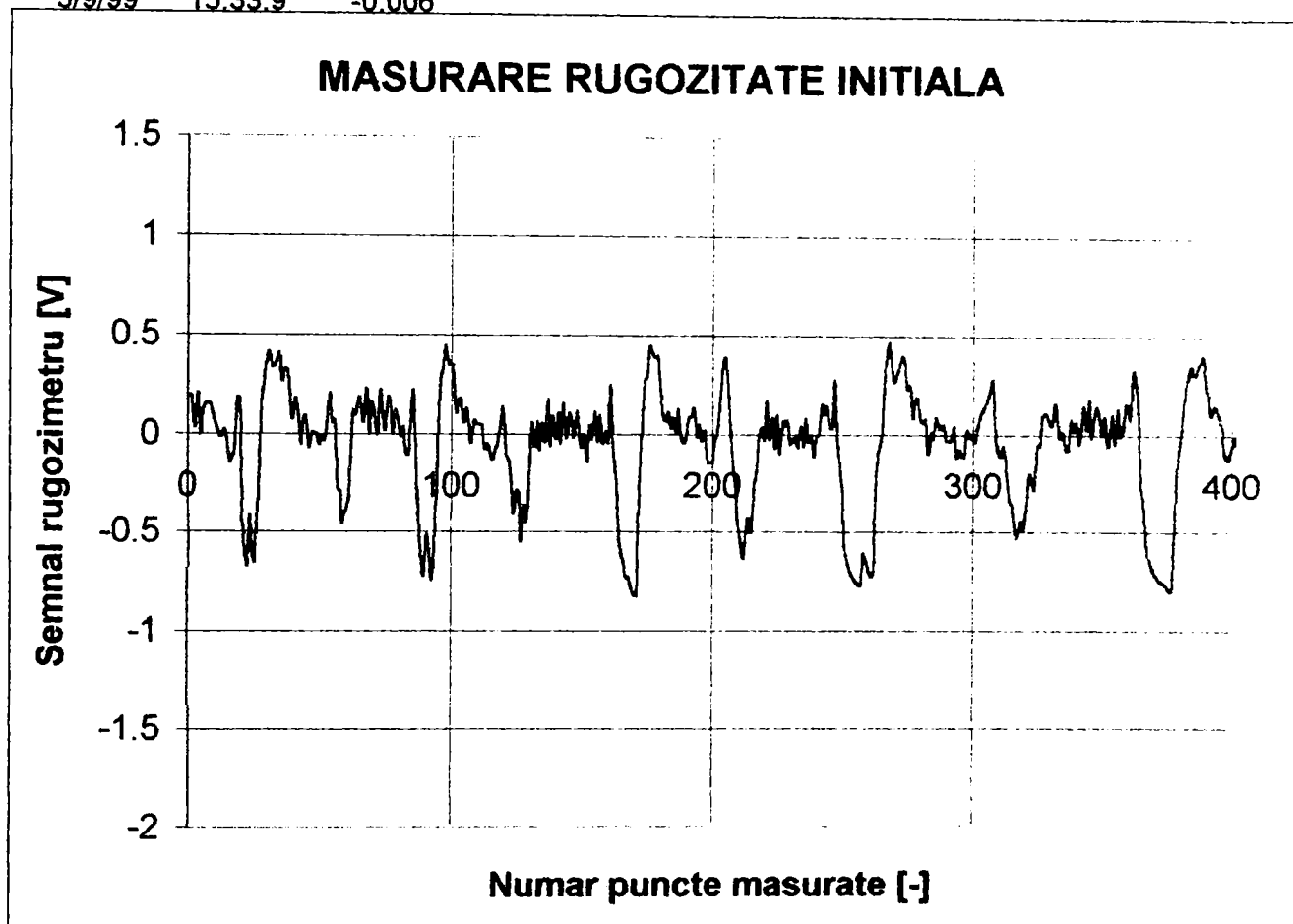
masurare pe directia generatoarei

END COMMENT

factor de scala 0.002 mm / V

START DATA

Date	Time	Md1 Ch0(V)
3/9/99	15:33.8	0.195
3/9/99	15:33.8	0.181
3/9/99	15:33.8	0.029
3/9/99	15:33.9	0.204
3/9/99	15:33.9	-0.006



3/9/99	15:35.3	0.415
3/9/99	15:35.4	0.34
3/9/99	15:35.4	0.342
3/9/99	15:35.4	0.374
3/9/99	15:35.4	0.407
3/9/99	15:35.4	0.262
3/9/99	15:35.5	0.325
3/9/99	15:35.5	0.321
3/9/99	15:35.6	0.165
3/9/99	15:35.6	0.074
3/9/99	15:35.7	0.178
3/9/99	15:35.7	0.101

Fig.5.2 Date privitoare la măsurarea rugozității inelului 1 în fază inițială

VIRTUALBENCH-LOGGER 2.1 REPORT

NATIONAL INSTRUMENTS

DATE CREATED 5/5/99

USER Masurare de rugozitate

START COMMENT

inel 1 din bronz

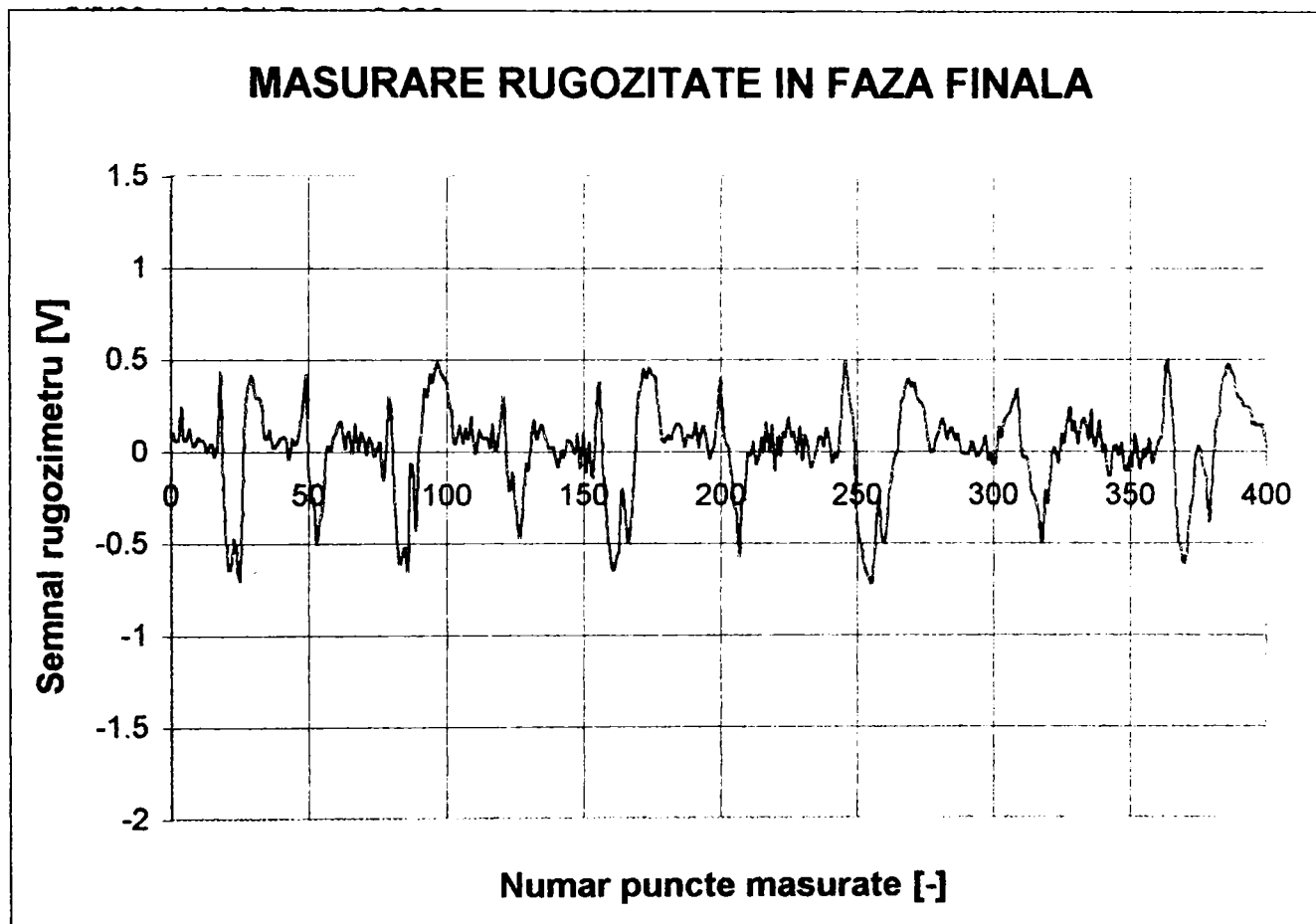
masurare pe directia generatoarei

END COMMENT

factor de scala 0.002 mm / V

START DATA

Date	Time	Md1 Ch0(V)
5/5/99	16:31.5	0.106
5/5/99	16:31.5	0.057
5/5/99	16:31.6	0.068
5/5/99	16:31.6	0.249
5/5/99	16:31.6	0.065



5/5/99	16:33.1	0.299
5/5/99	16:33.2	0.296
5/5/99	16:33.3	0.251
5/5/99	16:33.3	0.089
5/5/99	16:33.4	0.069
5/5/99	16:33.4	0.119
5/5/99	16:33.5	0.022
5/5/99	16:33.5	0.033
5/5/99	16:33.6	0.057
5/5/99	16:33.6	0.078
5/5/99	16:33.7	0.084
5/5/99	16:33.8	0.074

Fig.5.3 Date privitoare la măsurarea rugozității inelului 1 în fază finală

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Oscilograma din figura 5.4 evidențiază faptul că la o presiune de numai 5 kPa, densitate de curent $j = 0,117 \text{ A/mm}^2$ și viteză periferică de aproximativ 6 m/s (1200 rot/min) valorile momentane ale căderii de tensiune ΔU prezintă o fluctuație inadmisibil de mare cuprinsă aleator între 1 și 2 V. Față de comportamentul normal ilustrat în figura 5.5 în oscilograma 5.6 se constată o creștere rapidă a temperaturii care poate avea drept consecință uzarea foarte intensă sau chiar distrugerea contactului.

Pentru interpretarea cantitativă a mărimilor din oscilograme divizorii potențiometrice folosiți impuși de amplificarea mare a echipamentului înregistrator au condus la realizarea factorilor de scară după cum urmează:

- pentru căderea de tensiune $k_u=0,33 \text{ V/mV}$;
- pentru viteza periferică $k_v=0,88 \text{ ms}^{-1}/\text{mV}$;
- pentru intensitatea curentului $k_I=1,25 \text{ A/mV}$;

-densitatea curentului electric s-a modificat în trepte până la valoarea maximă de $0,1875 \text{ A/mm}^2$ prin schimbarea valorii sarcinii în circuitul în care era înseriat ansamblul format din inelul colector și două perii (una de intrare iar a doua de ieșire a curentului electric din porțiunea de circuit investigată) ca în figura 4.12. Alimentarea s-a făcut la tensiune constantă de 12 V curent continuu. Sursa a fost fie un redresor stabilizat reglabil în trepte tip IEMI I 4104 40 V și 5,2 A, fie un acumulator auto de 12 V c.c., cu $I_{\max} = 210 \text{ A}$ și capacitatea de 44 Ah. Densitățile de curent prestabilite s-au realizat prin modificarea corespunzătoare și măsurarea intensității curentului, având în vedere aria efectivă de contact perie-inel. Pentru evidențierea în oscilograme a semnalului corespunzător intensității curentului electric s-a realizat un traductor de curent format dintr-un grup de 10 rezistențe identice de 10 ohmi / 2W cuplate în paralel, a cărui valoare a rezultat de 1 ohm capabil de a disipa o putere maximă de 20 W.

-temperatura medie a periei a atins în cadrul încercărilor valoarea de 112°C . Măsurarea s-a făcut cu ajutorul microtermocuplei de tipul J din dotarea echipamentului de măsurare –înregistrare Virtual BenchLogger. Valorile măsurate au fost reținute sub formă analogică în oscilograme și numeric, tabelate în fișiere de date. În figura 5.7 este prezentată dependența variației temperaturii în funcție de timp pentru peria nr. 4. Viteza de variație a înregistrării procesului termic este pusă în evidență prin curba de încălzire a periei și constanta de timp ($\tau_t \cong 100 \text{ s}$), dedusă ca valoare a subtangentei la curba de încălzire perie-termocuplă.

5.4.2 Măsurarea și analiza căderii de tensiune pe contactul alunecător

Din analiza dependențelor prezentate grafic și a datelor conținute în fișele de

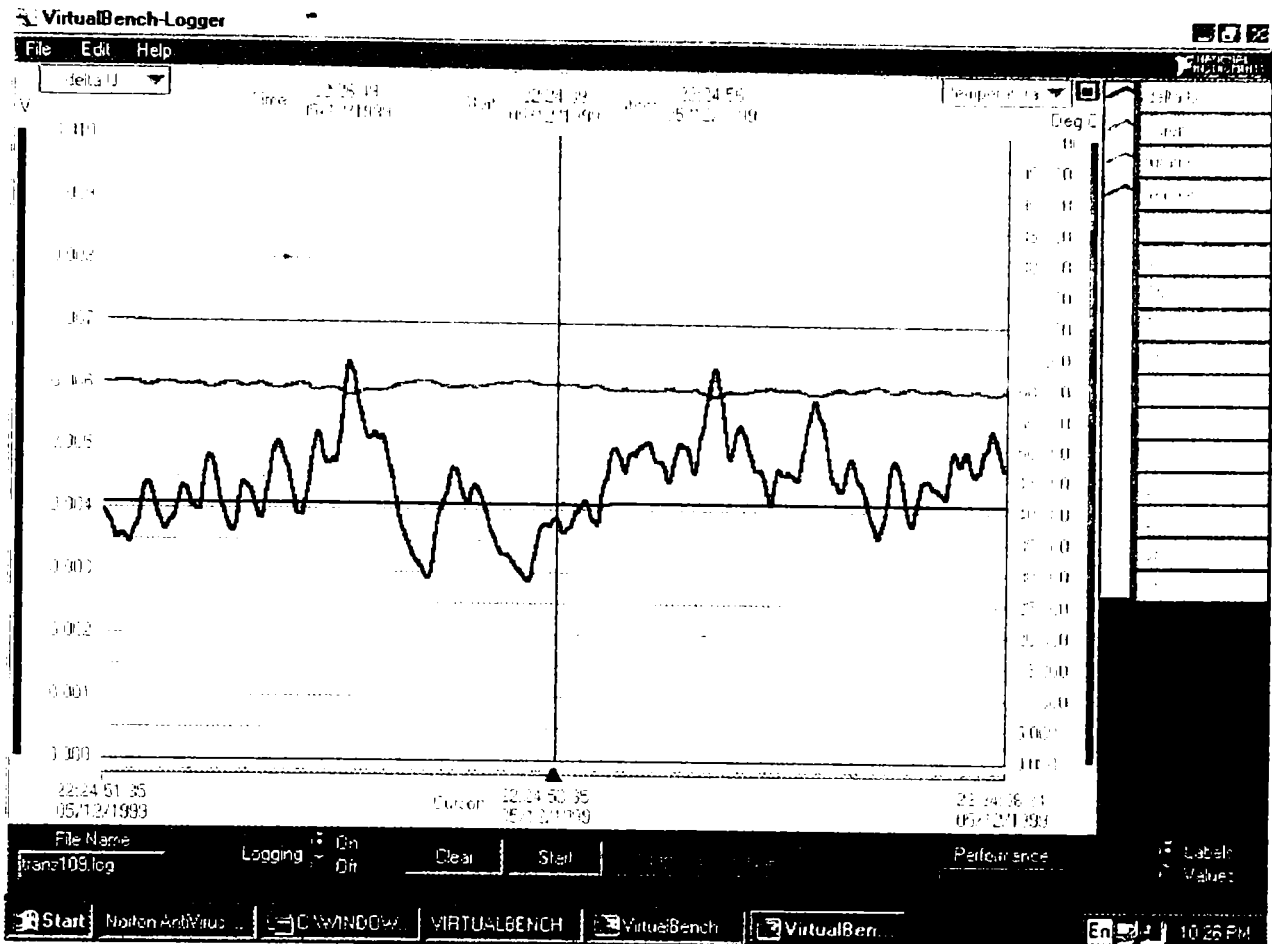


Fig. 5.4 Oscilograma parametrilor funcionali la o presiune scăzută de 5 kPa

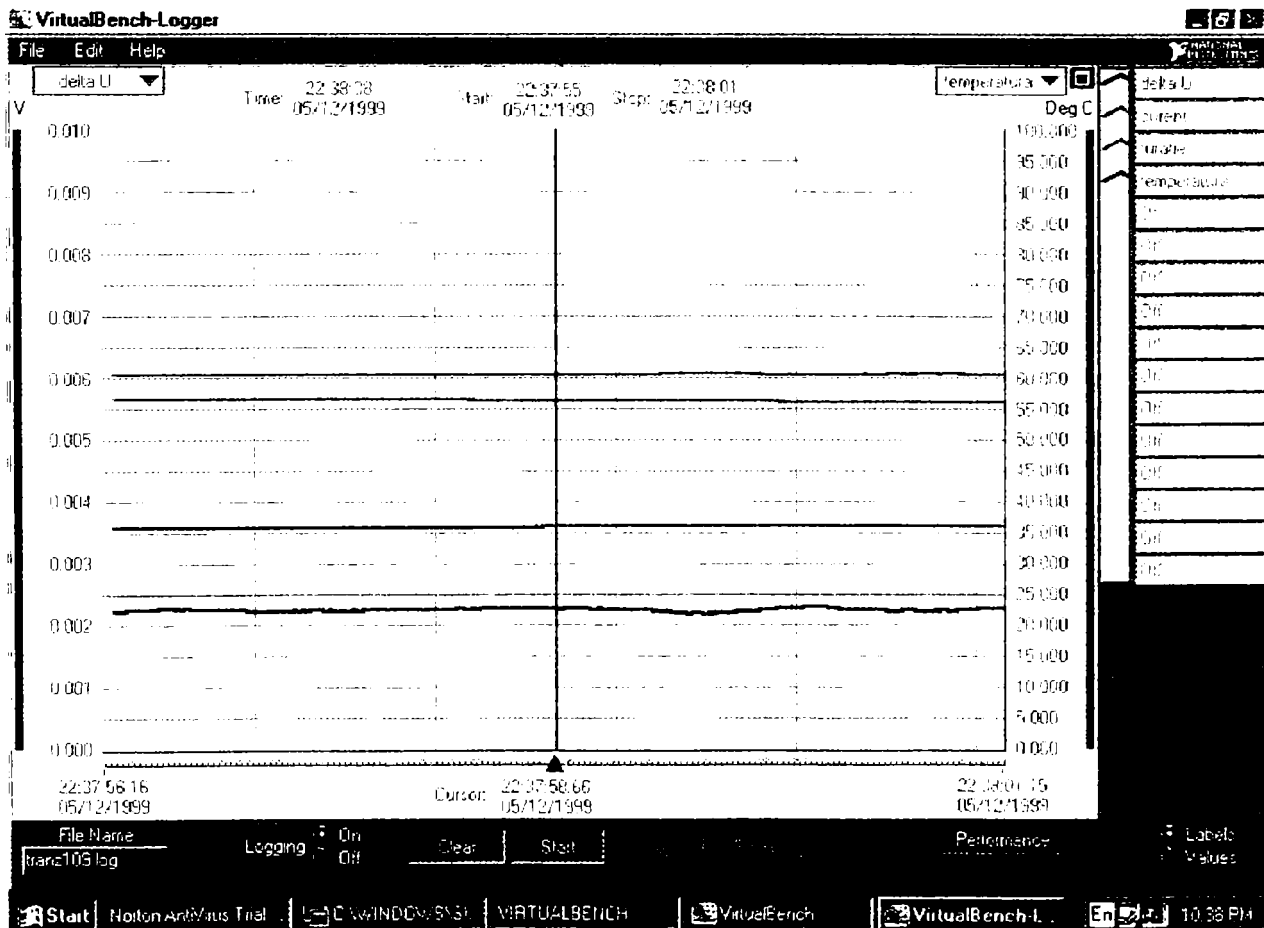


Fig. 5.5 Oscilograma parametrilor funcionali la o presiune optimă de 25 kPa

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

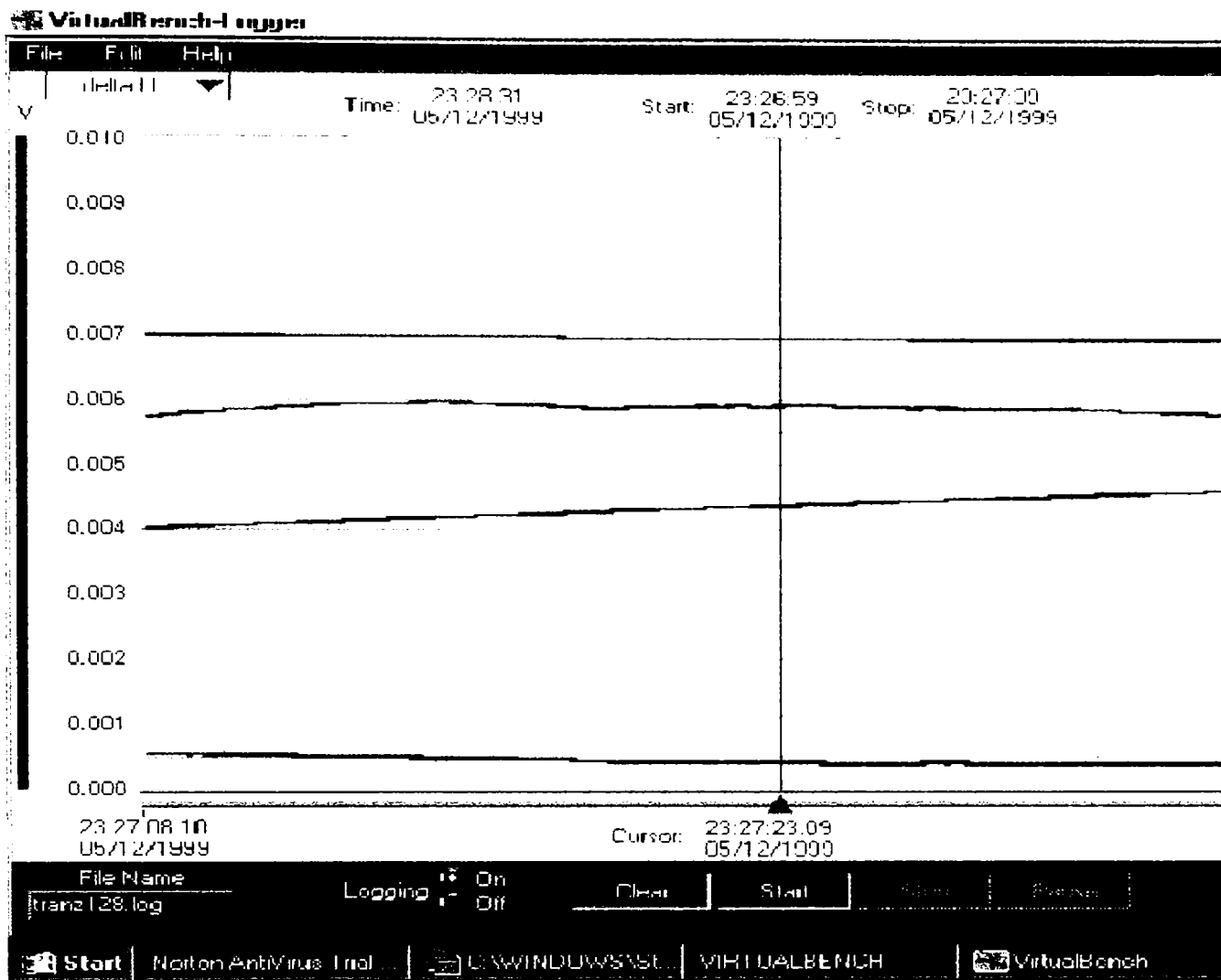


Fig. 5.6 Oscilograma parametrilor funcionali la o presiune mare de 60 kPa

măsurători din fig.5.8...5.12 se observă că independent de mărimea densității curentului sau a presiunii medii de contact, căderea de tensiune la bornele contactelor alunecătoare crește cu creșterea vitezei periferice a inelului de contact.

Creșterea menționată este o consecință a măririi rezistenței electrice și aceasta poate fi explicată prin efectele creșterii vitezei astfel:

- se micșorează durata de stabilire a microcontactelor și se reduc în mod corespunzător ariile efective care asigură conducția electrică;
- perturbațiile dinamice ce au la bază abaterile geometrice ale inelului și periilor reduc numărul punctelor efective de contact;
- crește rezistivitatea electrică odată cu creșterea temperaturii provocată la rândul ei de intensificarea procesului disipativ a cărui valoare este puternic influențată de viteză.

Pentru valori date ale vitezei relative și ale densității de curent, căderea de tensiune scade în toate cazurile în care presiunea medie de contact crește. O influență

t [sec]	temp.[grdC]
0	32.006
10	32.744
20	33.679
30	34.656
40	35.545
50	36.288
60	37.085
70	37.76
80	38.486
90	39.176
100	39.731
110	40.279
120	40.73
130	41.164
140	41.641
150	42.06
160	42.368
170	42.693
180	43.039
190	43.434
200	43.746
210	44.071
220	44.547
230	44.839
240	45.117
250	45.358
260	45.657
270	46.025
280	46.259
290	46.528
300	46.688
310	46.889
320	47.097
330	47.351
340	47.51
350	47.684
360	47.792
370	47.899
380	48.084
390	48.193
400	48.237
410	48.321
420	48.581
430	48.714
440	48.79
450	49.053
460	49.307
470	49.411
480	49.576
490	49.702
500	49.924
510	50.274
520	50.467
530	50.58

Valori masurate cu termocupla de tipul J
fabricatie National Instruments conectata
la modulul SC XI 1321al echipamentului
VIRTUAL BENCHLOGGER

Perie metal-grafit sinterizat / inel alunecator Cu Sn 10
Presiunea medie 10 kPa
Viteza medie 5 m/s (truratia medie a tamburului 1060 rot/min)
Intensitatea curentului I = 6 A; densitate de curent j = 0.093 A/mm²
Temperatura momentana s-a masurat secvential din 10 in 10 s.

Valoarea medie a constantei de timp este de aprox. 100s.

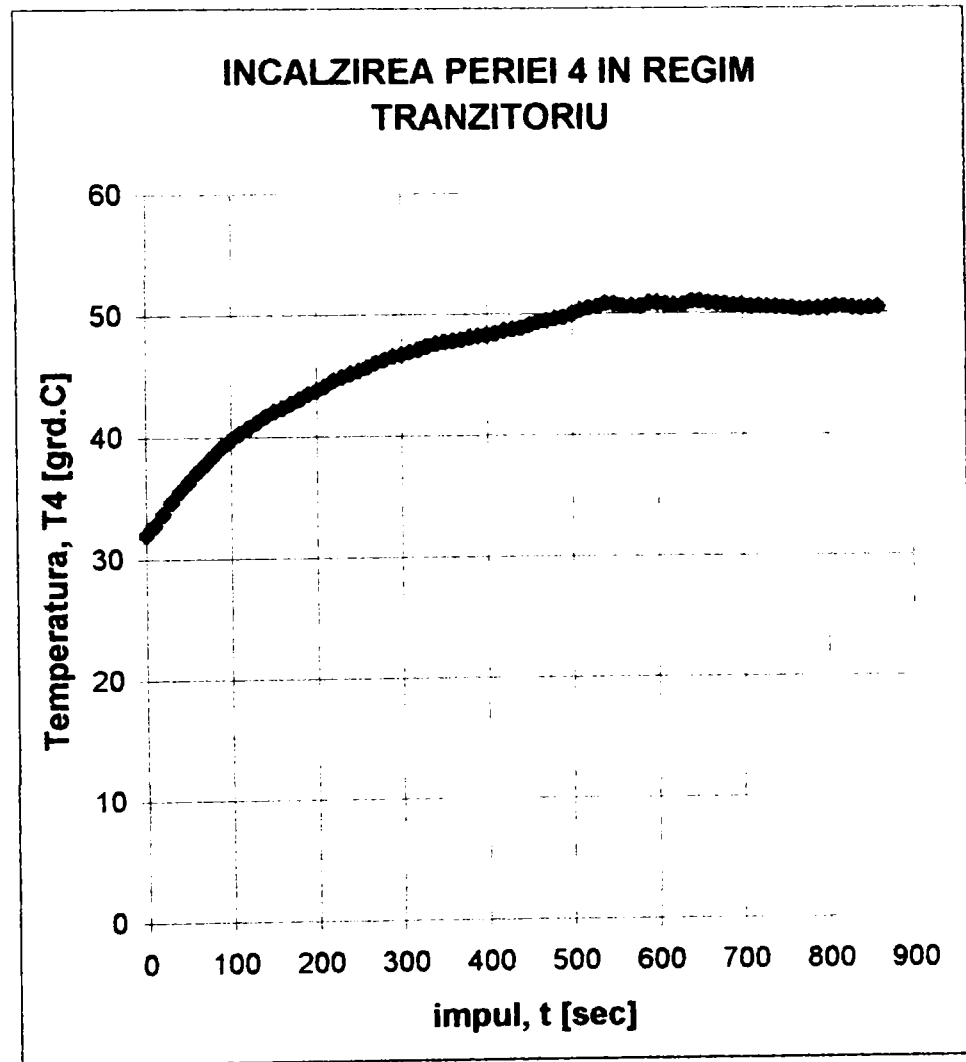


Fig.5.7 Încălzirea periei în regim tranzitoriu

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI"

STR 1570/177-89

Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm

Presiunea de contact: cazul a) 10 kPa, cazul b) 20 kPa, cazul c) 30 kPa, cazul d) 40 kPa

Temperatura maxima a periei: cazul a) 82grd.C, cazul b) 91grd.C, cazul c) 101grd.C, cazul d) 112grd.C

Viteza 30 m/s (625 rad/s)

Valori medii prelucrate

Densitate de curent $j, [A/mm^2]$	Cadere de tensiune ΔU				Intensitate curent $I [A]$
	cazul a 10 [kPa]	cazul b 20 [kPa]	cazul c 30 [kPa]	cazul d 40 [kPa]	
0.011718	0.33	0.22	0.13	0.08	0.75
0.023437	0.48	0.34	0.24	0.19	1.5
0.046875	0.63	0.53	0.44	0.37	3
0.070312	0.77	0.67	0.59	0.53	4.5
0.09375	0.92	0.77	0.66	0.58	6
0.117187	1.04	0.83	0.71	0.64	7.5
0.140625	1.13	0.89	0.77	0.69	9
0.164062	1.22	0.93	0.8	0.72	10.5
0.1875	1.28	0.98	0.82	0.74	12

Nota. Caderea de tensiune ΔU corespunde pentru doua contacte alunecatoare identice inseriate

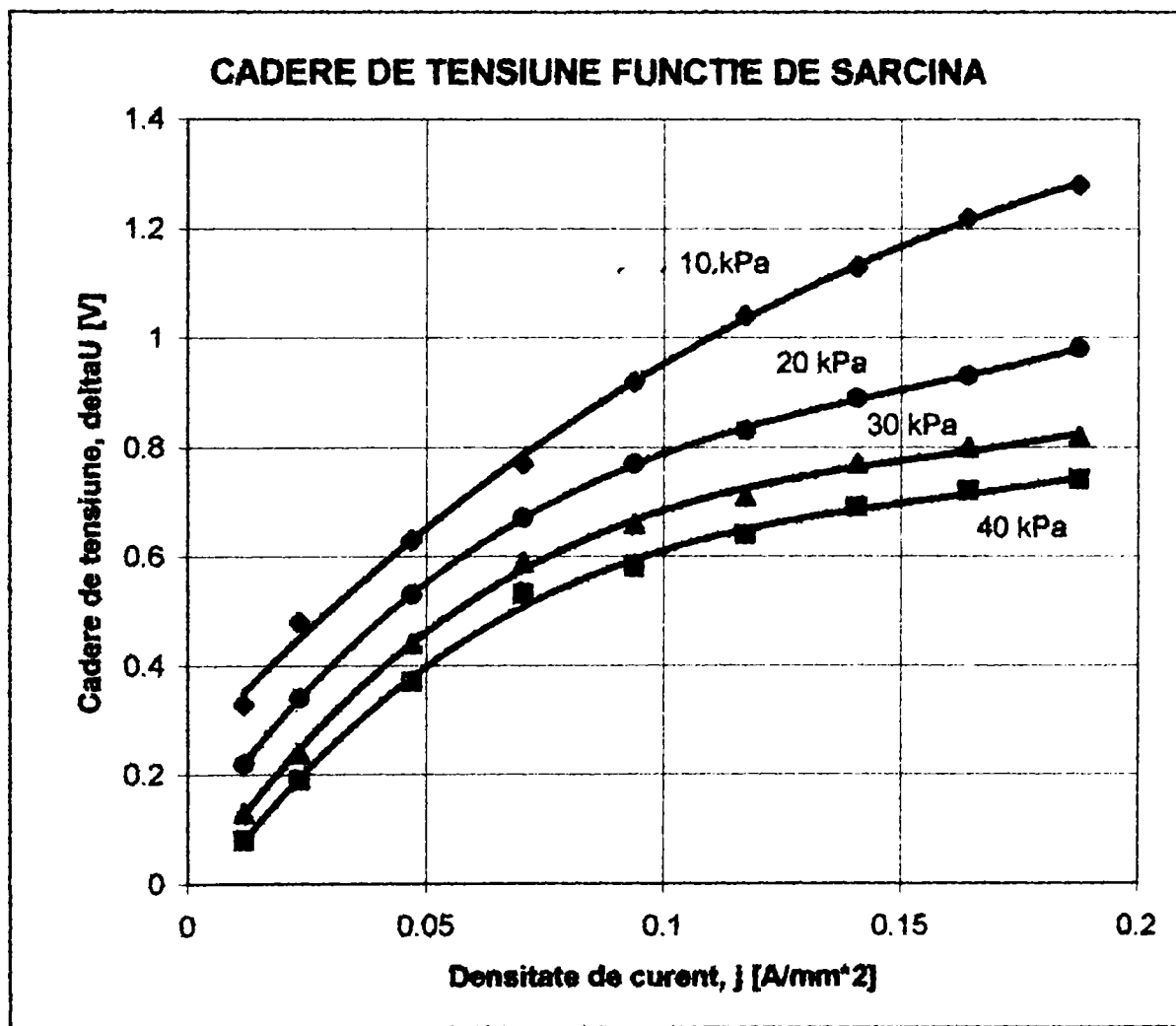


Fig.5.8 Căderea de tensiune pe contactul alunecător la viteza de 30 m/s

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI"

STR 1570/1/7-89

Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm

Presiunea de contact: cazul a) 10 kPa, cazul b) 20 kPa, cazul c) 30 kPa, cazul d) 40 kPa

Temperatura maxima a periei: cazul a) 47grd.C, cazul b) 59grd.C, cazul c) 68grd.C, cazul d) 74grd.C

Viteza 5 m/s (104 rad/s)

Valori medii prelucrate

Densitate de curent $j, [A/mm^2]$	Cadere de tensiune ΔU				Intensitate curent $I [A]$
	cazul a 10 [kPa]	cazul b 20 [kPa]	cazul c 30 [kPa]	cazul d 40 [kPa]	
0.011718	0.31	0.19	0.12	0.08	0.75
0.023437	0.45	0.33	0.21	0.18	1.5
0.046875	0.59	0.49	0.4	0.34	3
0.070312	0.7	0.63	0.52	0.49	4.5
0.09375	0.84	0.74	0.6	0.54	6
0.117187	0.89	0.79	0.64	0.64	7.5
0.140625	1.07	0.81	0.74	0.68	9
0.164062	1.11	0.89	0.76	0.7	10.5
0.1875	1.15	0.88	0.79	0.73	12

Nota. Caderea de tensiune ΔU corespunde pentru doua contacte alunecatoare identice inseriate

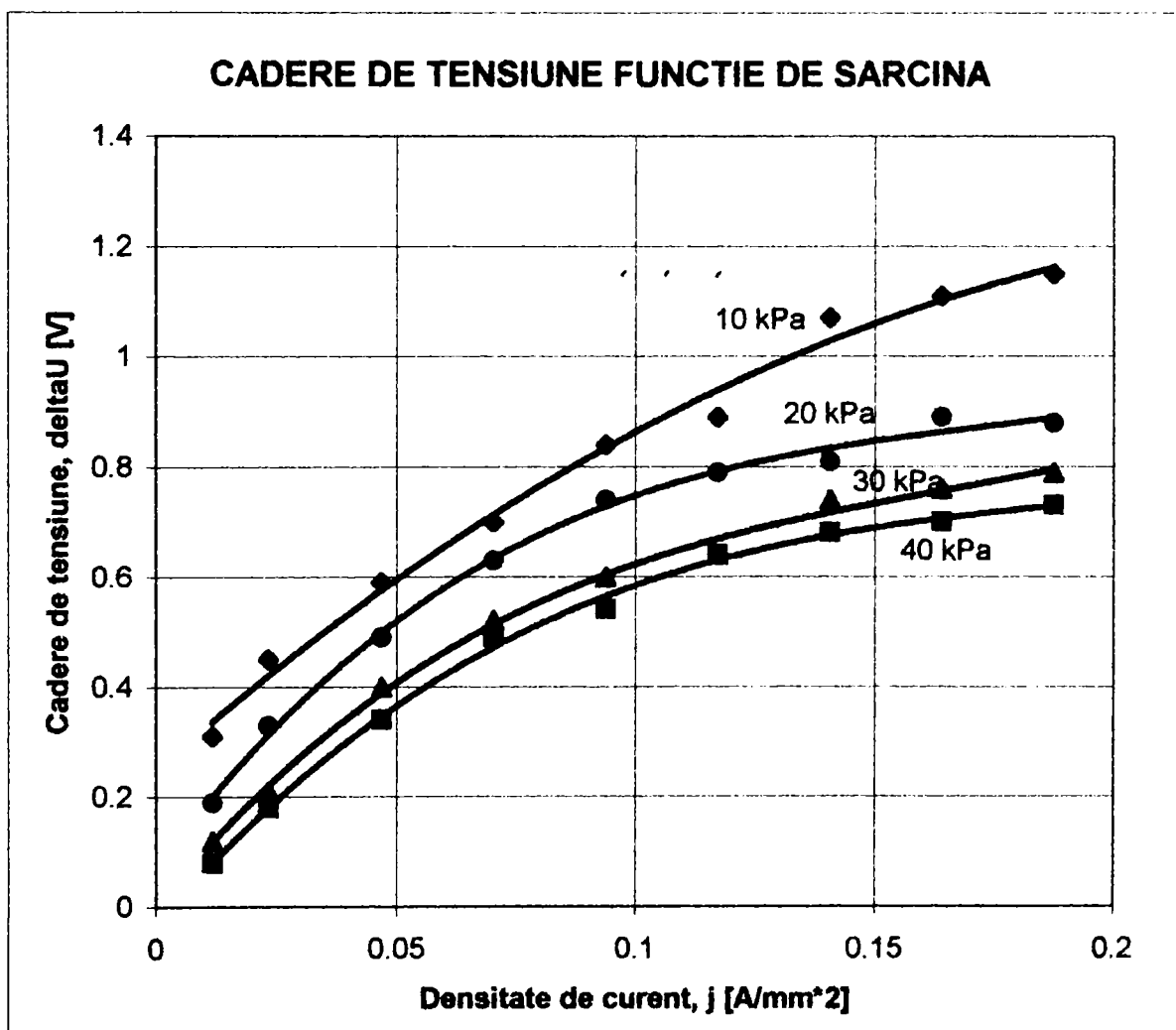


Fig.5.9 Căderea de tensiune pe contactul alunecător la viteza medie 5 m/s

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89

Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm

Presiunea de contact: cazul a) 10 kPa, cazul b) 20 kPa, cazul c) 30 kPa, cazul d) 40 kPa

Temperatura maxima a periei:cazul a)50 grdC, cazul b 48 grdC, cazul c 44 grdC, cazul d)41 grdC

Viteza liniara medie 0.5 m/s (viteza unghiulara medie 10,4 rad/s)

Valori medii prelucrate

Densitate curent, j [A/mm ²]	Cadere de tensiune deltaU				Intensitate curent I [A]
	cazul a 10 [kPa]	cazul b 20 [kPa]	cazul c 30 [kPa]	cazul d 40 [kPa]	
0.011718	0.33	0.22	0.18	0.08	0.75
0.023437	0.43	0.29	0.26	0.16	1.5
0.046875	0.58	0.43	0.33	0.31	3
0.070312	0.64	0.61	0.44	0.42	4.5
0.09375	0.82	0.7	0.56	0.5	6
0.121719	0.89	0.72	0.61	0.6	7.5
0.140625	0.99	0.79	0.68	0.63	9
0.164062	1.04	0.89	0.72	0.67	10.5
0.1875	1.04	0.88	0.75	0.71	12

Nota Caderea de tensiune deltaU corespunde pentru doua contacte alunecatoare identice inseriate

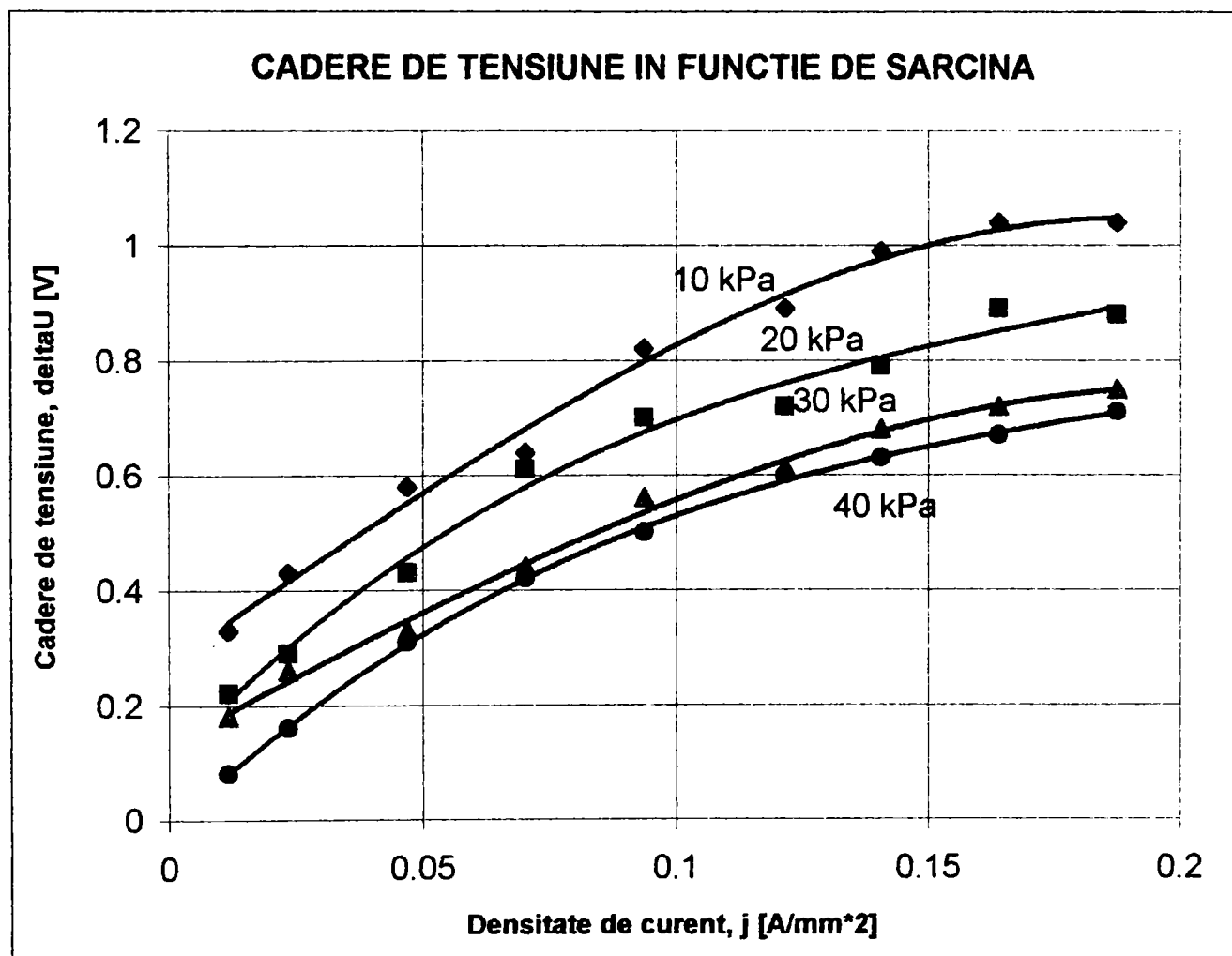


Fig.5.10 Căderea de tensiune pe contactul alunecător la viteza redusă de 0,5 m/s

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm
 Presiunea de contact: cazul a) 10 kPa, cazul b) 20 kPa, cazul c) 30 kPa, cazul d) 40 kPa
 Temperatura maxima a periei: cazul a) 45 grdC, cazul b) 43 grdC, cazul c) 42 grdC, cazul d) 42 grdC
 Viteza liniara medie 0.05 m/s (viteza unghiulara medie 1,04 rad/s)

Densitate curent, j [A/mm ²]	Valori medii prelucrate				Intensitate curent I [A]
	Cadere de tensiune deltaU				
	cazul a 10 [kPa]	cazul b 20 [kPa]	cazul c 30 [kPa]	cazul d 40 [kPa]	
0.011718	0.35	0.19	0.14	0.09	0.75
0.023437	0.44	0.26	0.23	0.15	1.5
0.046875	0.55	0.41	0.27	0.23	3
0.070312	0.61	0.52	0.4	0.31	4.5
0.09375	0.77	0.6	0.49	0.39	6
0.121719	0.83	0.65	0.55	0.42	7.5
0.140625	0.91	0.82	0.62	0.5	9
0.164062	1.04	0.85	0.73	0.59	10.5
0.1875	1.04	0.87	0.76	0.63	12

Nota Caderea de tensiune deltaU corespunde pentru doua contacte alunecatoare identice inseriate

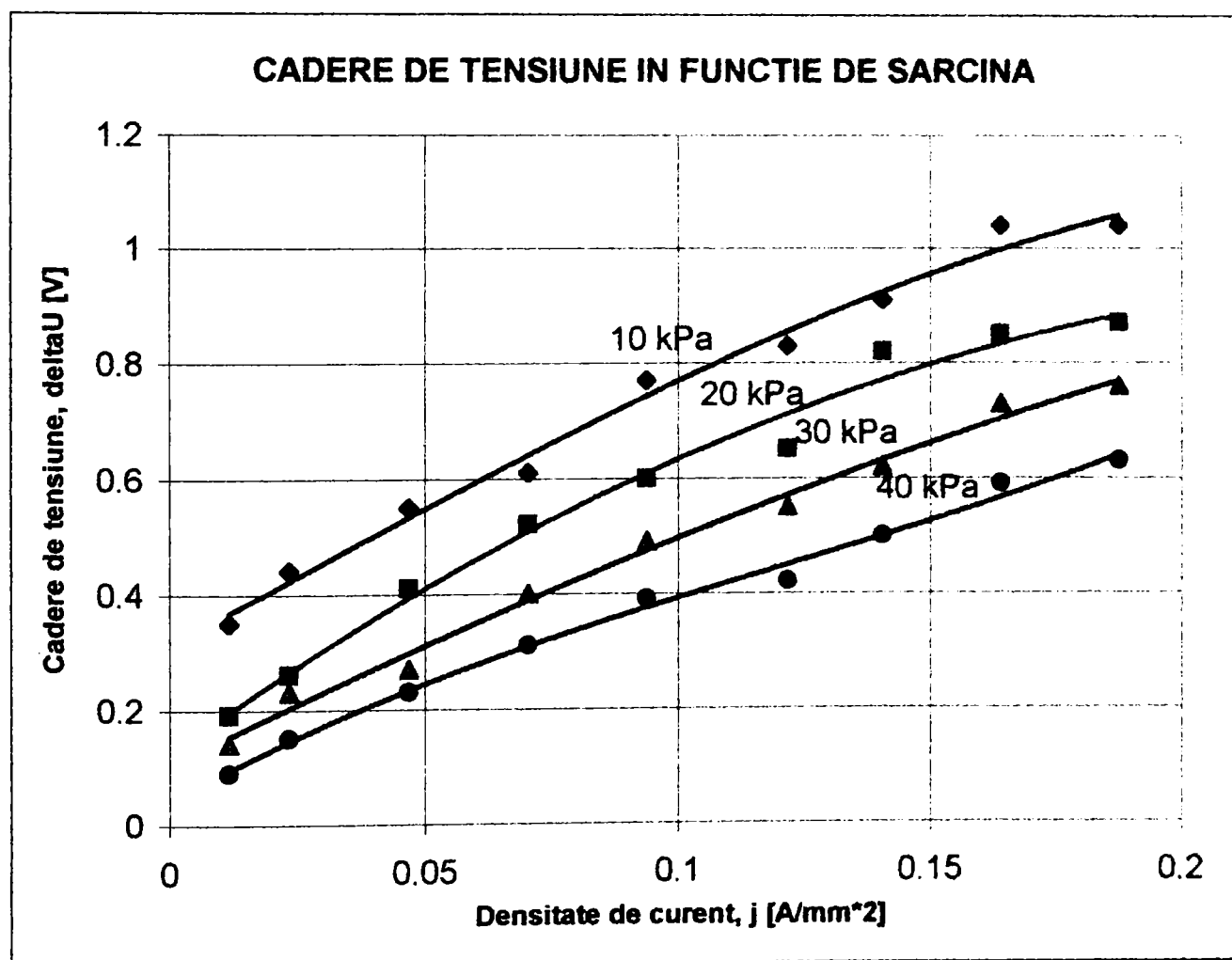


Fig. 5.11 Căderea de tensiune pe contactul alunecător la viteza de 0,05 m/s

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm
 Presiunea de contact: cazul a) 10 kPa, cazul b) 20 kPa, cazul c) 30 kPa, cazul d) 40 kPa
 Temperatura maxima a periei:cazul a) 45 grdC, cazul b) 43 grdC, cazul c) 42 grdC, cazul d) 42 grdC
 Masuratori in stare de repaus

Valori medii prelucrate

Densitate curent, j [A/mm ²]	Cadere de tensiune deltaU				Intensitate curent I [A]
	cazul a 10 [kPa]	cazul b 20 [kPa]	cazul c 30 [kPa]	cazul d 40 [kPa]	
0.011718	0.32	0.22	0.15	0.07	0.75
0.023437	0.4	0.27	0.21	0.14	1.5
0.046875	0.48	0.38	0.26	0.2	3
0.070312	0.56	0.49	0.38	0.26	4.5
0.09375	0.71	0.58	0.48	0.33	6
0.121719	0.78	0.68	0.54	0.4	7.5
0.140625	0.83	0.71	0.59	0.47	9
0.164062	0.9	0.77	0.66	0.54	10.5
0.1875	0.94	0.82	0.7	0.59	12

Nota Caderea de tensiune deltaU corespunde pentru doua contacte alunecatoare identice inseriate

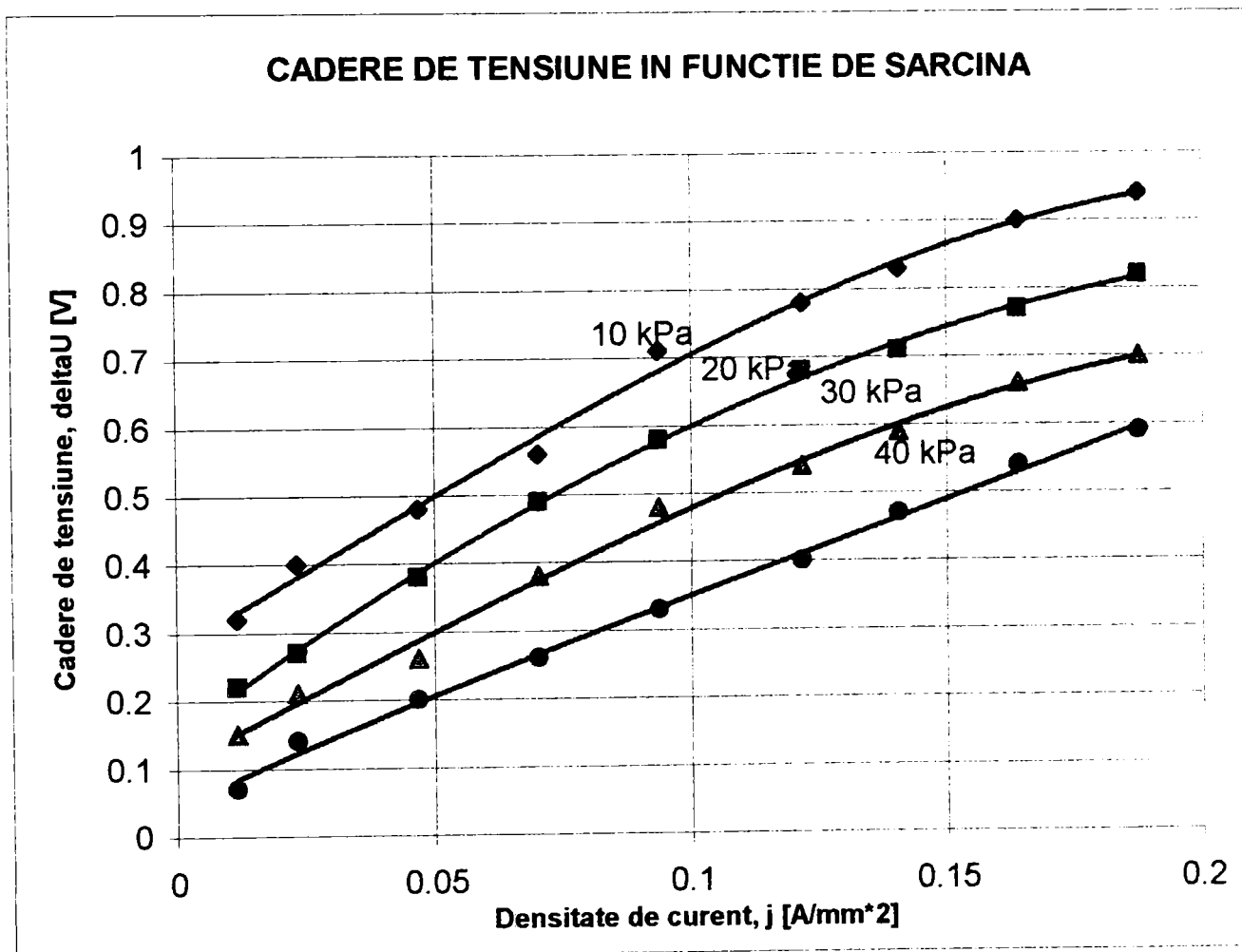


Fig.5.12 Caderea de tensiune pe contactul alunecator in stare de repaus

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

favorabilă se exercită până la o anumită limită determinată de procesul disipativ și de creșterea densității curentului electric.

5.4.3 Analiza valorilor rezistenței electrice de contact

Datele privitoare la variația rezistenței de contact în funcție de presiunea medie, de viteza relativă și de densitatea curentului electric sunt prezentate în figurile 5.13...5.16.

La prelucrarea valorilor rezistenței electrice se fac următoarele precizări:

-datele conținute în fișele din figurile 5.8...5.12 corespund unui număr de două contacte alunecătoare înseriate;

-calculul rezistenței ohmice echivalente pentru inel conform modelului din figura 4.12 și în lungul celor două perii de contact a scos în evidență faptul că valorile acestora sunt neglijabile în raport cu rezistențele electrice de trecere pentru cele două joncțiuni dintre perii și inel. Omiterea influențelor rezistențelor volumice ale periilor și ale inelului la calculul rezistenței fiecărei joncțiuni introduce o eroare de calcul mai mică de 1 %.

-în calculul rezistenței electrice s-a luat în considerare faptul că joncțiunile au ariile de trecere, condițiile de încărcare și de funcționare practic identice;

Principalele concluzii ce se desprind din analiza rezultatelor experimentale sunt:

-pentru aceeași densitate de curent și stare de tensiune superficială, în toate cazurile rezistența electrică scade cu micșorarea vitezei relative. Valorile minime se înregistrează pentru contactul electric aflat în repaus,

-rezistența electrică a joncțiunii crește întotdeauna când scade presiunea de contact. La presiuni mici sub (5...10) kPa contactul electric devine de slabă calitate pentru că pe lângă creșterea inadmisibilă, prezintă și importante fluctuații ale valorii rezistenței electrice;

-creșterea densității curentului în limite de până la $j = 0.2 \text{ A/mm}^2$ are consecințe favorabile asupra micșorării rezistenței joncțiunii contactului alunecător.

5.4.4 Observații asupra funcționării contactelor alunecătoare la viteze reduse

La viteze relative reduse, funcționarea contactelor alunecătoare poate fi însoțită de prezența fenomenului de stick-slip. Acesta se manifestă prin zgomotul specific și prin variații importante și periodice ale rezistenței de contact datorate schimbării caracterului mișcării relative din forma continuă într-una sacadată. S-a constatat că fenomenul apare de cele mai multe ori când mișcarea relativă are loc doar într-un singur sens de rotație. Intensitatea lui depinde de abaterea axei periei în raport cu

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT " ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii: 8x8x16 mm
 Presiunea medie de contact 40 kPa

Valori calculate

Densitate de curent $j, [A/mm^2]$	Rezistența de contact, R [mOhm]				Intensitate curent	
	viteza relativă v, m/s				0	I [A]
0.023437	30	5	0.5	0.05	0	1 [A]
0.046875	63.333	60	53.333	50	46.666	1.5
0.070312	61.666	56.666	51.666	38.333	33.3	3
0.09375	58.888	54.444	46.666	34.444	28.888	4.5
0.117187	48.333	45	41.666	32.5	27.5	6
0.140625	42.666	42.666	40	28	26.666	7.5
0.164062	38.333	37.777	35	27.7	26.11	9
0.1875	34.288	33.333	31.9	28.09	25.71	10.5
	30.833	30.411	29.58	26.25	24.58	12

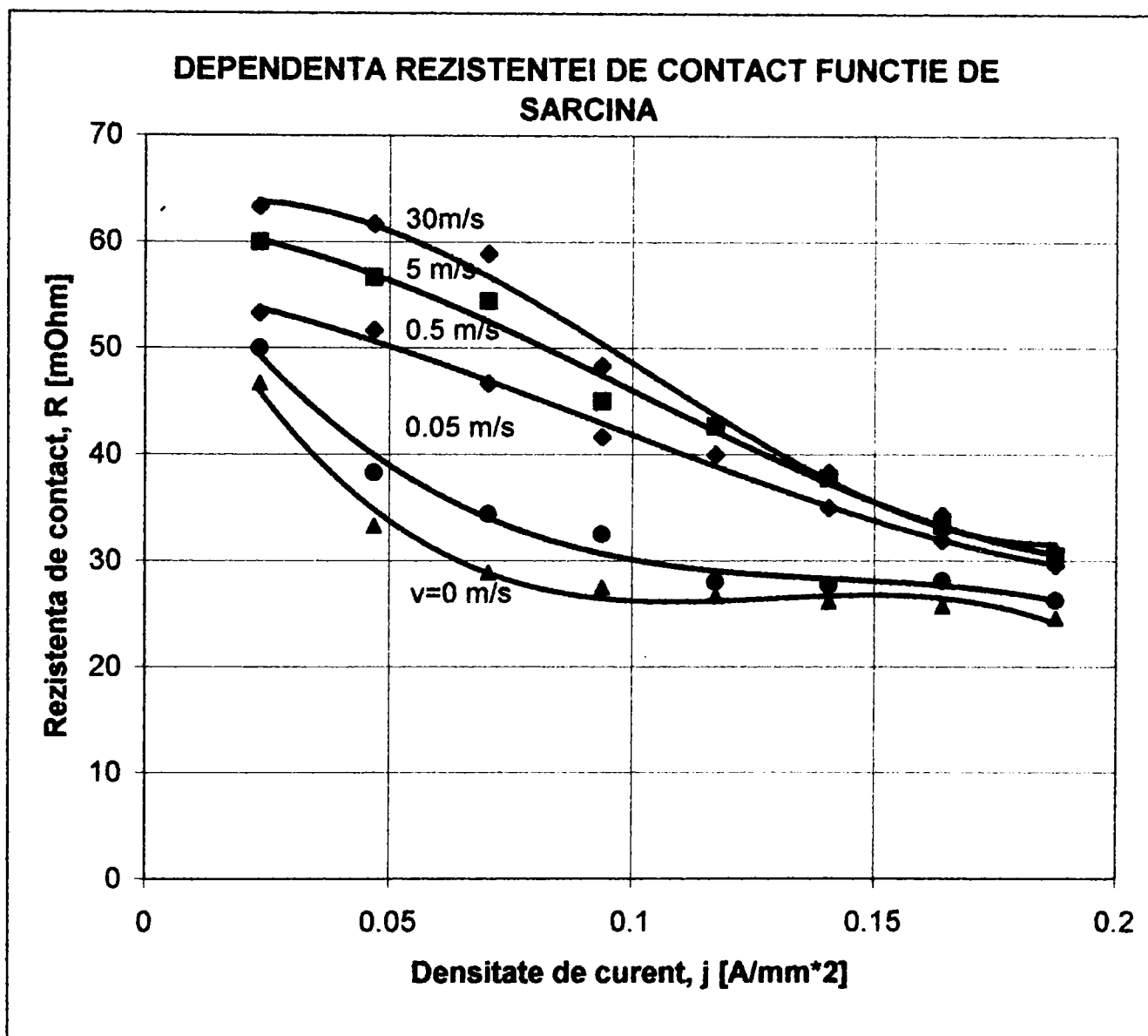


Fig.5.13 Rezistența electrică de contact la presiunea de 40 kPa

Conșiderații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT " ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii: 8x8x16 mm
 Presiunea medie de contact 30 kPa

Valori calculate

Densitate de curent $j, [A/mm^2]$	Rezistența de contact, R [mOhm]				Intensitate curent	
	viteza relativă v, m/s				I [A]	
0.023437	30	5	0.5	0.05	0	1
0.046875	80	70	86	76.66	70	1.5
0.070312	73.333	66.666	55	45	43.333	3
0.09375	65.555	57.777	48.888	44.4	42.222	4.5
0.117187	55	50	46.666	40.83	40	6
0.140625	47.333	42.666	40.666	36.66	36	7.5
0.164062	42.777	41.111	37.777	34.444	32.777	9
0.1875	38.095	36.19	34.28	34.76	31.428	10.5
	34.166	32.916	31.25	31.666	29.166	12

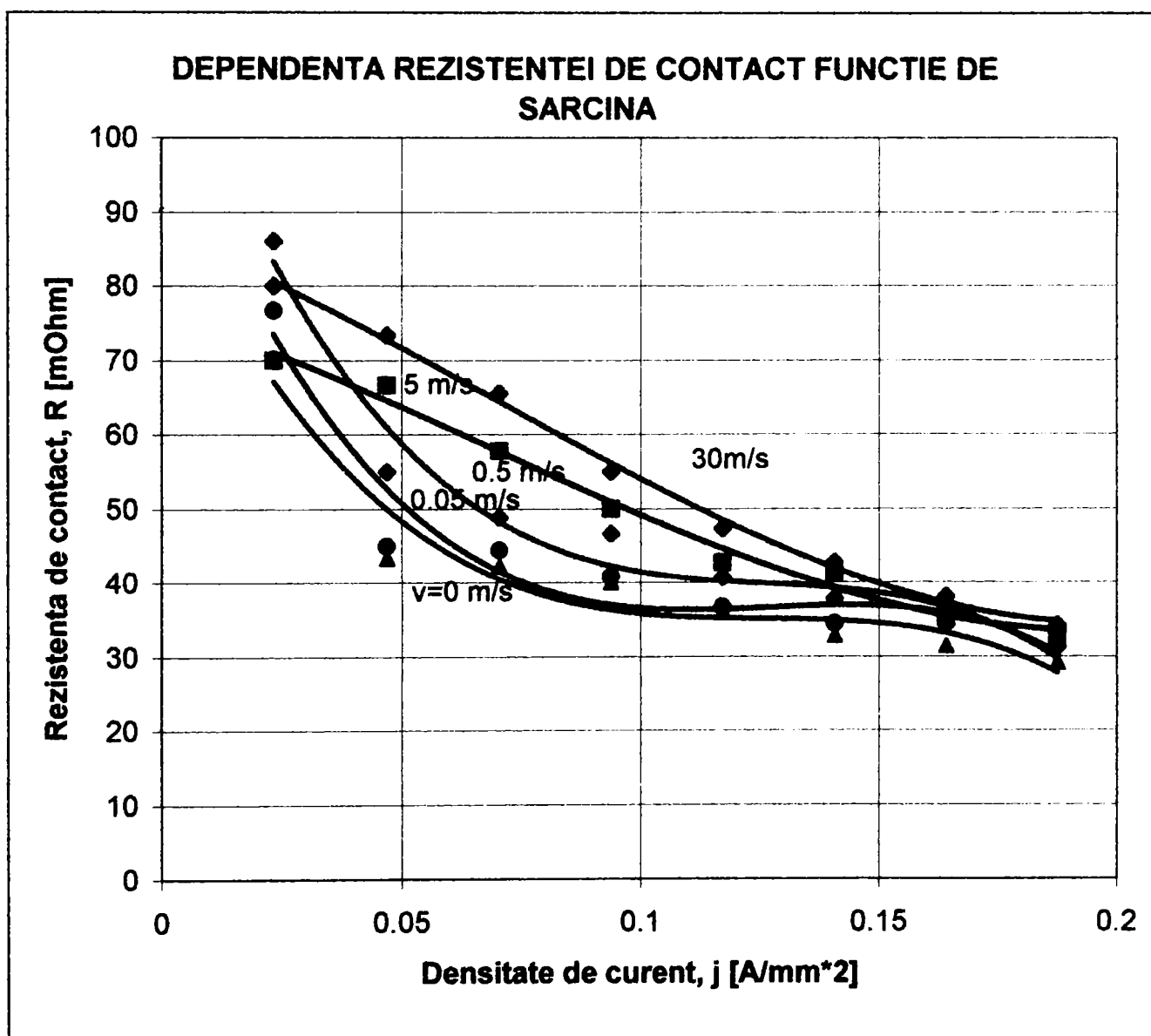


Fig.5.14 Rezistența electrică de contact la presiunea de 30 kPa

Conșiderații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT " ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii: 8x8x16 mm
 Presiunea medie de contact 20 kPa

Valori calculate

Densitate de curent $j, [A/mm^2]$	Rezistența de contact, R [mOhm] viteza relativă v, [m/s]				Intensitate curent I [A]	
	30	5	0.5	0.05	0	1 [A]
0.023437	113.333	110	96.6	86.66	90	1.5
0.046875	88.333	81.666	71.66	68.33	63.33	3
0.070312	74.444	70	67.77	57.77	54.4	4.5
0.09375	64.166	61.666	58.333	50	48.333	6
0.117187	55.333	52.666	48	43.33	45.333	7.5
0.140625	49.444	45	43.88	45.55	39.44	9
0.164062	44.38	42.38	42.38	42.5	36.66	10.5
0.1875	40.833	33.333	36.66	36.25	34.166	12

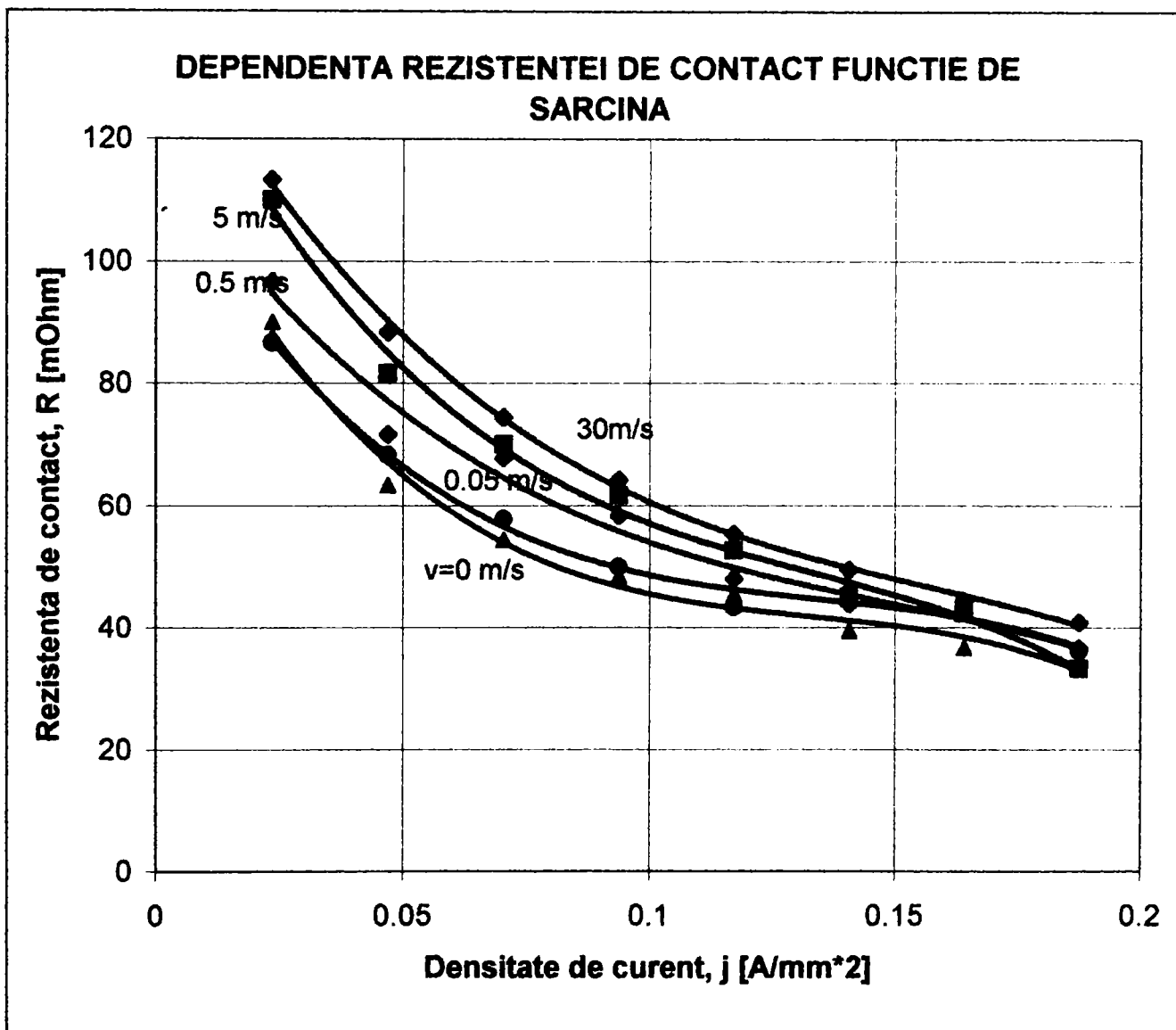


Fig.5.15 Rezistența electrică de contact la presiunea de 20 kPa

Conșiderații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT " ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii: 8x8x16 mm
 Presiunea medie de contact 10 kPa

Valori calculate

Densitate de curent $j, [A/mm^2]$	Rezistenta de contact, R [mOhm] viteza relativa $v, [m/s]$				Intensitate curent	
	30	5	0.5	0.05	0	I [A]
0.023437	160	150	143.33	146.66	133.33	1.5
0.046875	105	98.33	96.66	91.66	80	3
0.070312	85.55	77.77	71.11	67.77	62.22	4.5
0.09375	76.66	70	68.33	64.166	59.16	6
0.117187	69.33	59.33	59.33	55.333	52	7.5
0.140625	62.77	59.44	55	50.55	46.11	9
0.164062	58.09	52.857	49.52	48.09	42.85	10.5
0.1875	53.33	47.9166	43.33	43.33	39.166	12

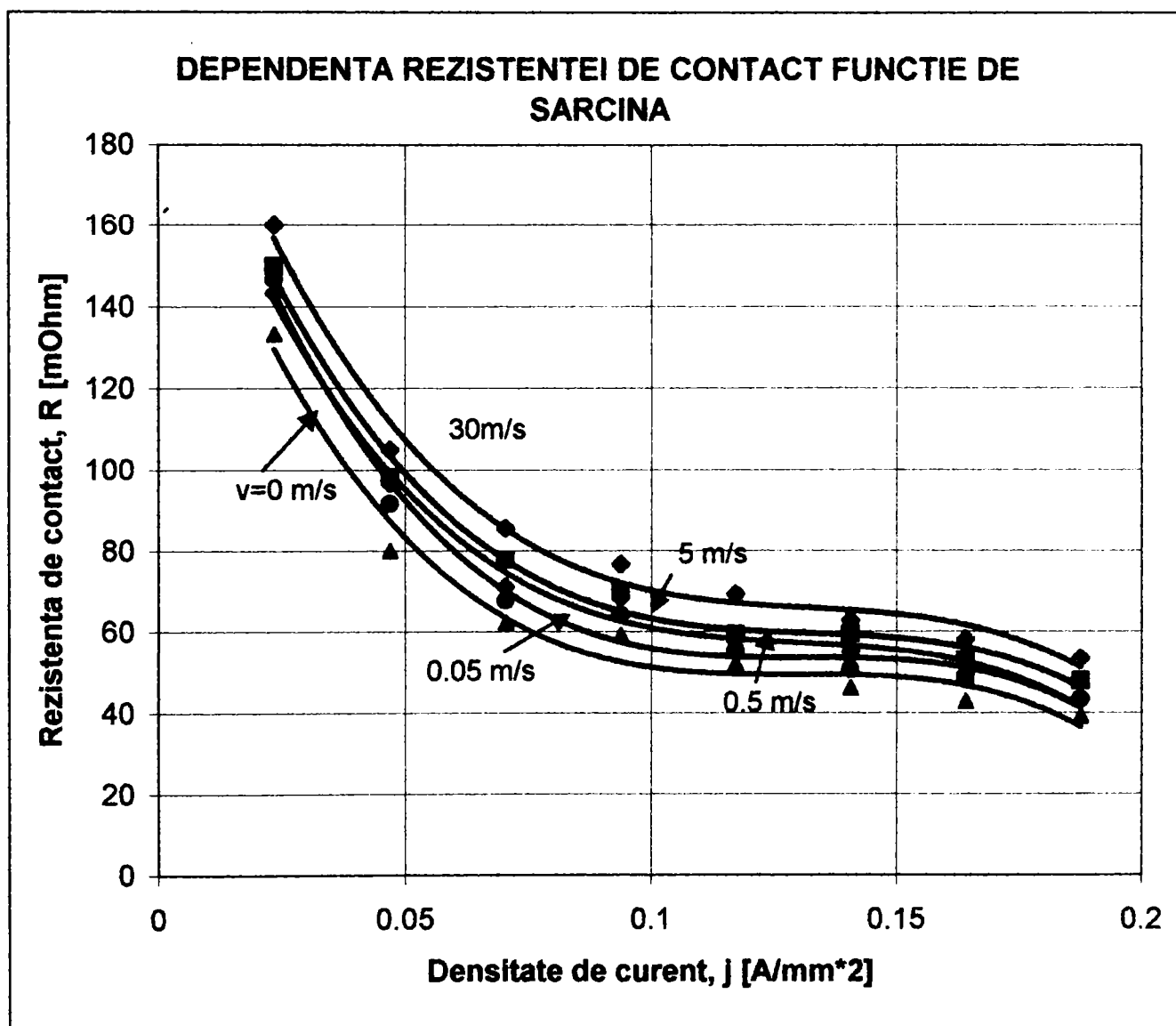


Fig.5.16 Rezistența electrică de contact la presiunea de 10 kPa

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

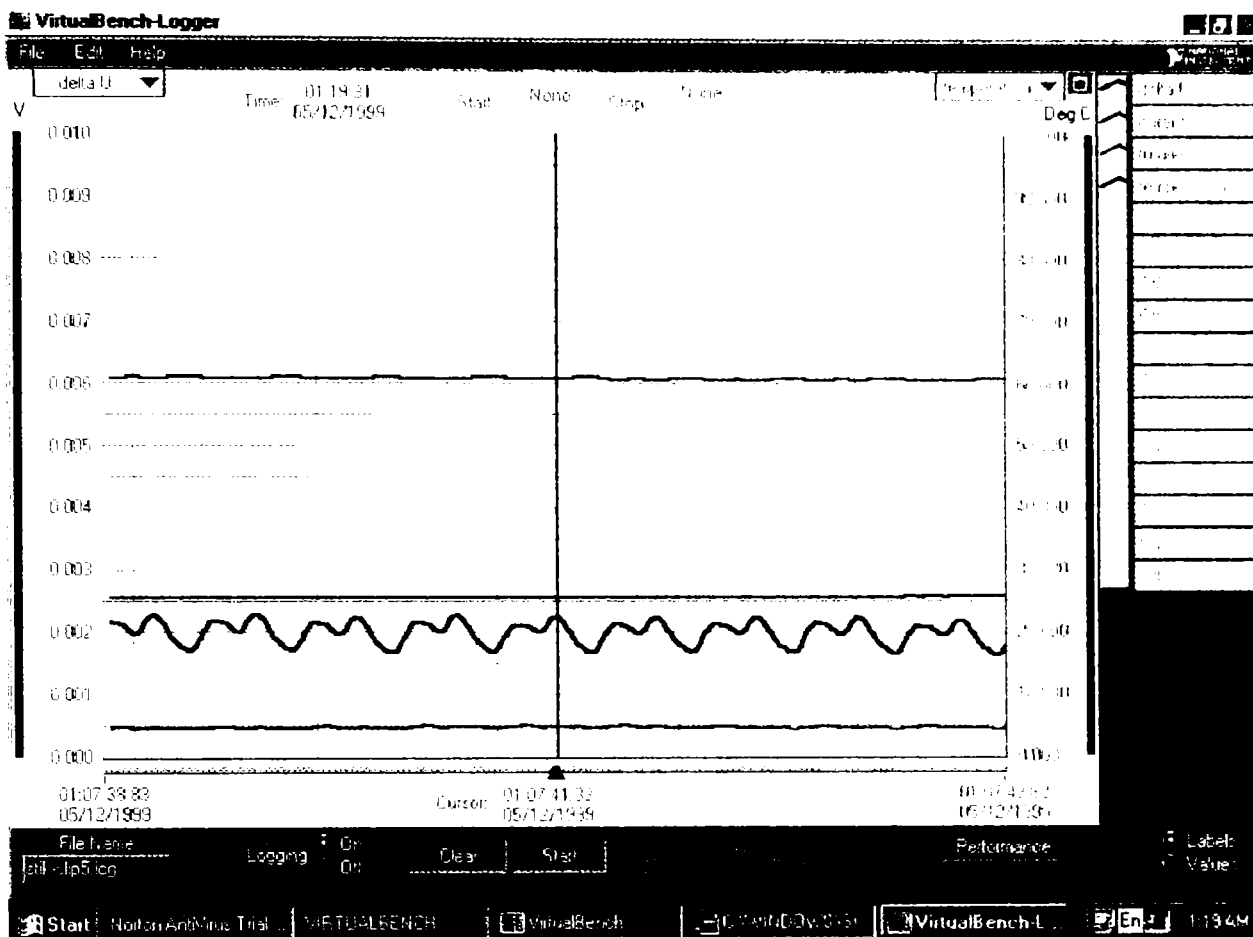


Fig.5.17 Oscilograma funcțională în prezența fenomenului de stick-slip

direcția radială a inelului, de mărimea jocului dintre perie și suportul acesteia, de particularitățile soluției sistemului elastic de apăsare a periei, de mărimea presiunii exercitate, de gradul de uzare al periei și în mod hotărâtor de natura materialelor ce constituie cupla de frecare.

În figura 5.17 este prezentată una dintre oscilogramele ridicate experimental și care evidențiază efectul fenomenului de stick-slip asupra căderii de tensiune pe cele două contacte alunecătoare înseriate.

Încercarea exemplificată s-a efectuat la viteza relativă medie $v = 0,4$ m/s (viteza unghiulară medie $\omega = 8,4$ rad/s), la o intensitate a curentului electric $I = 7,6$ A și la o presiune medie de $p = 20$ kPa, în timp ce temperatura periei s-a menținut în jurul valorii de $\theta = 26$ °C.

Din analiza curbei oscilografiate reprezentând căderea de tensiune se observă că oscilația întreținută are o perioadă de circa 0,55 s iar variația relativă ciclică a valorii căderii de tensiune, implicit a rezistenței de contact înregistrează variații importante de peste 26 % .

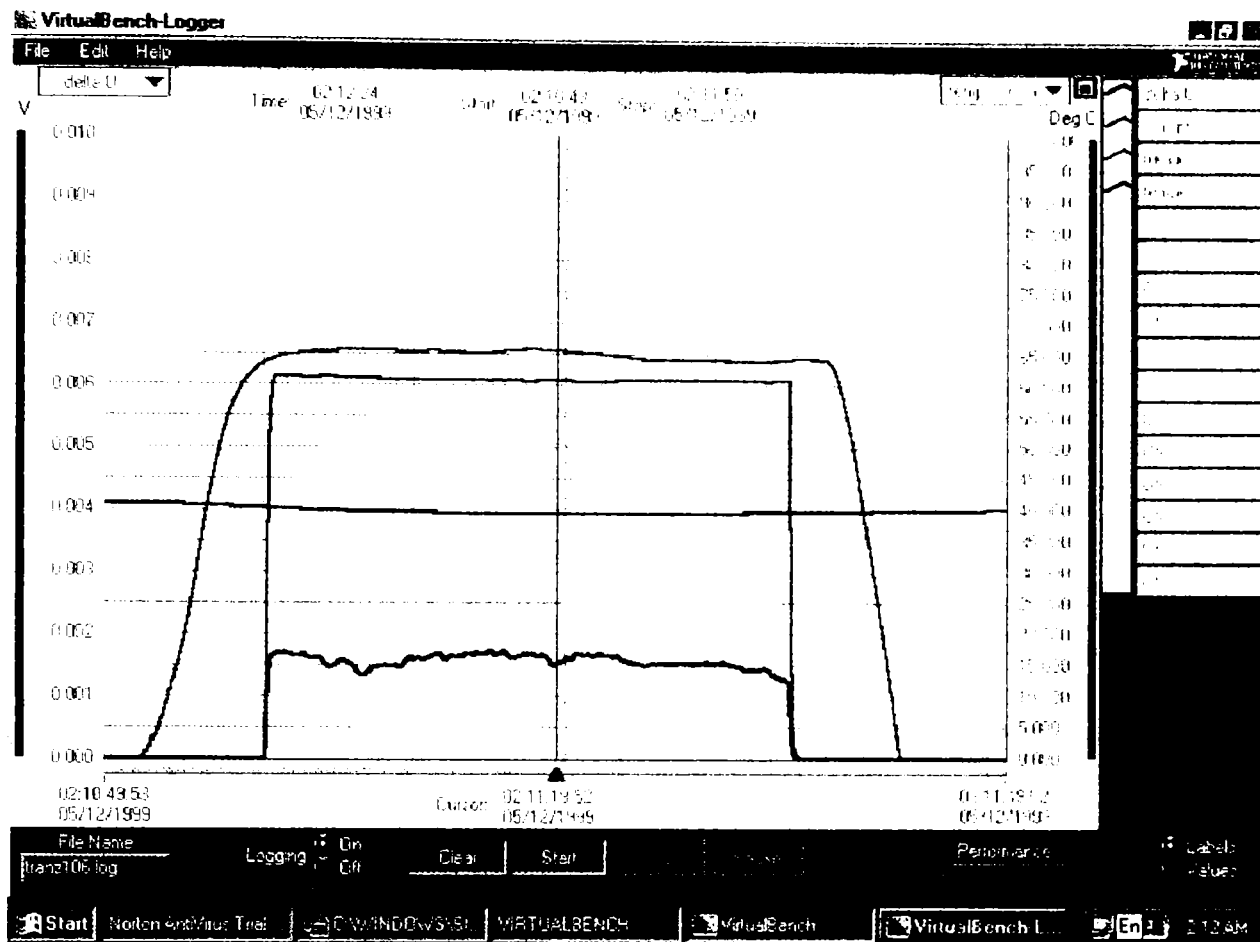


Fig. 5.18 Regim de funcționare intermitentă cu pauze relativ scurte

În programul de încercări s-a constatat că fenomenul o dată instalat, nu dispare la modificarea presiunii medii în limitele obișnuite de (10...40) kPa.

Pentru contactele ce funcționează la viteze coborâte trebuie să se acorde importanță mai ales modului de ghidare și de axare a periilor.

5.4.5 Funcționarea în regim de scurtă durată

Încercările de simulare a funcționării intermitente a contactului alunecător au scos în evidență faptul că funcție de mărimea intervalului pauzei apar diferențe de comportament. Astfel, în cazul ciclurilor repetate la intervale scurte de timp ca cel din figura 5.18, căderea de tensiune și implicit rezistența electrică a joncțiunii contactului prezintă o valoare relativ constantă în funcționare. Această observație este valabilă și în cazul funcționării la presiuni de contact ale căror valori se încadrează spre limitele minime uzuale. Parametrii evidențiați în oscilogramă sunt: temperatura medie de 40°C , viteza relativă de 5,7 m/s, intensitatea curentului de 7,5 A iar căderea de

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

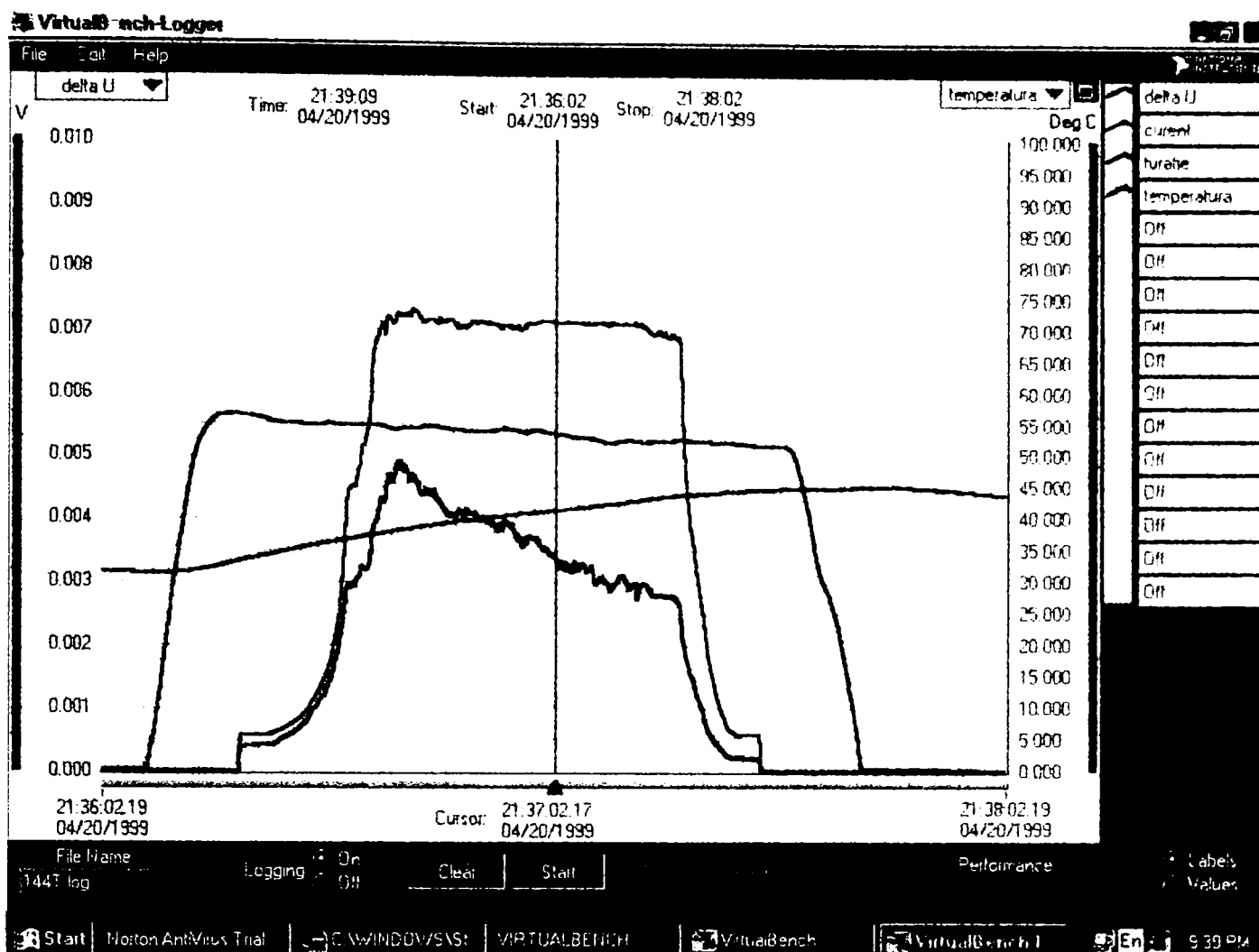


Fig.5.19 Regim de funcționare intermitentă cu pauze de durată mare

tensiune pe contactele înseriate de 0,6 V. Rezultatele din oscilograma analizată corespund funcționării contactului alunecător la presiunea medie de 20 kPa, repetarea ciclurilor funcționale a avut perioada de 5 minute.

Oscilograma din figura 5.19 evidențiază faptul că atunci când intervalul de pauză este de lungă durată, căderea de tensiune marchează în primele momente de funcționare fluctuații și creșteri ale valorii chiar și în condițiile în care s-a asigurat un nivel suficient de ridicat al presiunii de contact. În cazul exemplificat funcționarea s-a reluat după o pauză de 24 ore, presiunea de contact s-a situat la nivelul de 40 kPa. Datele oscilografiate au fost: intensitatea curentului electric 9,1 A, viteza medie 4,9 m/s iar căderea de tensiune a scăzut de la valoarea maximă de 1,65 V la o valoare medie de 0,92 V. În intervalul de numai două minute cât a durat ecranul afișat, temperatura periei a crescut de la 32°C la 44°C, ca urmare a unui proces disipativ intens.

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Variațiile importante ale căderii de tensiune înregistrate în primele momente de după reluarea funcționării se pot explica prin conductibilitatea electrică afectată la nivelul inelului și periei de influența fizico-chimică a mediului. De îndată ce pelicula este îndepărtată mecanic, atât căderea de tensiune cât și rezistența de contact se stabilizează.

5.5 Procese disipative mecanice și electrice la contactele alunecătoare

Procesele disipative specifice contactelor electrice alunecătoare sunt similare celor proprii unor lagăre de alunecare, respectiv cuplajelor (frâne) cu fricțiune. Modelul cel mai apropiat din punct de vedere constructiv-funcțional îl reprezintă cuplajele automate de tipul centrifugal la care saboții se pot deplasa printr-o mișcare de translație.

Spre deosebire însă de cazurile amintite, la contactele alunecătoare apar deosebiri datorate faptului că presiunile de contact sunt mult mai mici și la încălzirea cauzată de lucrul mecanic al forțelor de frecare se adaugă și aceea produsă prin efectul termic al curentului electric.

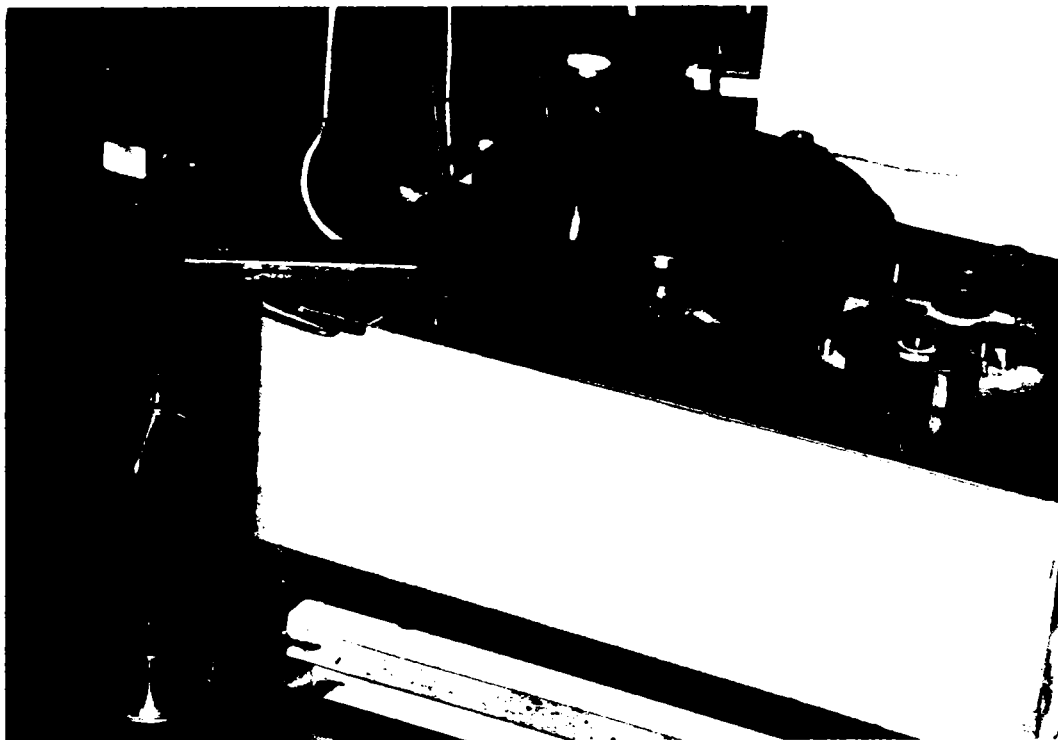


Fig.5.20 Tribometru. Vedere de ansamblu

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Puterea disipată specifică p^* în acest caz se exprimă printr-o sumă:

$$p^* = f \cdot p \cdot v + j \cdot \Delta U \quad (5.1.)$$

unde:

- f reprezintă coeficientul de frecare;
- p - presiunea de contact (valoare medie);
- v - viteza relativă inel - perie;
- j - densitatea curentului electric prin perie;
- ΔU - căderea de tensiune pe un singur contact alunecător.

Calculul procesului disipativ a impus efectuarea unor măsurători prealabile asupra coeficientului de frecare la contactele alunecătoare. În acest scop s-a recurs la utilizarea tribometrului prezentat în figura 5.20.

Date tehnice principale ale tribometrului sunt:

- puterea motorului electric de antrenare (asincron monofazat) este de 65 W;
- transmisia mecanică realizată prin curea trapezoidală tip Y;
- diametrul platanului de încercare $D_p = 220$ mm;
- poziționarea probei pe direcție radială reglabilă în limitele $r_p \in [10 \dots 100]$ mm;
- asigurarea presiunii de contact se realizează prin greutăți calibrate (încărcare gravitațională).

Valorile măsurate apropiate celor prezentate în literatura de specialitate au evidențiat faptul că atunci când în structura compozită a periei se folosesc lubrifianți solizi (bisulfura de molibden), coeficientul de frecare înregistrează valori scăzute (sub 0,1) în domeniul de presiuni și viteze uzuale. Din figura 5.21 se constată că atât în cazul perechii de materiale grafit natural/oțel călit cât și în cazul metal-grafit / bronz se înregistrează o ușoară creștere a coeficientului de frecare o dată cu creșterea vitezei relative. În limitele uzuale de variație ale presiunii de contact nu se înregistrează variații valorice semnificative în raport cu cele prezentate în figura 5.21.

Fișele din figurile 5.22 și 5.23 evidențiază intensitatea procesului disipativ în funcție de presiunea medie exercitată la nivelul contactului analizat la diferite valori ale vitezei de alunecare.

Din analiza dependențelor prezentate rezultă că la viteze ce depășesc (8...10) m/s ponderea procesului disipativ cauzat de frecările dintre inele și perii depășește semnificativ ponderea de natură termo-electrică. Abia la valori ale vitezei cuprinse între valorile de (2...8) m/s procesul disipativ electric devine comparabil ca valoare cu cel mecanic.

La viteze reduse sub (1...2) m/s disiparea termo-electrică depășește procesul disipativ de natură mecanică cu atât mai mult, cu cât scade atât viteza relativă și presiunea de contact. La viteze reduse sub 0,1 m/s pierderile prin frecări devin neglijabile.

Din figura 5.24 rezultă implicațiile directe ale ponderii puterii disipate totale

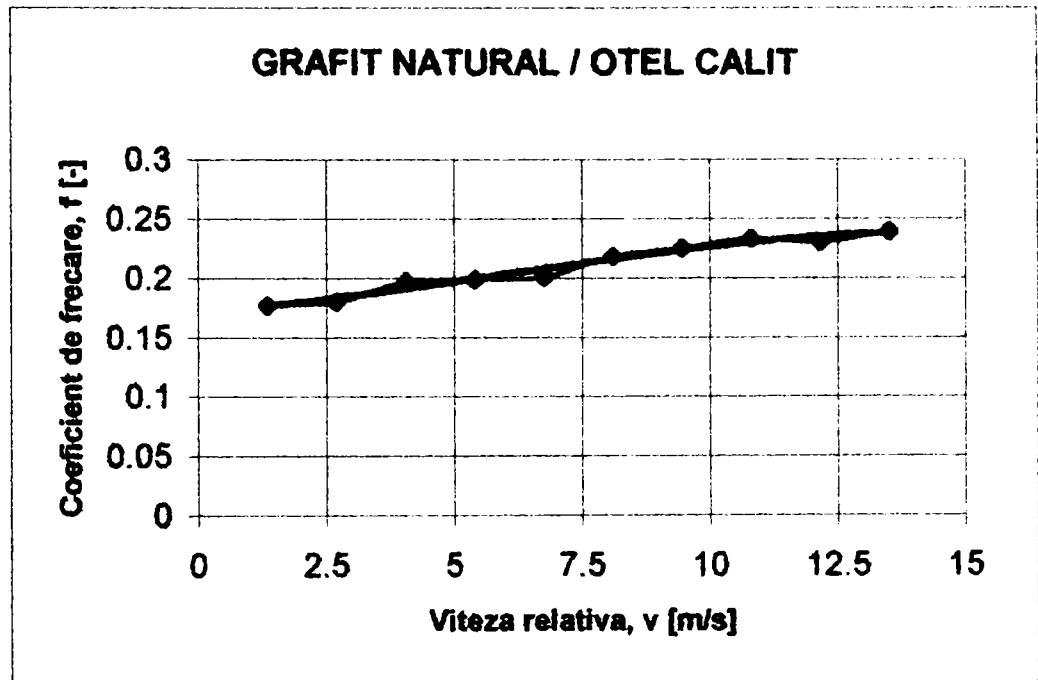
PERII COLECTOARE DIN GRAFIT NATURAL EKL G 19

Duritate HR 10/20 80; Densitate 1,40 kg/dm³

Epruvete perii diametru 10 mm; Presiune medie 25 kPa

Materiale de frictiune grafit natural / otel calit

Viteza relativa v [m/s]	Coeficient de frecare f [-]
1.35	0.177
2.7	0.18
4.05	0.197
5.4	0.199
6.75	0.201
8.1	0.218
9.45	0.225
10.8	0.233
12.15	0.23
13.5	0.239



PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89

Duritate HR 10/60; Densitate 4,1 - 4,6 kg/dm³

Epruvete perii diametru 10 mm; Presiune medie 25 kPa

Materiale de frictiune: compozitie din pulbere de cupru, grafit natural, pulbere de plumb, bisulfura de molibden / bronz (Cu Sn 10)

Viteza relativa, v [m/s]	Coeficient de frecare, f, [-]
1.35	0.072
2.7	0.067
4.05	0.07
5.4	0.073
6.75	0.077
8.1	0.079
9.45	0.08
10.8	0.087
12.15	0.089
13.5	0.091

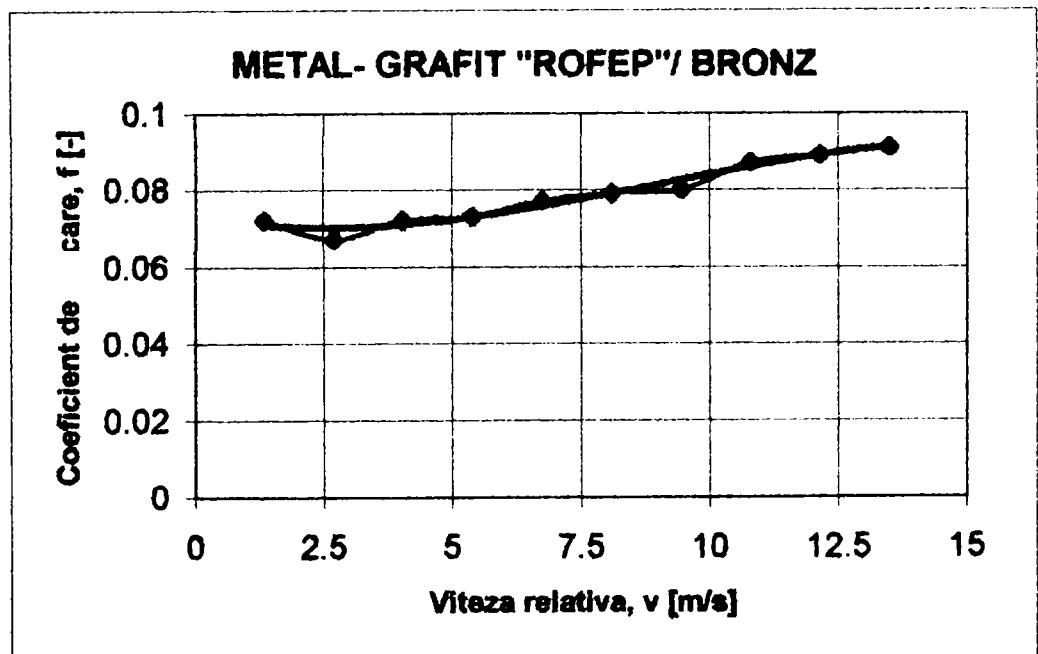


Fig. 5.21 Coeficienții de frecare determinați experimental

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm

PROCESUL DISIPATIV ELECTROMECHANIC

Presiunea medie [kPa]				Presiunea medie [kPa]			
Putere disipata specif. [W/mm ²]				Putere disipata specif. [W/mm ²]			
Viteza relativa medie 30 m/s				Viteza relativa medie 5 m/s			
10	20	30	40	10	20	30	40
0.27	0.54	0.81	1.08	0.045	0.09	0.135	0.18
0.12	0.092	0.077	0.069	0.1078	0.083	0.074	0.068
0.39	0.632	0.887	1.149	0.1528	0.173	0.209	0.248

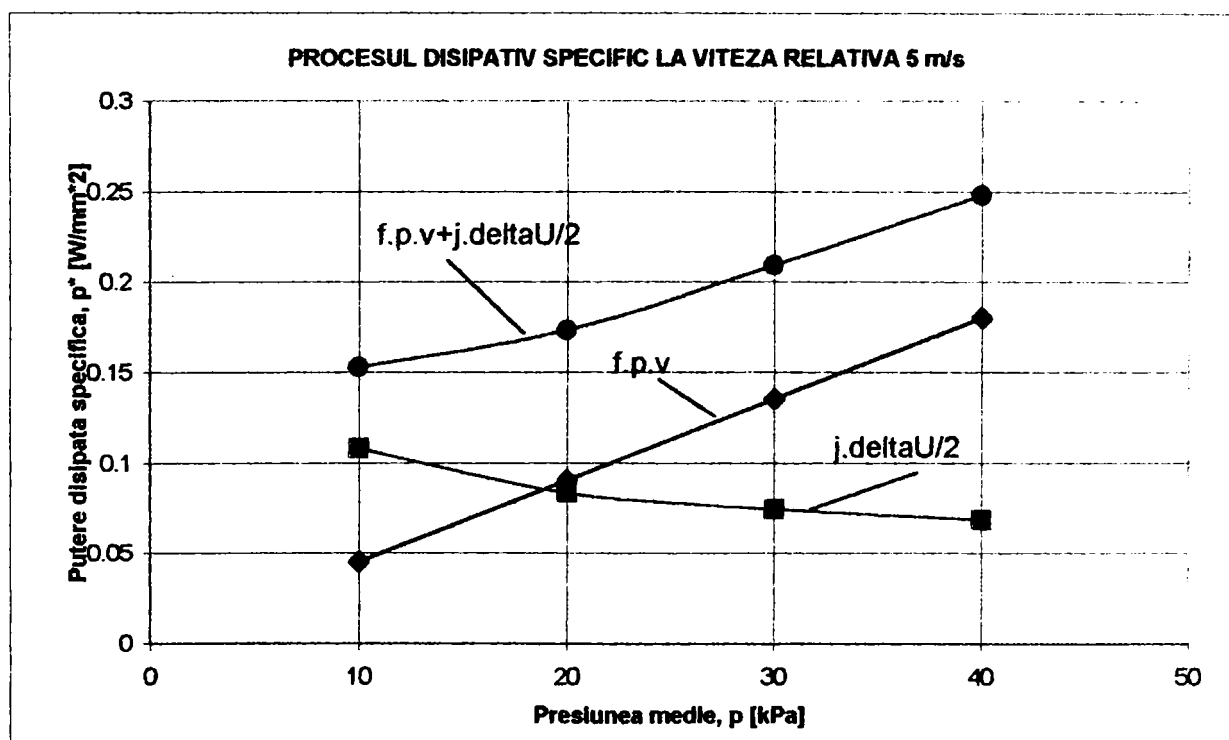
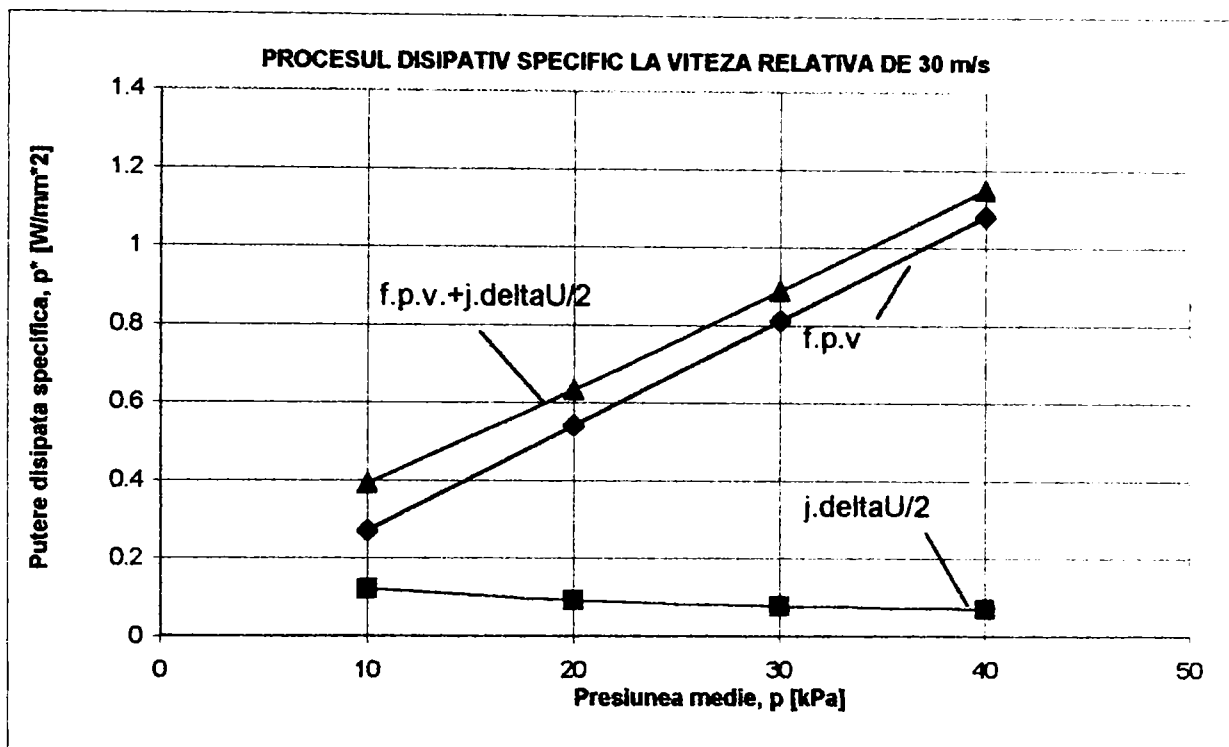


Fig.5.22 Procesul disipativ la contacte alunecătoare ce funcționează la viteze mari

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm

PROCESUL DISIPATIV MECANIC SI ELECTRIC

Presiunea medie [kPa]	Putere disipata specif. [W/mm ²] Viteza relativa medie 0.5 m/s			Presiunea medie [kPa]	Putere disipata specif. [W/mm ²] Viteza relativa medie 0.05 m/s		
	meccanic	electric	cumulat		meccanic	electric	cumulat
10	0.0045	0.0975	0.102	10	0.00045	0.0975	0.09795
20	0.009	0.08156	0.09056	20	0.0009	0.0815	0.0824
30	0.0135	0.07125	0.08475	30	0.00135	0.07287	0.07422
40	0.018	0.05906	0.07706	40	0.0018	0.060863	0.062663

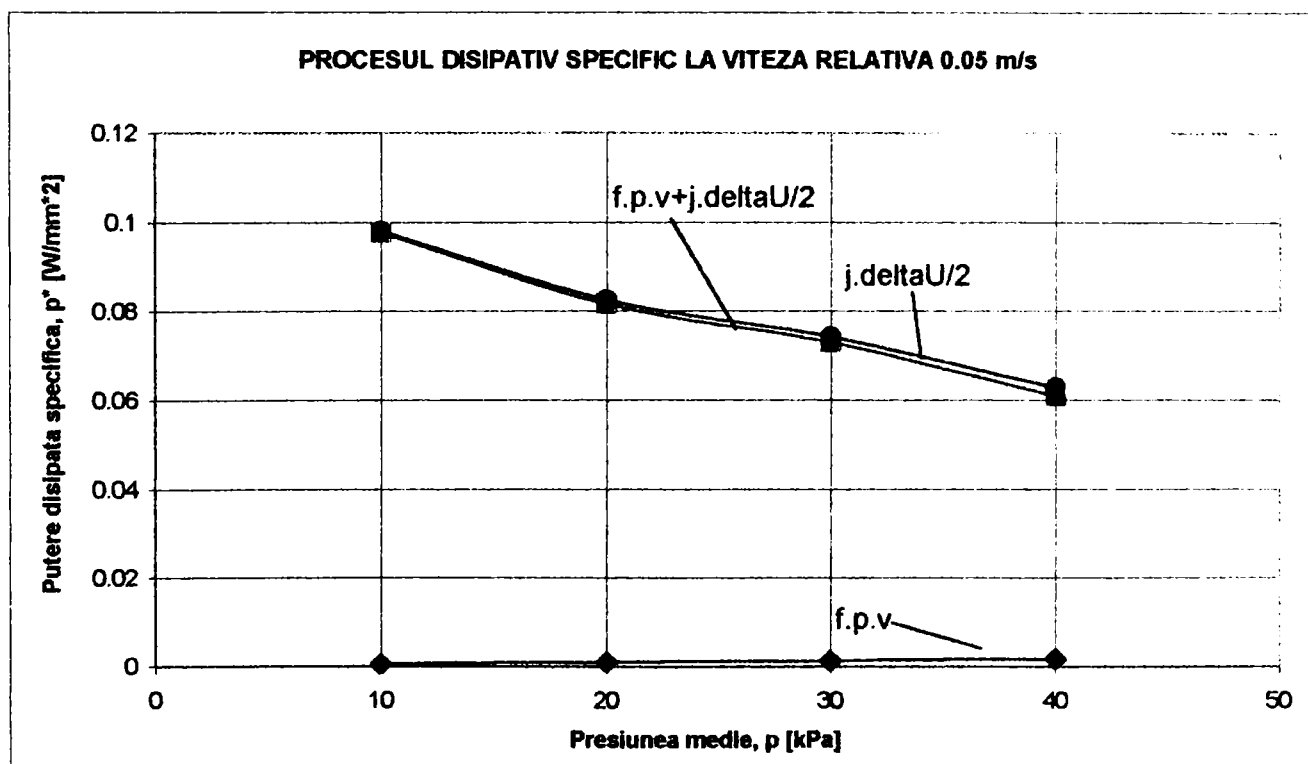
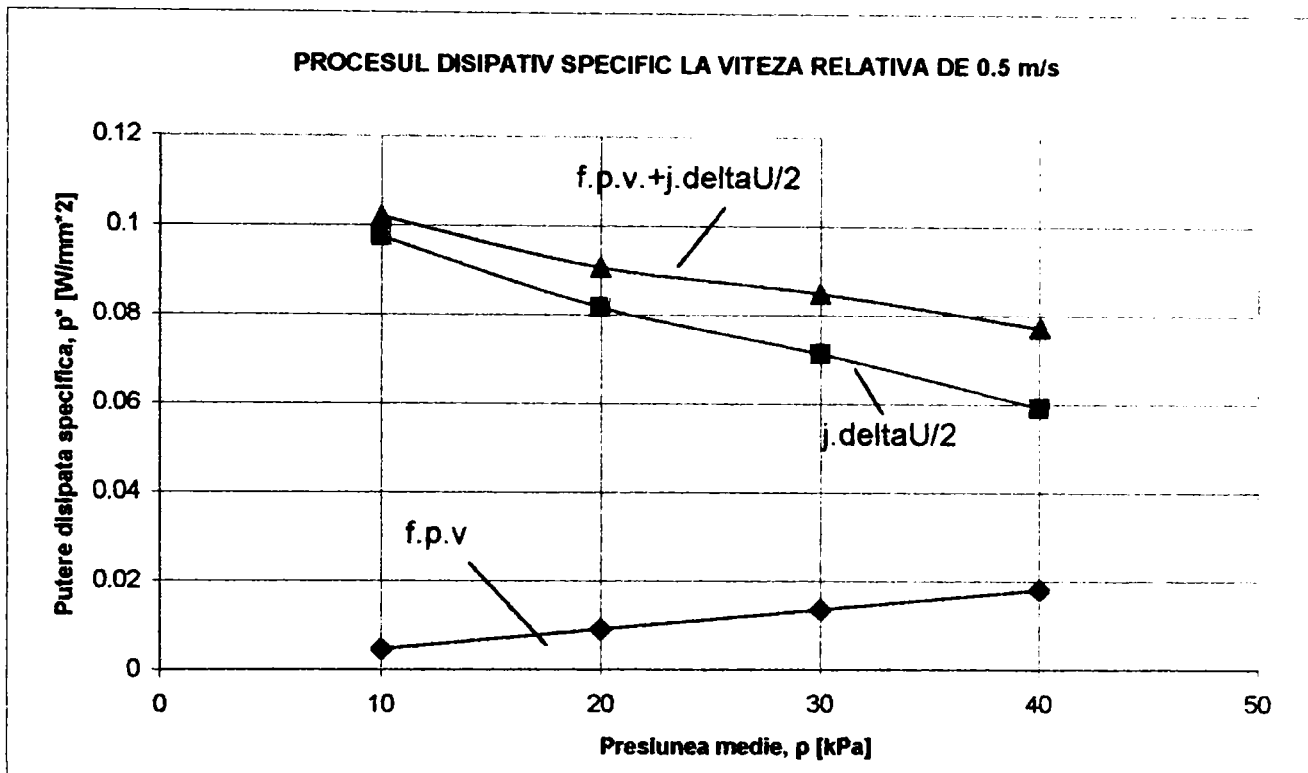


Fig.5.23 Procesul disipativ la contacte alunecătoare ce funcționează la viteze mici

PERII COLECTOARE DIN METAL-GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/17-89
 linele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm, dimensiuni perii 8x8x16 mm

Putere disipata specif. p^* [W/mm ²]	Temperatura maxima a periei [grd.C]	Observatii			Temperatura mediului ambiant in timpul masuratorilor 19-21 grd.C
		Presiunea [kPa]	Viteza rel. [m/s]	Conditii de ventilatie-racire	
0.07706	41	40		0.5 reduce	19-21
0.07422	42	30 si 40	0.05 si 0	nesatisfacatoare	
0.0824	43	20	0.05 si 0	nesatisfacatoare	
0.08475	44	30		0.5 reduce	
0.0975	45	10	0.05 si 0	nesatisfacatoare	
0.1528	47	10		5 satisfacatoare	
0.09056	48	20		0.5 reduce	
0.173	59	20		5 satisfacatoare	
0.209	68	30		5 satisfacatoare	
0.248	74	40		5 satisfacatoare	
0.39	82	10	30	bune	
0.632	91	20	30	bune	
0.887	101	30	30	bune	
1.149	112	40	30	bune	

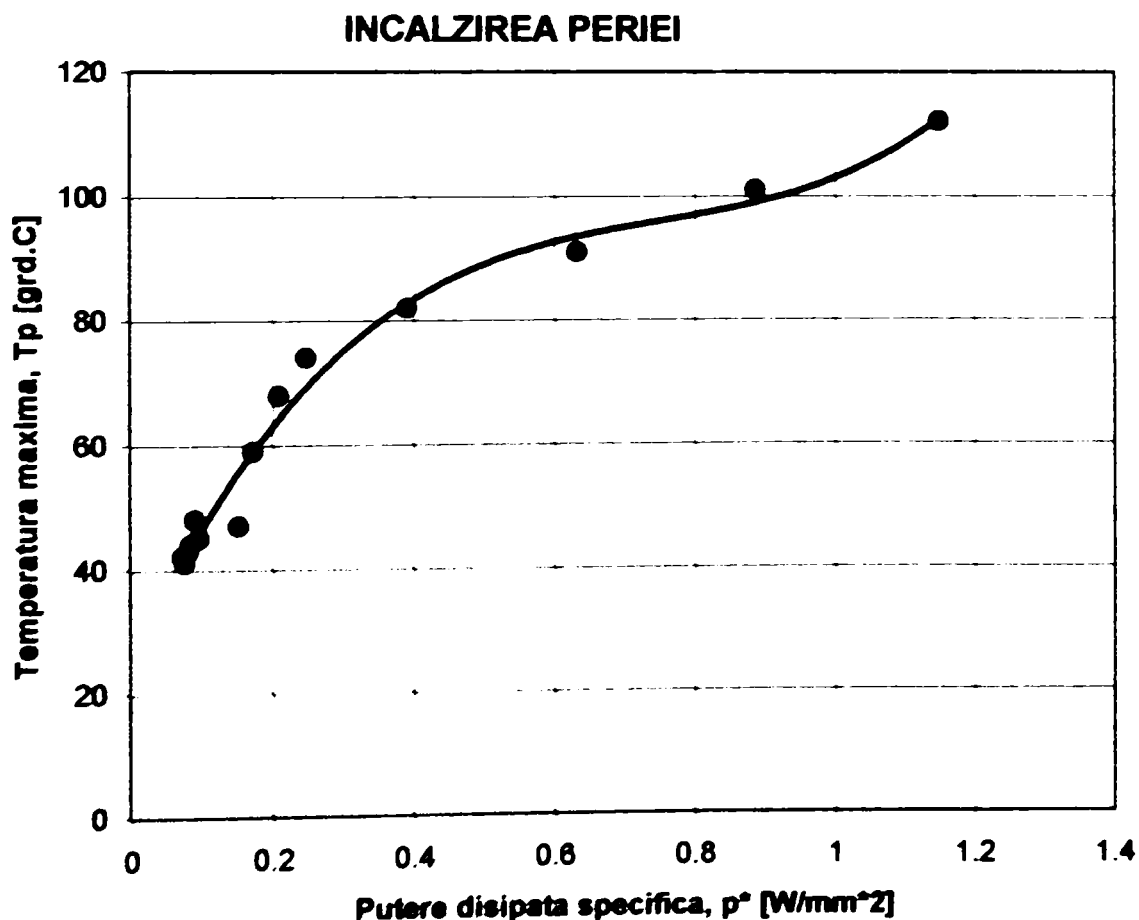


Fig. 5.24 Încălzirea funcție de densitate curent, viteză și presiune de contact

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

asupra temperaturii până la care are loc încălzirea periilor din metal-grafit "ROFEP". Ca o consecință a procesului disipativ are loc uzarea elementelor constituente ale contactul cu frecare. Încercările s-au efectuat simultan pe seturi de câte patru contacte alunecătoare. Astfel periile 1 și 2 respectiv 3 și 4 au fost încărcate la presiuni medii de 40 kPa iar perechile de perii 5 și 6 împreună cu periile 7 și 8 au fost supuse unei presiuni medii de 20 kPa. Încercările de uzare s-au efectuat la viteza medie de circa 5 m/s. Periodic s-a intervenit ori de câte ori era nevoie să se efectueze corecția vitezei sau presiunii de contact.

Din analiza rezultatelor prezentate în figura 5.25 se pot desprinde următoarele concluzii:

- uzarea în timp a periilor de contact depinde de intensitatea procesului disipativ. Prin creșterea presiunii de contact de la 20 la 40 kPa uzarea volumică exprimată în mm^3 de material îndepărtat practic s-a dublat pe parcursul intervalului de 500 ore cât a durat încercarea,

- exceptând faza de început de circa 30...40 ore de încercare, în restul timpului independent de presiunea medie de încercare uzarea volumică a progresat practic liniar,

- faptul că datele obținute nu prezintă o dispersie prea mare confirmă buna calitate a periilor fabricate la ROFEP Urziceni,

- pentru perechea de materiale perii colectoare din metal-grafit / inele din CuSn 10 s-au obținut următoarele valori ale uzurii raportate la drumul parcurs:

- la presiunea de 20 kPa... $8,94 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{km}$;

- la presiunea de 40 kPa... $19,55 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{km}$;

S-a avut în vedere că în cele 500 ore de încercare s-a parcurs un drum de frecare de 8949 km.

5.6 Contactul alunecător perii din grafit-argint / inele din argint

Investigațiile s-au efectuat asupra produsului H12 HBM Schleifringkopf seria 3336.

Pachetul de contacte alunecătoare la produsul menționat (fotografia din figura 5.28) este format din:

- 12 inele de contact din argint cu diametrul $\Phi=14 \text{ mm}$ și lățimea $b=3 \text{ mm}$;

- 12 perii amovibile duble diametral opuse din grafit cu argint pe fiecare inel cu lungimea $L=7 \text{ mm}$, lățimea $c=2,5 \text{ mm}$ și înălțimea $h=6 \text{ mm}$.

Presiunea de contact este asigurată pentru fiecare pereche de perii în parte prin intermediul unor arcuri elicoidale cilindrice de întindere. Presiunea medie determinată pentru inelele 1...6 este în medie de 32 kPa.

Încercările experimentale au fost orientate spre determinarea factorilor ce influențează valoarea rezistenței de contact.

PERII COLECTOARE DIN METAL GRAFIT "ROFEP URZICENI" STR 1570/1/7-89
 Inele din Cu Sn 10, dimensiuni: diametru / latime 96 / 10 mm; dimensiuni perii 8x8x16 mm
Incerari de uzare a periiilor de contact la viteza medie de 5 m/s (turatia medie 1000 rot / min),
 la presiunile de contact de 20 kPa (putere disipata specifica $p^*=0.09 \text{ W/mm}^2$) si de 40 kPa
 (putere disipata specifica $p^*=0.18 \text{ W/mm}^2$)

REZULTATE EXPERIMENTALE

Uzarea volumica a periiilor, u^* [mm^3]

Timpul de incercare t^* [ore]	Presiunea medie [kPa]							
	40 peria 1	40 peria 2	40 peria 3	40 peria 4	20 peria 5	20 peria 6	20 peria 7	20 peria 8
0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	12.8	11.52	9.6	13.44	6.4	5.7	6.6	7.68
30	19.2	22.4	18.56	23.04	9.6	9.6	10.88	10.88
50	22.4	24.3	22.4	28.8	12.8	14	14.08	14.08
100	41.9	44.8	46.08	51.2	21.2	20.48	22.4	23.04
160	67.2	65.28	57.6	70.4	35.2	32	37.76	38.4
240	92.8	99.2	98.56	105.6	41.6	38.4	48	51.2
360	134.4	140.8	137.6	144	60.8	57.6	67.2	70.4
500	179.2	185.6	188.8	166.4	80	70.4	86.4	76.8

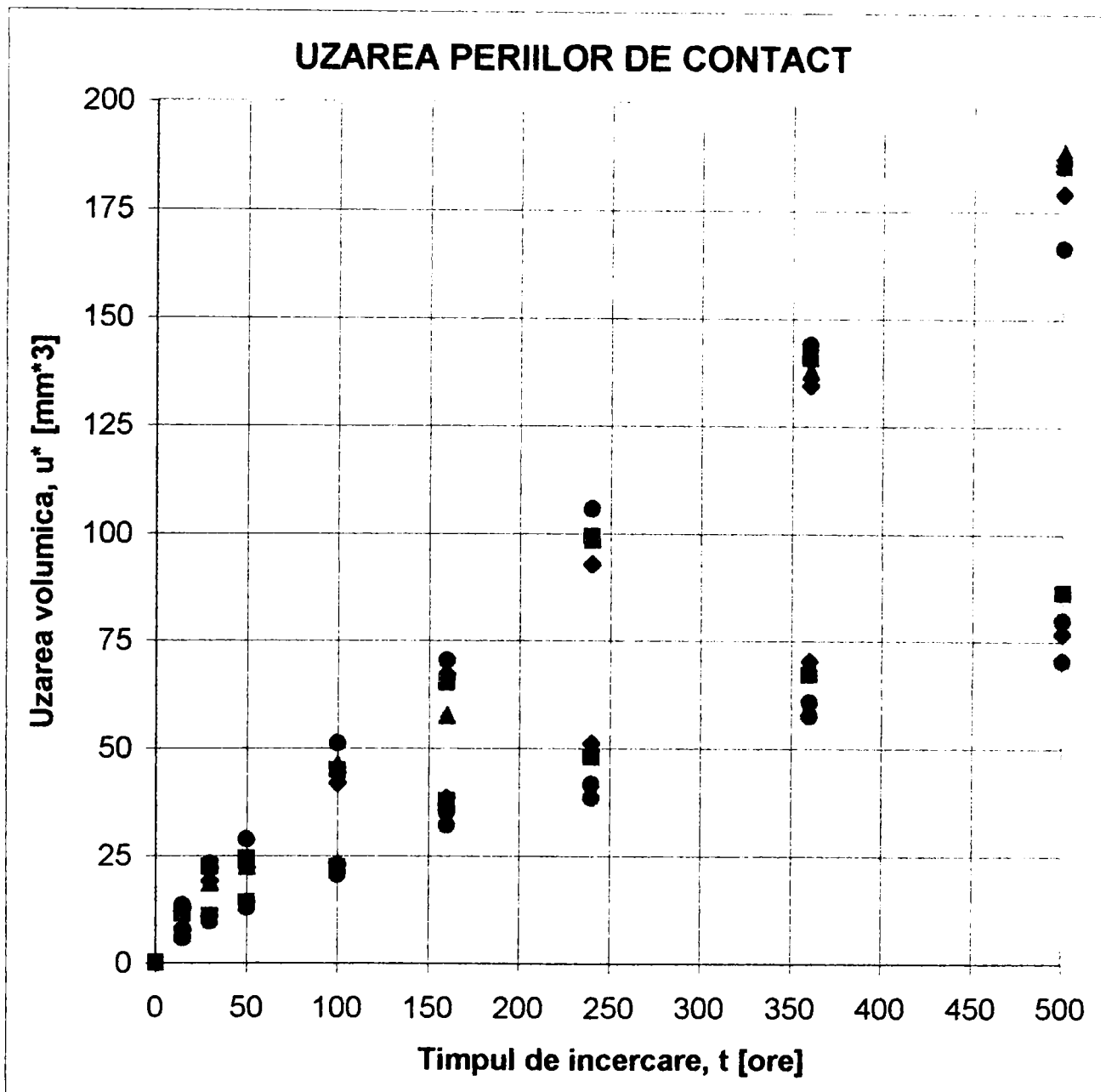


Fig.5.25 Uzarea volumică a periiilor de contact

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

Trebuie reținute anumite particularități ale contactelor pe bază de argint, utilizate fie pentru măsurători de precizie, fie pentru vehicularea informației între emițători și receptori aflați în mișcare relativă. În primul caz contactul (amovibil) dintre perii și inele are loc doar în perioada efectuării măsurătorilor. În astfel de situații densitatea curentului electric este întotdeauna redusă. Regimul funcțional menționat este dorit în scopul minimizării efectelor termice asupra traductoarelor, mai ales dacă acestea sunt timbre (mărci) tensometrice. Alimentarea montajelor de măsurare în curent continuu sau în curent alternativ la 50 Hz sau 5 kHz se realizează la tensiunii de circa 4 V la bornele montajelor a căror rezistență sau impedanță standard este de cel mult 120 Ω sau (8...10) V dacă rezistența sau impedanța caracteristică este de ordinul a (600...1000) Ω . Rezultă că intensitățile curenților electrici se situează în domeniul zecilor sau cel mult a câtorva sute de miliamperi.

În programul de încercări contactele alunecătoare au fost străbătute de curent continuu având valorile intensităților de 25 respectiv 100 mA adică densități de curent de $7,14 \cdot 10^{-4}$ A/mm² și de $2,86 \cdot 10^{-3}$ A/mm². În figura 5.26 a și b este prezentată căderea de tensiune corespunzătoare porțiunii de circuit format din două contacte alunecătoare înseriate. Se subliniază faptul că pe lângă rezistența de contact foarte scăzută (sub 25 m Ω) s-a constatat o bună reproducere a valorilor chiar și atunci când măsurătorile au fost repetate după un interval relativ lung de 14 zile.

În figura 5.27 a și b sunt prezentate valori ale căderii de tensiune și ale rezistenței contactului grafit-argint / argint în funcție de o gamă largă de valori ale densității curentului electric. Determinările s-au executat la o viteză relativă frecvent întâlnită în aplicații, la o turație medie de 3000 de rot/min.

În cazul contactelor grafit-argint / argint se constată o scădere sensibilă a valorii rezistenței de contact în raport cu contactele alunecătoare din grafit sau cele sinterizate bazate pe cupru ca principal material în compoziție / bronz, fapt explicabil prin rezistivitatea electrică a materialelor și comportamentul acestora în raport cu acțiunea mediului.

La contactele grafit-argint / argint fluctuația valorilor rezistenței contactului sunt sensibil mai mici decât cele înregistrate la contactele cu perii din grafit sau metal-grafit și inele din cupru.

Utilizarea limitată a contactelor alunecătoare bazate pe aliaje din argint se datorează prețului de cost relativ ridicat atât al periilor realizate prin sinterizare cât și aliajelor cu procent foarte ridicat de argint ce se utilizează la uzinarea inelelor.

Pentru a optimiza funcționarea contactelor alunecătoare în condiții variate de exploatare, încercările experimentale au reliefat posibilitățile de stabilire a presiunilor de contact în funcție de viteza relativă și densitatea curentului astfel ca uzarea, încălzirea și calitatea contactului electric să se situeze la nivel optim din punct de vedere tehnico-economic. Această condiție nu poate fi realizată prin documentația

PERII COLECTOARE DIN GRAFIT-ARGINT / INELE COLECTOARE DIN ARGINT

Set contacte alunecatoare SK 12 Hottinger Baldwin Messtechnik Darmstadt

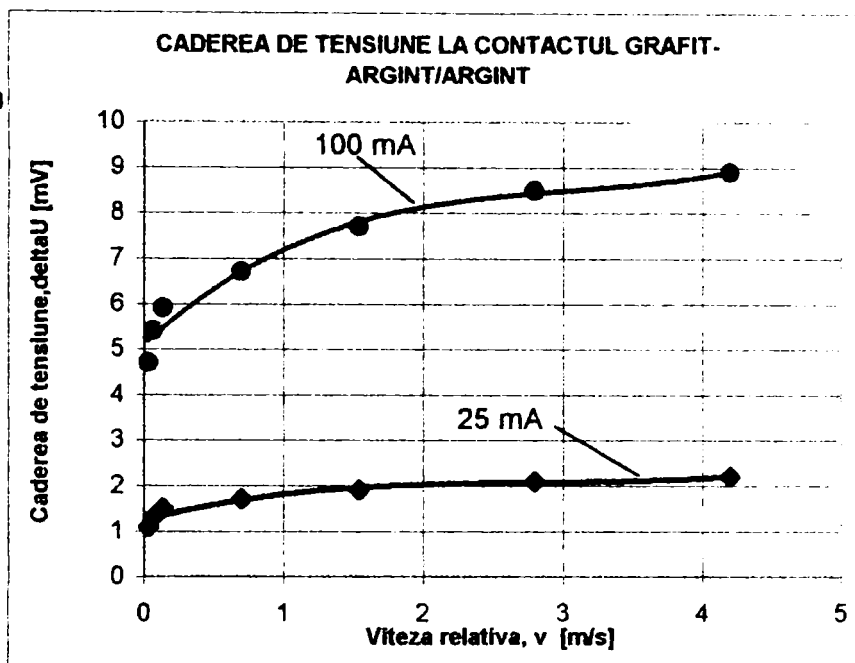
Perii: Lungimea L=7 mm, latimea c=2,5 mm; inele colectoare: diametrul d=14 mm, latime b=3 mm
 Presiunea de contact medie p=32 kPa

CADEREA DE TENSIUNE [mV] LA DENSITATI REDUSE ALE CURENTULUI ELECTRIC

Viteza re- lativa me- die v [/]	Intensitatea curentului electric I [mA]	
0.035	1.1	4.7
0.07	1.3	5.4
0.14	1.5	5.9
0.7	1.7	6.7
1.54	1.9	7.7
2.8	2.1	8.5
4.2	2.2	8.9

NOTA. Caderea de tensiune masurata pentru doua contacte practic identice inseriate.

a)



REZISTENTA DE CONTACT [mOhm] LA DENSITATI REDUSE ALE CURENTULUI ELECTRIC

Viteza re- lativa me- die v [m/s]	Intensitatea curentului electric I [mA]	
0.035	25	11.75
0.07	11	13.3
0.14	13	14.75
0.7	15	17
1.54	16.75	19.5
2.8	19	21
4.2	21.25	22

Nota. Contactul alunecator este realizat prin doua jonctiuni perie-inel legate in paralel

b)

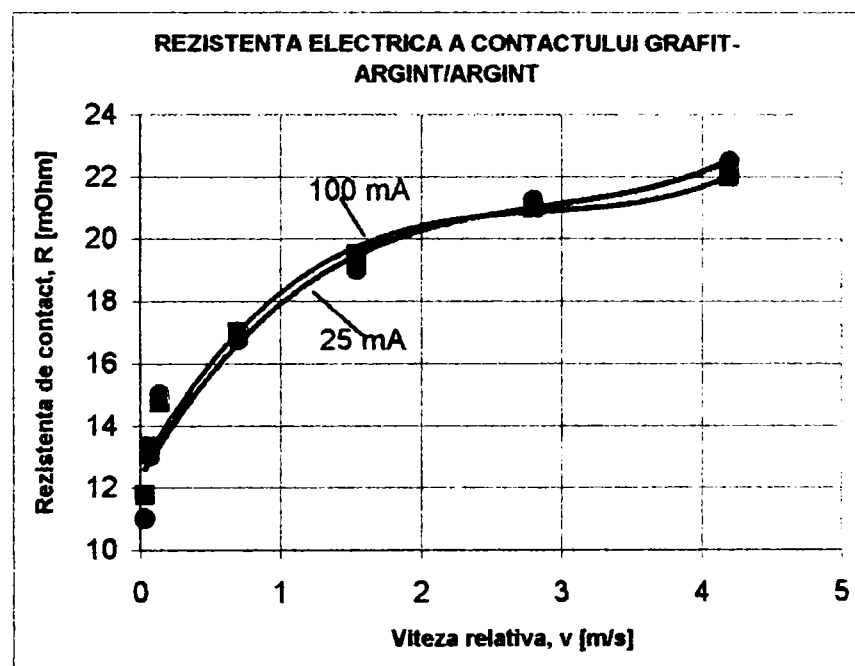


Fig.5.26 Caderea de tensiune si rezistenta electrica la contactul alunecator grafit-argint/argint, utilizat la densitati reduse ale curentului electric

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

PERII COLECTOARE DIN GRAFIT-ARGINT / INELE COLECTOARE DIN ARGINT

Set contacte alunecatoare SK 12 Hottinger Baldwin Messtechnik Darmstadt

Perii: Lungimea $L=7$ mm, latimea $c=2,5$ mm; inele colectoare: diametrul $d=14$ mm, latime $bh=3$ mm

Presiunea de contact medie $p=32$ kPa

CADEREA DE TENSIUNE [mV] LA DENSITATI MEDII SI MARI ALE CURENTULUI ELECTRIC

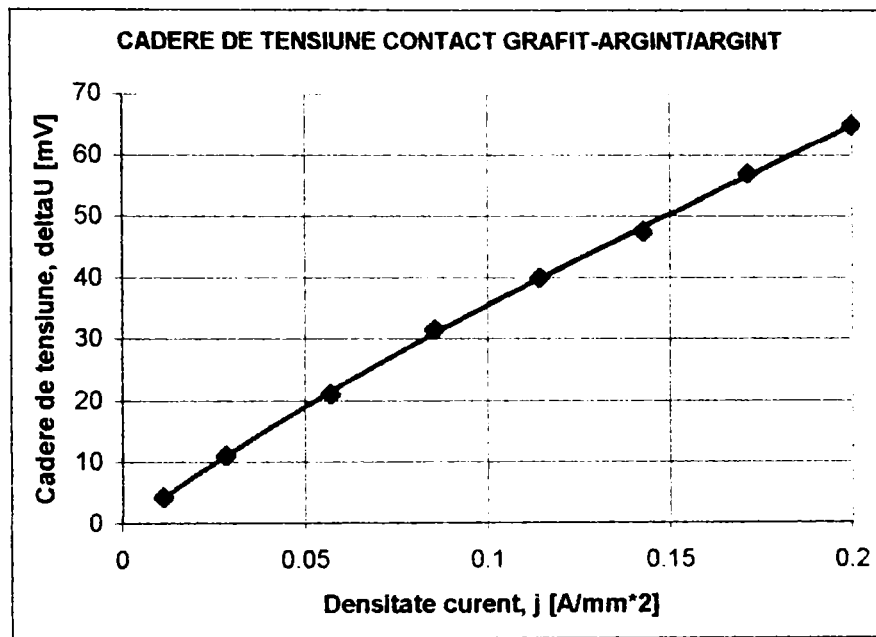
Presiunea medie 32 kPa

Viteza relativa medie $v=2,19$ m/s (turatia $n=3000$ rot/min)

Densitate curent, j [A/mm ²]	Cadere de tensiune U [mV]
0.01143	4.3
0.02857	11
0.05714	21
0.08571	31.5
0.11428	40
0.14285	47.5
0.17142	57
0.2	64.75

Nota. Caderea de tensiune măsurată pe două contacte practic identice inseriate.

a)



REZISTENTA OHMICA [mOhm] LA DENSITATI MEDII SI MARI ALE CURENTULUI ELECTRIC

Densitate curent, j [A/mm ²]	Rezistenta electrica [mOhm]
0.01143	21.5
0.02857	22
0.05714	21
0.08571	21
0.11428	21
0.14285	19
0.17142	19
0.2	18.5

Nota. Contactul alunecator este realizat prin două jonctiuni perie-inel legate in paralel

b)

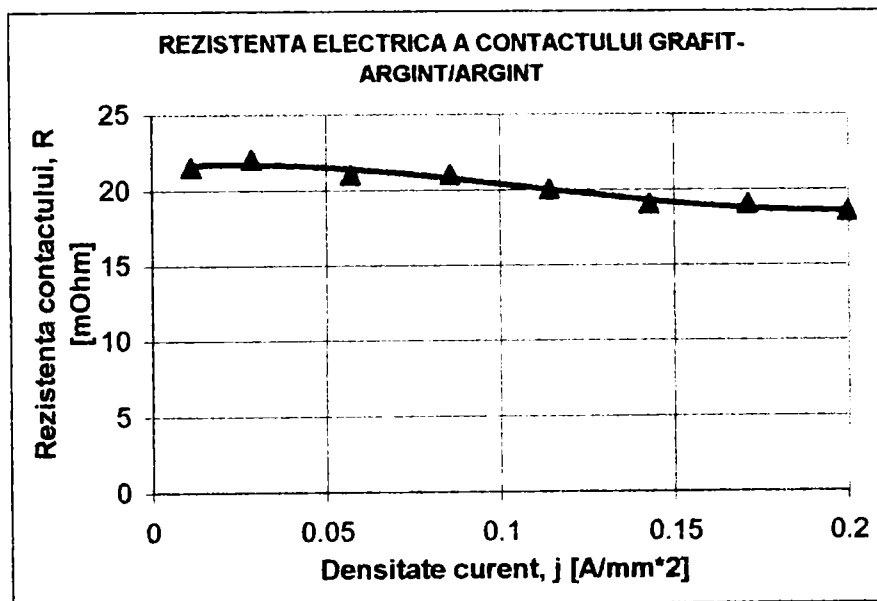


Fig.5.27 Caderea de tensiune si rezistenta electrica la contactul alunecator grafit-argint/argint utilizat la densitati medii si mari ale curentului electric

Considerații asupra comportamentului tribologic al contactelor electrice alunecătoare

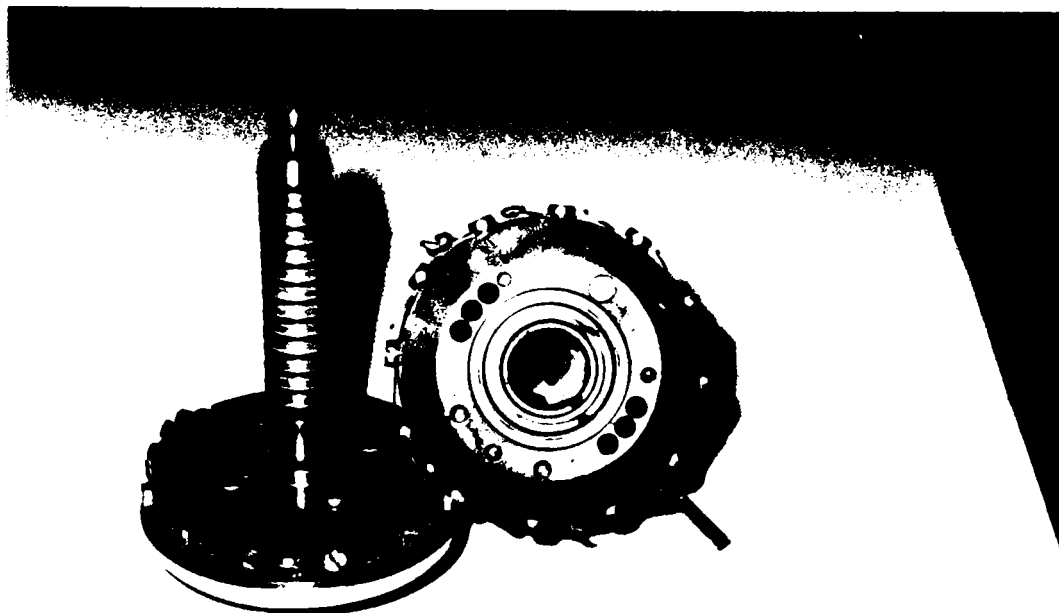


Fig.5.28 Detalii privind blocul contactelor alunecătoare SK 12 HBM

tehnică oferită de producători în prospecte pentru că funcție de particularitățile constructive ale contactelor, independent de condițiile de mișcare și de încărcarea electrică sunt făcute în toate cazurile recomandări pentru valori unice ale presiunii de contact.

Prin extinderea aplicațiilor cu pondere mărită a informaticii în structura de comandă, control și reglare a mașinilor și aparatelor, cercetările în domeniu vor cunoaște o dezvoltare în viitor pentru că sunt situații în care nu poate fi justificată renunțarea la contactele alunecătoare. Se constată în ultimul timp că din contră sfera de aplicații cunoaște în prezent o lărgire și o diversificare.

Capitolul 6. Concluzii și contribuții

Multitudinea aplicațiilor bazate pe transmiterea energiei sau transferul semnalului purtător de informație prin intermediul contactelor electrice alunecătoare justifică interesul manifestat pentru ridicarea continuă a performanțelor acestora din punct de vedere calitativ și al eficienței economice.

În ultimul timp s-au dezvoltat și soluții tehnice alternative. Noile variante au la bază transmiterea semnalului electric de comandă și control fără contact mecanic între elementele constructive sau organele de mașini aflate în mișcare relativă. Avantajele acestor soluții constau în faptul că nu pun probleme de limitare superioară a vitezei iar uzura componentelor este practic inexistentă. Aceste avantaje sunt în mare măsură compensate de creșterea complexității echipamentelor electronice și prin aceasta de scăderea fiabilității sistemului. Micșorarea preciziei de măsurare este cauzată de necesitatea de amplificare a semnalelor și de procesele de modulare – demodulare impuse de principiul funcțional. La cele menționate se adaugă și faptul că modulele echipamentului de emisie-recepție sunt mult mai expuse perturbațiilor de natură electromagnetică din mediul înconjurător. Nu trebuie omis nici faptul că prețul de cost în ansamblu al sistemelor de transmitere a informației fără contact mecanic este în mod firesc mult mai ridicat.

Pentru transferul energiei între părțile aflate în mișcare relativă mai ales în curent continuu, au apărut și soluții ce înlocuiesc contactele alunecătoare în cazul mașinilor electrice. Aceste soluții bazate pe comutația electronică comandată nu pot rezolva în prezent decât aplicațiile ce se încadrează în domeniul puterilor mici și mijlocii, evident la un preț de cost ridicat.

Avantajele simplității constructive, siguranța în funcționare, întreținerea ușoară și costul relativ redus al investiției și exploatării sunt argumente solide pentru acceptarea de către proiectanți în majoritatea aplicațiilor soluții de transmitere a curentului, independent de mărimea acestuia prin contacte electrice alunecătoare.

Comparativ cu contactele electrice fixe sau amovibile, literatura de specialitate nu oferă studii sistematice asupra contactelor alunecătoare. Explicația acestui fapt rezidă probabil în cerința de protecție a cercetărilor. Cele mai multe informații au caracter general și se găsesc în prospectele de produse ale firmelor de specialitate. În astfel de documentații sunt prezentate soluții constructive însoțite de sfaturi în legătură cu exploatarea corectă a contactelor. Ofertele au la bază date selectate din categoria proprietăților fizico-mecanice, tribologice și chimice ale materialelor, atât pentru perii cât și pentru inele. Aceste recomandări au un caracter general prin faptul că se referă la o valoare fixă a presiunii de contact, la o valoare maximă a densității curentului electric, la o limită pentru viteza relativă de funcționare, precum și la o valoare a

temperaturii ce nu trebuie depășită pentru elementele componente ale contactului. Toate aceste indicații nu țin seama de condițiile de viteză relativă efectivă, de densitatea curentului transmis, de particularitățile mediului de funcționare, de temperatură ambiantă, precum și de alți factori.

Studiul efectuat încearcă să aducă contribuții la sistematizarea informației și la elucidarea unor aspecte teoretice printr-un program amplu de verificări experimentale în scopul îmbunătățirii funcționării contactelor alunecătoare din punct de vedere electric și tribologic. Atingerea acestui obiectiv a necesitat proiectarea și realizarea unor standuri de încercări dotate cu echipamente moderne pentru măsurători și prelucrarea automată a informației pentru reglarea și controlul principalilor parametri ce intervin în astfel de investigații.

1. Pentru abordarea sistematică a problemelor s-a întocmit o clasificare unitară a contactelor electrice având drept criterii particularitățile constructiv-funcționale, mediul de funcționare, rolul funcțional îndeplinit, modul de asigurare a conductibilității electrice, forma zonei de contact și în consecință starea de tensiune locală.

2. Soluțiile constructive prezentate și analizate evidențiază multiplele posibilități de transfer a informației la măsurarea mărimilor fizico-mecanice și la controlul, respectiv automatizarea mașinilor și aparatelor, la limitarea automată a sarcinii transmise în sistemele mecatronice, în sfera telecomunicațiilor la emisia sau recepția semnalelor audio-video și mai ales în domeniul alimentărilor rotoarelor mașinilor electrice.

3. Sistematizarea informațiilor privitoare la materiale în stare pură sub formă de aliaje sau sinterizate oferă proiectanților date utile în vederea alegerii cuplului optim de materiale pentru perie-inel, funcție de cerințele concrete ale aplicației.

4. Bazele teoretice ale contactului electric au fost dezvoltate cu ajutorul modelelor geometrice spațiale cunoscute (sfera de conductivitate ∞ , elipsoidul turtit sau conul). În cazul contactelor, independent de finețea prelucrării suprafețelor active conducția electrică se realizează doar în zone (puncte). Deosebirea specifică contactelor alunecătoare rezidă în faptul că numărul punctelor de legătură suferă o permanentă modificare numerică. Aceasta este principala cauză care are drept consecință variația rezistenței de contact. Analiza principalilor factori ce influențează conducția electrică a permis orientarea cercetării spre optimizarea funcțională, având ca principal obiectiv diminuarea valorii rezistenței de contact și scăderea fluctuației acesteia.

5. Teoria sistematizată referitoare la procesele de frecare, la formele și cauzele ce provoacă uzarea, oferă posibilitatea alegerii unor regimuri funcționale și selectarea materialelor care conferă contactului alunecător optimul din punct de vedere tribologic.

Este evidențiată importanța deosebită a ungerii cu lubrifianți solizi care trebuie

să îndeplinească în acest caz calități bune de conducție electrică. Studiul elaborat permite cuantificarea procesului termic și disipativ însoțitor.

6. Considerațiile teoretice sistematizate în legătură cu starea de tensiune la contactul real fac posibilă înțelegerea unor aspecte tribologice influențate de distribuția presiunii, de aria reală de contact, de posibilitatea apariției microsudurilor etc.

Analogia făcută cu modelul frânelor cu sabotii în mișcare de translație sau mișcare oscilantă a permis deducerea relației ce exprimă momentul de frecare, stabilirea condiției de minimizare a acestuia și observația că după cum are loc uzarea, presiunea de contact dintre perie și inel este practic constantă atât pe lungimea arcului, cât și pe lățimea inelului.

7. Instalațiile experimentale au fost concepute pentru a putea acoperi întregul câmp de valori, conform programului pentru principalii parametri: forța de interacțiune la nivelul contactului, implicit presiunea medie, viteza relativă controlată într-un domeniu larg de valori, solicitarea electrică a contactului prin modificarea în limite largi a densității curentului electric.

Măsurătorile prezintă un grad înalt de precizie pentru că traductoarele utilizate sunt fie profesionale (măsurarea temperaturii cu termocupla sau turației cu tahogeneratorul), fie tensometrice (măsurarea forțelor de interacțiune), respectiv digitale la măsurarea vitezei în impulsuri, a curentului sau a căderii de tensiune pe contactele analizate. Gradul ridicat de precizie a fost asigurat și de echipamentul performant Virtual Bench bazat pe aplicația Soft Data Logger Multicanal produs de firma National Instruments.

9. Cercetarea experimentală a evidențiat faptul că funcționarea corectă a contactelor are loc numai dacă presiunea medie de contact se situează în limite precizate $p_{\text{optim}} \in [p_{\text{min}} \div p_{\text{max}}]$.

10. La presiuni inferioare valorii minime rezistența de contact, implicit căderea de tensiune crește. Contactul funcționează necorespunzător din punct de vedere electric pentru că fluctuația rezistenței de contact și eventualele desprinderi cauzate de bătaia radială a inelului provoacă o creștere a încălzirii periei și inelului prin efect termic al curentului. Concomitent se pot crea condiții de amorsare cu intermitență a arcului electric. Zgomotul în semnalul de informație depășește în acest caz pragul admisibil, motiv pentru care o astfel de situație trebuie evitată.

11. În cazul depășirii presiunii maxime încercările au evidențiat comportarea favorabilă din punct de vedere electric dar periculoasă din punct de vedere tribo – mecanic. Se constată o creștere inadmisibilă a uzării suprafețelor active iar temperatura ridicată poate periclita prin supraîncălzire izolația conductoarelor electrice.

12. Cu toate că în literatura de specialitate nu există referiri concrete s-a constatat cu ocazia încercărilor că între contactele alunecătoare și lagărele de alunecare cilindrice ce funcționează în mediu uscat cu lubrifianți solizi există

similitudini în multe privințe.

Cu toate că există diferențe în privința razelor de curbură și mărimea relativă a zonelor de contact între componentele elementelor perie – inel respectiv fus – cuzinet, procesul disipativ respectă în ambele cazuri criteriile:

$$(fpv)_{ef} \leq (fpv)_{adm} \text{ sau } (pv)_{ef} \leq (pv)_{adm}.$$

La contactele alunecătoare pe lângă criteriul amintit trebuie să se asocieze și condiția prevăzută la punctul 9 privind alegerea presiunii optime de contact.

În consecință în corelație cu mărimea densității curentului electric, pentru a limita procesul disipativ la funcționarea în domeniul vitezelor foarte mari, optimul rezultă pentru presiunea fixată spre limita minimă admisibilă. La viteze mici presiunea poate fi menținută în apropierea limitei superioare admisibile. Cercetările efectuate au arătat că în cazul periei din metal – grafit / bronz raportul între presiunile admisibile limită este de aproximativ patru, adică există o plajă suficient de largă de reglaj astfel ca siguranța în funcționare și durabilitatea contactului alunecător să crească substanțial prin stabilirea corectă a regimului de tensionare.

13. Funcționarea contactelor alunecătoare în domeniul vitezelor reduse și la valori critice ale presiunii de contact poate amorsa oscilații în sistem, ce pot avea ca efect apariția fenomenului de stick – slip, însoțit de zgomotul caracteristic.

Încercările efectuate în acest regim au fost caracterizate de variații ciclice cu amplitudinea de peste 25% ale valorii rezistenței electrice de contact. Prin aceasta se perturbă fie transmiterea informației, fie transmiterea energiei prin contacte. Apariția stick – slipului trebuie evitată. Pentru aceasta se poate recurge la modificarea orientării relative a axei periei, la schimbarea caracteristicii elementului elastic (arc lamelar, arc spiral sau arc elicoidal) sau la modificarea presiunii de contact.

14. După cum rezultă din măsurătorile efectuate asupra periilor din metal – grafit sinterizate produse de SC “ROFEP” SA Urziceni cu multiple aplicații la echipamentele auto, s-au prezentat performanțe comparabile ale acestora cu produse similare ale firmelor de prestigiu cunoscute pe plan internațional.

Contactul realizat cu inele din bronz a evidențiat faptul că în toate cazurile în care s-a menținut densitatea curentului electric și presiunea de contact, rezistența electrică înregistrează o scădere pe măsură ce scade viteza relativă. S-a constatat că prin creșterea densității curentului rezistența de contact înregistrează o ușoară scădere.

Deși uzarea volumică a periei s-a încadrat în limite normale prin menținerea vitezei de încercare dar prin dublarea presiunii de contact, intensificarea procesului disipativ a condus la dublarea stratului îndepărtat prin procesul de uzare.

15. Calitățile verificate în cazul periilor din grafit cu argint, inele din argint făcând parte din blocul de 12 contacte alunecătoare SK12 produs al firmei Hottinger, au scos în evidență faptul că rezistența de contact este foarte redusă cu o fluctuație foarte mică sub 1%, greu de măsurat.

La aceste contacte nu se pun probleme de durabilitate, deoarece contactele

alunecătoare sunt amovibile, activate pe o durată de timp scurtă, doar în perioada efectuării măsurărilor.

Se poate aprecia că programul experimental propus și-a atins obiectivele inițiale.

În urma cercetărilor proprii și din analiza informațiilor publicate se poate aprecia că principalele teme ce stau în atenția cercetătorilor sunt:

- studiul, elaborarea și utilizarea unor materiale noi (aliaje sinterizate sau compozite) caracterizate prin performanțe tribologice superioare celor cunoscute în prezent;
- perfecționarea și diversificarea soluțiilor constructive în scopul creșterii fiabilității și garantării unui număr sporit de comutări;
- miniaturizarea componentelor și produselor; prin aceasta devine posibilă creșterea vitezelor unghiulare limită de funcționare a contactelor;
- studierea influenței mediilor poluate asupra rezistenței electrice a joncțiunii contactului și asupra intensității uzării periilor și inelelor;
- cercetarea comportamentului contactelor alunecătoare în medii lubrificate cu lichide dielectrice la viteze mari la care sustentanța hidrodinamică trebuie luată în considerare;
- efectuarea unor programe de cercetare experimentală pentru evidențierea influenței mijloacelor de protecție la supratensiuni asupra durabilității contactelor alunecătoare.

*

*

*

Extinderea aplicațiilor bazate pe contacte alunecătoare este asigurată de implementarea pe scară largă a inteligenței artificiale în structura mașinilor și aparatelor mecatronice. În cele mai multe cazuri puntea de legătură pentru transferul informației sau energiei electrice între părțile sistemelor mecanice mobile este asigurată de către contactele electrice alunecătoare.

BIBLIOGRAFIE

- [A1]. Adam, M. - *Contribuții la supravegherea, controlul, încercarea și diagnosticarea echipamentelor electrice*. Teză de doctorat. Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" . Iași. 1996.
- [A2]. Archard, J.F. - *The Temperature Of Rubbing Surfaces*. Wear. 2. 1959.
- [A3]. Adam, M.,
Baraboi, A. - *Echipamente electrice*. Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" Facultatea de Electrotehnică. Iași. 1997
- [B1]. Balekics, M. - *Tribologie*. IPTVT. Timișoara. 1991.
- [B2]. Bayer, R. G.
Ku, T. C. - *Handbook Of Analytical Design Of Wear*. Plenum Press. New York. 1964.
- [B3]. Bulîcev, S. I.,
Alexih, V. P. - *Ispîtanie Materialov Neprerîvnîm Vdavlivanîem, Indentorova*. Mașinostroenie. Moskva. 1990.
- [B4]. Bowden, F. P.
Tabor, D. - *The Friction And Lubrication Of Solid*. P. I-II. At The Clarendon Press. Oxford. 1964.
- [B5]. Braithwaithe, E.R. - *Solid Lubricants And Surfaces*. Pergamon Press. Oxford. 1964.
- [B6]. Brendel, H. - *Wissensspeicher Tribotechnik. Schmierstoffe, Schmiereinrichtungen*. 2., neubearbeitete Auflage. VEB Fachbuchverlag Leipzig. 1988.
- [B7]. Baraboi, A.,
Adam, M. - *Le spectre thermique d'un contact électrique glissant*. Buletinul Institutului Politehnic Iași. XXXVIII, 1-4, s.III. 57.1992.

- [C1]. Cașin, C. M. - *Cuplaje electromagnetice în CM. Alegerea tipului, dimensionare, sistem de comandă și alimentare, montaj, exploatare, întreținere.* Cugir. IPS Sibiu. 1990.
- [C2]. Czichos, H.
Habig, K. H. - *Tribologie Handbuch. Reibung und Verschleiß.* Vieweg Verlag. Braunschweig/ Wiesbaden. 1992.
- [C3]. Cividjian, G. A. - *Aparate electrice. Izolație și arc.* Editura Avrămeanca. Craiova. 1996.
- [C4]. Constantinescu,
V. N. ș.a. - *Lagăre cu alunecare.* Editura Tehnică. București. 1980.
- [C5]. Constantinescu
V. N. - *Teoria lubrificației în regim turbulent.* Editura Academiei R.P.R. București. 1965.
- [C6]. Cinar, A.
Sinclair, G. B. - *Quasi-Static Normal Indentation Of An Elastoplastic Half-Space By A Rigid Circular Cylinder Of Infinite Length.* Int. J. Solid Structures. Vol. 22. No. 8. 1990.
- [D1]. Deacon, R.F. ș. a. - *Lubrication By Lamellar Solids.* Proc. Roy. Soc. Ser. A, 243.1958.
- [D2]. Dowson, D.
Higginson, G.R. - *Elasto-Hydrodynamic Lubrication. The Fundamentals Of Roller And Gear Lubrication.* Pergamon Press Ltd. Oxford. 1966.
- [D3]. Diaconescu, E.,
Potorac, A. - *Considerații teoretice privind distribuția presiunii în regim parțial elastohidrodinamic.* A 7-tea Conferință de Lubrificație și Tracțiune Elastohidrodinamică. Universitatea "Ștefan Cel Mare" Suceava. 1994.
- [D4]. Diaconescu, E. N.,

- Cameron, A. - *Presiunea dintre asperități în lubrificația parțial elastohidrodinamică*. Tribotehnica. Ploiești. 1982.
- [F1]. Fleischer, G. - *Energetische Methode der Bestimmung des Verschleißes*. Schmierungstechnik. (4). 1973.
- [F2]. Fisher, J.,
Campbell, K.,
Quinn, F. J. - *The Effect Of Current On The Lubrication Of Sliding Electrical Contacts*. ASLE. Proc. Conf. Solid Lubricat. 1971.
- [F3]. Fleischer, G. ș.a. - *Verschleiß und Zuverlässigkeit*. VEB Verlag Technik. Berlin. 1980.
- [F4]. Fleischer, G. ,
Kragelski, I.V. - *Vereinigung der Ermüdungstheorien und des energetischen Ansatzes zur Berechnung des Verschleißes*. Schmierungstechnik (10). 1979.
- [G1]. **Gligor (Popa), Anca** - *Unele aspecte ale contactelor electrice alunecătoare ca mijloace de transmitere a informației*. Al VI-lea Simpozion MTM. Timișoara.1992.
- [G2]. **Gligor (Popa), Anca** - *Considerații asupra interacțiunii mecanice la contactele electrice plane și de tip hertzian*. Al VI-lea Simpozion MTM. Timișoara.1992.
- [G3]. **Gligor (Popa), Anca** - *Contactele alunecătoare, mijloace de sesizare a suprasarcinii pentru protecția cuplajelor elastice și de siguranță*. Al VI-lea Simpozion MTM Timișoara.1992.
- [G4]. **Gligor (Popa), Anca ș.a.** - *Sisteme de prelevare a informației de la organele de mașini aflate în mișcare de rotație*. Al XII-lea Simpozion Național de Roboți Industriali. Timișoara. 1994.

- [G5]. **Gligor (Popa), Anca** ș.a. - *Controlul mișcării de rotație prin intermediul senzorilor magnetici comutatori*. Al XII-lea Simpozion Național de Roboți Industriali. Timișoara. 1994.
- [G6]. **Gligor (Popa), Anca** - *Considerații teoretice asupra rezistenței electrice a contactelor de suprafață de tipul perie-inel colector*. A VII-tea Conferință Internațională de Inginerie Managerială și Tehnologică, Tehno`95. Timișoara. 1995.
- [G7]. **Gligor (Popa), Anca** - *Rezistența electrică și uzarea contactelor electrice alunecătoare*. Revista Română de Mecanică Fină și Optică. Supliment Nr. 2. 1998.
- [G8]. **Gligor (Popa), Anca** ș.a. - *Senzori și traductoare*. Indrumător de lucrări. Centrul de multiplicare al UPT. Timișoara. 1996.
- [G9]. **Gligor (Popa), Anca,**
Dolga, Valer - *Die Konstruktion der Sensoren und Geber*. Laborarbeiten. Centrul de multiplicare al UPT. Timișoara. 1996.
- [G10]. Grave, H.F. - *Elektrische Messung nichtelektrischer Größen*. Akademische Verlagsgesellschaft. Frankfurt Am Main. 1965.
- [H1]. Halling, J. - *A Contribution To The Theory Of Mechanical Wear*. Wear. 34. 1975.
- [H2]. Heinrich, W. - *Erfahrungen mit Schleifringübertragern in der Maschinenmeßtechnik*. Maschinenbautechnik. Heft 4. 1965.
- [H3]. Holm, R. - *Electric Contacts, Theory And Application*. Springer Verlag Berlin. 1967.
- [H4]. Hortopan, G. - *Relații noi privind încălzirea contactelor electrice*. Electrotehnica 18, nr. 11. noiembrie 1970.

- [H5]. Hortopan, G. - *Aparate electrice*. EDP. București. 1984.
- [H6]. Höft, H. - *Elektrische Kontakte. Ausgewählte Beiträge*. Akademie Verlag Berlin. 1980.
- [H7]. Hortopan, G. - *Aparate electrice de comutație*. Editura Tehnică. București. 1993.
- [H8]. Hills, D. A. ș. a. - *Mechanics Of Elastic Contacts*. Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford. 1993.
- [I1]. Ignat, M. - *Asupra microcontactelor alunecătoare de tip inel - perie*. Comefin 1. Litografia IPB. București. 1982.
- [I2]. Iliuc, Ivan - *Tribologia straturilor subțiri*. Editura Academiei RSR. București. 1974.
- [J1]. Jahnke-Emde-Lösch - *Tafeln höherer Funktionen*. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft. Stuttgart. 1960.
- [J2]. Johannet, P. - *Le probleme des contacts electriques a courant fort: caracterisation, implementation, echauffement et vieillissement*. EDF. Bulletin de la direction des etudes et recherches. 1995.
- [J3]. Johnston, G. J.,
Wayte, R.,
Spikes, H. A. - *The Measurement And Study Of Very Thin Lubricant Film In Concentrated Contacts*. STLE Trans. 34. 1991.
- [K1]. Kraghelski, I.W. - *Friction Wear Lubrification (Tribology Handbook)*. Moskow. 1982.
- [K2]. Kubaschewski, O.
ș.a. - *Oxidation Of Metals And Alloys*. Butterworths. London. 1962.
- [K3]. Kuhn, E. - *Description Of The Energy Level Of Tribologically Stressed Greases*. Wear. 188. 1995.

- [K4]. Koronka, F. - *Tribologie (frecare, uzare, ungere)*. Universitatea Tehnică Petroșani. Petroșani. 1993.
- [K5]. Kajdas, C. ș.a. - *Enciclopedia Of Tribology*. Elsevier. Amsterdam. 1990.
- [K6]. Karas, F. - *Werkstoffanstrengung beim Druck achsenparalleler Walzen nach den gebräuchlichen Festigkeitshypothesen*. Forschung Ing. Wes. Bd. 11. Heft 6. 1950.
- [M1]. Maugis, D.,
Barquins, M.,
Courtel, R. - *Frottement des couples molybdene/cuivre et nickel/cuivre dans l`ultra vide et à haute temperature*. C.R.. Acad. Sc. Paris. t. 280. 1975.
- [M2]. Moldovan, L. - *Echipamente electrice. Curs*. Universitatea Tehnică Timișoara. 1995.
- [M3]. Montmitonnet, P.
ș. a. - *Finite Element Analysis Of Elastoplastic Indentation. Part I. Homogenous Media* Transactions Of ASME. Vol. 115. Jan. 1993.
- [M4]. Mironovici, E. M.,
Petrovici, M. I.,
Savkin, V. G. - *K rascetu velicini facticeskoi plosciadi cassania dlia tonkosloinih pocritii s ucetom ih šteplenia s podlojnoi*. Metrologhiceskie i tehnologhiceskie issledovania kacestva poverhnosti. Riga. "Zinat. 1976.
- [P1]. Pavelescu, D. - *Concepții noi, calcul și aplicații în frecarea și uzarea solidelor deformabile*. Editura Academiei. București. 1971.
- [P2]. Pavelescu, D. ș.a. - *Tribologie*. EDP. București. 1977.
- [P3]. Ponomariov, S.D. - *Calculul de rezistență în construcția de mașini. II*. Editura Tehnică. București. 1963.
- [P4]. Popinceanu, N. ș.a. - *Probleme fundamentale ale contactului cu rostogolire*.

- Editura Tehnică. București. 1985.
- [R1]. Rowe, G.W. - *Frictional Behavior Of Boron Nitride And Graphite*. Wear.3. 1960.
- [R2]. Rüggen, W. - *Sicherheit im Maschinenbau durch Präzisionskupplungen und Überlastsicherungen*. Zeitschrift für Maschinenbau und Fertigung. Heft 6. Hauser Zeitschriftenverlag GmbH. München.
- [S1]. Savage, R.H. - *Graphit Lubrication*. J. Appl. Phys. 19. 1948.
- [S2]. Seracin E. - *Utilajul electromecanic al întreprinderilor industriale*. Editura Didactică și Pedagogică. București. 1973.
- [S3]. Sikorski, M. - *Correlation Of The Coefficient Of Adhesion With Variouss Physical And Mechanical Properties Of Methals*. Trans ASME. D. 86. 1963.
- [S4]. Stănescu, C.,
Șerban, G.,
Dimitrov, B. - *Unele aspecte ale frecării și uzării cuplelor fir-captator în tracțiunea electrică. II*. SCMA. Academia RSR. 34. 3. 1975.
- [S5]. Suciu, I. - *Bazele echipamentelor electrice*. Editura Facla. Timișoara. 1980.
- [Ș1]. Șerban, R. - *Tribologie. Privire de ansamblu. Frecarea*. Editura "Gh. Asachi". Iași. 1997.
- [T1]. Tudor, A. - *Contactul real al suprafețelor de frecare*. Editura Academiei Române. București. 1990.
- [T2]. Tross, A. - *Über das Wesen und den Mechanismus der Festigkeit*. Zell am See. Eigenverlag. München. 1966.
- [Q1]. Quinn, T. F.J. - *Oxidational Wear*. Wear.18. 1971.
- [V1]. Vasiu, T., Vasiu, G.

- Popoiu, G. - *Tribologie. Curs.* UPT. Facultatea de Inginerie Hunedoara. 1997.
- [V2]. Vasilievici, A. - *Aparate și echipamente electrice. Vol. I, II.* Editura MS. Sibiu. 1996.
- [V3]. Vichard, J. P.
Godet, M. - *Les aspects modernes de l'hydrodynamique des contacts lubrifiés.* Revue de L'Institut Francais du Petrole. XXI. Nr. 7-8. Juillet-aout. 1966.
- [V4]. Vasilca, G.,
Biță, O. - *Procese de lubrificație, frecare și uzură la suprafețele metalice.* Editura Academiei RSR. București. 1967.
- [W1]. Winkler, J. - *Festkörperbeanspruchung.* Fachbuchverlag. Leipzig. 1991.
- [1]. * * * - *Schleifringkörper.* Behne - Wampfler GmbH. Weil am Rhein. 1994.
- [2]. * * * - *Drehstrommotoren mit Schleifringläufer für Niederspannung.* Flender ATB - Loher. 1996.
- [3]. * * * - *Technischer Leitfaden für Kohlebürsten elektrischer Maschinen.* Le Carbone-Lorraine. Paris. 1996.
- [4]. * * * - *Industrie - und Bahnkohlebürsten.* Schunk Kohlenstofftechnik GmbH. Heuchelheim. 1995.
- [5]. * * * - *Mikrokontaktprofile für elektrische Schaltkontakte.* Heraeus. Hanau. 1992.
- [6]. * * * - *Verbundwerkstoffe für elektrische Kontakte.* G. Rau GmbH & Co. Pforzheim. 1996.
- [7]. * * * - *Elektrokohle.* Schmidhammer Elektrokohle GmbH. Nürnberg. 1996.
- [8]. * * * - *Drehmoment Messung. Katalog.* Staiger Mohilo. 1996.

- [9]. * * * - *Systeme für sicheren elektrischen Kontakt. Schleifringübertrager. Steckkontakte. Schalter.* Rie-Tech. Orsingen-Neuzingen. 1996.
- [10]. * * * - *Schleifringkörper zur Übertragung von kleinsten und mittleren Strömen sowie Signalen.* Columbus Contact GmbH. Konstanz. 1996.
- [11]. * * * - *Technische Information. Schleifring und Apparatebau GmbH.* Fürstfeldbruch. 1996.
- [12]. * * * - *Schleifringe und Drehübertrager.* Litton Precision Products International. Servotechnik. Unterföhring. 1993.
- [13]. * * * - *Spezialgraphite Kohlebürsten.* SGL Carbon Group. Werk Ringsdorff. Business Unit. Bonn. 1995.
- [14]. * * * - *Kohlebürsten.* ElektroKohle Köln. Friedberg. 1996.
- [15]. * * * - *Kohlebürsten.* ElektroKohle Lichtenberg AG. Berlin. 1996.
- [16]. * * * - *Bürstenhalter.* Rekofa Wenzel. GmbH & Co KG. Bad Neuenahr-Ahrweiler. 1996.
- [17]. * * * - *Kontaktwerkstoffe auf Silber Basis.* DODUCO GmbH. Lieferprogramme. Pforzheim. 1996.
- [18]. * * * - *Zeitschrift für das elektrische Messen mechanischer Größen.* Meßtechnische Briefe. Hottinger Baldwin Meßtechnik. MTB 26. Heft 2. Torque Transducers Survey. Darmstadt. 1994.
- [19]. * * * - *Technisches Taschenbuch.* INA Wälzlager Schaeffler KG. Herzogenaurach. Frankendruck GmbH. 1994.
- [20]. * * * - *Stratul superficial al organelor de maşini în procese tribologice şi de oboseală.* Contract nr. 4007/1995. Poz. B 13. Universitatea "Dunărea de Jos" Galaţi. 1995.