

OPTIMIZAREA TRIBOLOGICĂ A CUPLAJELOR HOMOCINETICE SPECIFICE REDUCTOARELOR CICLOIDALE CU BOLȚURI

SOME ASPECTS REGARDING TRIBOLOGY OF HOMOKINETIC COUPLING CHARACTERISTIC OF CYCLOIDAL GEARS WITH BOLTS

Aristia-Ioana POPOVICI¹, Florin PETRESCU²

¹S.I. univ. dr. ing., U.T.C.B., Romania - Facultatea de Utilaj Tehnologic

e-mail autor: arys_jo@yahoo.com

²Prof. univ. dr. ing., U.T.C.B., Romania - Facultatea de Utilaj Tehnologic

e-mail autor: petrescu_florin21@yahoo.com

Rezumat: Reductoarele cicloidale cu bolțuri sunt transmisii mecanice cu rapoarte mari de transmitere și momente la ieșire înscrise într-o gamă largă de valori (până la 55.000 [Nm]). În afară de angrenajul cicloidal caracteristic, componenta importantă din punct de vedere tribologic o reprezintă cuplajul homocinetic implicat direct în transmiterea mișcării și a momentului. În lucrarea de față sunt tratate procesele tribologice (frecare, ungere și uzare) specifice cuplajelor homocinetice respectiv aspectele lor particulare asociate cu cinematica și dinamica acestora (forțe, viteze, presiuni de contact, deformații locale, etc.). În acest context au fost determinate experimental, pe cuple modelate, coeficientul de frecare și intensitatea uzării în funcție de materiale și medii de ungere uzual utilizate la aceste transmisii. Rezultatele obținute constituie suportul unor recomandări privind alegerea cuplului optim material-lubrifiant pentru elementele cuplajului homocinetic (bolț, bucușă, alezaj al discului cicloidal) care asigură creșterea durabilității acestor elemente și diminuarea pierderilor prin frecare.

Cuvinte cheie: angrenaj cicloidal, coeficient de frecare, cuplaj homocinetic

Abstract: Cycloidal gears with bolts are mechanical transmission with high transmission ratios and transmitted moments of rotation in a wide range of values (up to 55.000 [Nm]). Besides the characteristic couple (cycloidal gear), the most important component in terms of tribology is homokinetic coupling which is directly involved in the transfer of movement and momentum. In this paper there are studied tribological processes (friction, lubrication and wear) specific to homokinetic couplings like their particular issues related with their kinematics and dynamics (forces, speeds, contact pressure, local deformations, etc.). Thus there were experimentally determined, on modeled couplings, the friction coefficient and intensity of wear depending on material and lubricants usual used in these gears. The experimental results allow some recommendations on choosing the optimum material-lubricant couple for homokinetic coupling elements (bolts, roller, bore of the cycloidal disc) to ensure increased durability of these elements and to reduce frictional losses.

Keywords: cycloidal gear, friction coefficient, homokinetic coupling

1. INTRODUCERE

Reductoarele cicloidale cu bolțuri s-au impus prin performanțe deosebite [1]:

- rapoarte de transmitere mari ($i=9\dots 428.485$);
- momente transmise de la 40 [Nm] până la 55.000 [Nm];
- randament ridicat ($\eta=0.95\dots 0.98$ la reductoarele într-o treaptă, $\eta=0.85\dots 0.92$ la reductoarele în două trepte, $\eta\approx 0.75$ la reductoarele în trei trepte).

Randamentele realizate cuantifică excelenta comportare tribologică a cuplelor componente (nivel redus al frecării, uzare moderată).

2. PROBLEME GENERALE PRIVIND TRIBOLOGIA TRANSMISIILOR CICLOIDALE

Cuplele tribologice caracteristice reductoarelor cicloidale cu bolțuri sunt:

- bolț-rolă-dinte cu profil cicloidal (angrenaj cicloidal);
- bolț-rolă-alezaj practicat în discul satelit (cuplaj transversal homocinetic);
- rulment central al satelitului.

Acestea sunt cuple tribologice superioare, clasa a II-a, cu contacte liniare exterioare sau interioare.

De regulă se acordă prioritate proiectării cuplajului transversal homocinetic și respectiv rulmentului central al satelitului, considerând ca decisive solicitările de încovoiere și de contact, fără a se asocia și problemele tribologice specifice.

Se demonstrează că bolțurile coroanei fixe, rolele montate pe acestea și suprafețele dinților cicloidali având duriți mari (≥ 58 HRC) uzarea acestora este redusă și ca urmare distrugerea lor nu se produce decât accidental [1].

Durabilitatea reductoarelor cicloidale cu bolțuri este legată de scoaterea din funcționare a cuplelor caracteristice în ordine: rulment central, cuplaj transversal și angrenaj cicloidal.

3. ROLUL ȘI CONSTRUCȚIA CUPLAJULUI HOMOCINETIC

Cuplajul transversal homocinetic preia mișcarea de rotație a celor doi sateliți montați diametral opus și o transmite arborelui de ieșire.

Principiul funcțional-constructiv și cinematica cuplajului homocinetic au la bază mecanismul paralelogram H2H'3 (figura 1) (manivela **H**, satelitul cu dantură cicloidală **2** și celelalte laturi ale paralelogramului **H'** și **3**).

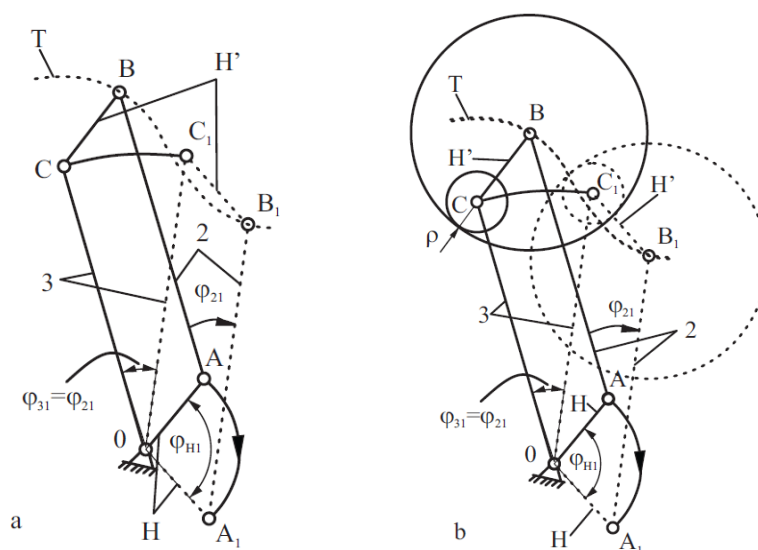


Figura 1. Principiul funcțional-constructiv al cuplajului homocinetic [1]

Mișcarea de rotație a arborelui de intrare al reductorului este preluată de elementul **H** (un excentric montat pe arbore) și transmisă satelitului **2** care antrenează arborele de ieșire (mișcarea se transmite de la elementul **2** la elementul **3** prin contactul direct al bolțului **C** al cuplajului cu alezajul practicat în roata satelit).

Performanțele reductoarelor cicloidale cu bolțuri sunt realizate prin asigurarea condițiilor de optim tribologic ale angrenajului cicloidal și cuplajului transversal homocinetic. O soluție pentru rezolvarea problemei o constituie asigurarea unui nivel minim al durității și frecării suprafețelor în contact, respectiv utilizarea cuplurilor optime material-lubrifiant.

Randamentul transmisiei cicloidale cu bolțuri [2] este cuantificat prin pierderea de putere instantanee (ψ) specifică angrenajului cicloidal, cuplajului transversal homocinetic și rulmentului central al satelitului.

Pierdere specifică în cupla principală a cuplajului homocinetic definită ca raport între puterea consumată prin frecare și puterea activă corespunzătoare satelitului, se calculează cu relația:

$$\psi_c = \frac{4 \cdot A \cdot \mu_c}{\pi \cdot R_c} \quad (1)$$

unde: μ_c – coeficientul de frecare global al cuplajului;

A – distanța între axe sau excentricitatea (manivela **H**);

R_c – raza de dispunere echidistantă a bolțurilor cuplajului.

Coeficientul de frecare global cuantifică frecarea între bolț și rolă și între rolă și alezajul satelitului (figura 2).

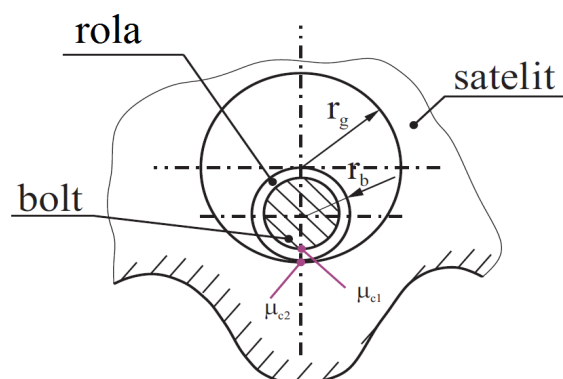


Figura 2. Cupla bolț-rolă și rolă-alezaj [3]

În lucrarea [3] se prezintă rezultatele determinărilor experimentale privind variația coeficientului de frecare caracteristic cuplajelor cicloidală cu bolțuri în funcție de: sarcină, duritate, vîscozitate, rugozitate, viteză și raza de curbură a profilului cicloidal al satelitului.

Cu datele experimentale obținute, prelucrate statistic, s-a stabilit ecuația de regresie a coeficientului de frecare, care evidențiază și ponderea influenței parametrilor considerați.

S-a demonstrat importanța care trebuie acordată analizei influenței încărcării (presiunii de contact) asupra proceselor de frecare și uzare specifice cuplelor principale ale reductoarelor cicloidală cu bolțuri [4][5][6].

4. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

Obiectivul principal al lucrării de față a fost determinarea experimentală a intensității de uzare și a coeficientului de frecare în funcție de materialele și lubrifianții uzual utilizați, specifice cuplajului transversal homocinetic.

Rezultatele obținute constituie suportul unor recomandări privind alegerea cuplului optim material-lubrifiant pentru elementele cuplajului homocinetic (bolț, rolă, disc cicloidal) care asigură diminuarea pierderilor prin frecare și creșterea durabilității acestora.

Determinările experimentale au vizat cupla bolț-rolă aceasta fiind restrictivă din punct de vedere tribologic (contact liniar cu tangență interioară, mișcare relativă de alunecare, condiții de ungere dificile etc.) față de cupla angrenajului cicloidal.

Tabel 1. Caracteristicile constructive ale cuplajului homocinetic [1]

Mărime reductor	Moment transmis [Nm]	CUPLAJ HOMOCINETIC							
		Nr. Bolțuri	Excentricitate A_c (distanța între axe) [mm]	Lățime satelit [mm]	Diametru alezaj disc cicloidal [mm]	Diametru bolț [mm]	Sarcină maximă pe bolț [N]	σ_k [MPa]	
								EXT	INT
6	900	10	10	10	41	15	3030	1290	760
8	2700	10	13	10	57	25	6970	1670	1000
9	4300	10	15	10	61	25	9600	1860	1070

Elementele cuplei modelate au fost proiectate și realizate astfel încât să satisfacă condițiile geometriei contactelor reale caracteristice cuplajelor homocinetice (reductor cicloidal mărimea 8 din tabelul 1).

Cupla modelată, montată în structura unei instalații de testare tribologică *Timken* – modificată, este prezentată în figura 3.

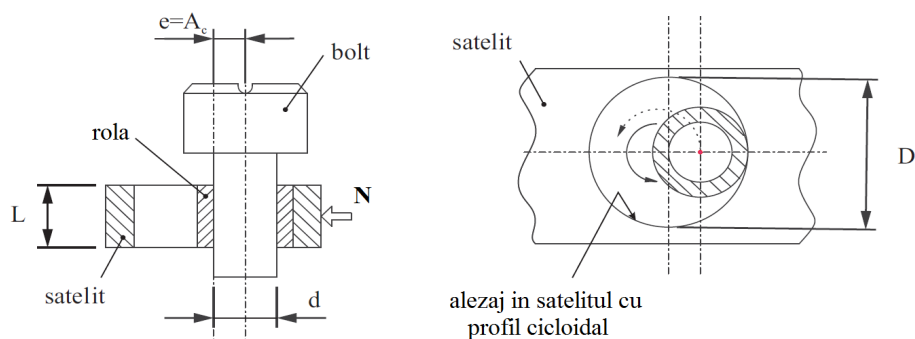


Figura 3. Cupla de frecare experimentală (bolț-rolă și rolă-alezaj).

Bolțul și rola execută o mișcare planetară în interiorul alezajului rolei căreia i se aplică sarcina N .

Încercările pentru determinarea coeficienților de uzură caracteristici cuplurilor de materiale au fost realizate în următoarele condiții:

- încărcarea la nivelul contactului: $\sigma_k = 1000$ [MPa];
- turația bolțului: $n = 1450 \pm 50$ [rot/min];
- timpul: $t = 60 \pm 5$ [min];
- lubrifianț: TIN 125 EP2;
- material bolț: 100Cr6 (SR EN ISO 683-17);
- materiale rolă: 21 MoMnCr 12, 28 TiMnCr 12, 38 MoCrAl 09 (STAS 791-80);
- duritatea epruvetelor: 58÷63 HRC;
- rugozitatea suprafețelor epruvetelor în contact: $R_a = 1.6$ [μm].

Pe fiecare epruvetă (bolț și rolă) s-a măsurat grosimea stratului de material îndepărtat (h_m) prin uzură de pe suprafețele în contact și s-a calculat coeficientul de uzură cu relația:

$$K_u = \frac{h_m}{\sigma_k \cdot L_f} \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right] \quad (2)$$

unde: L_f este lungimea spațiului (drumului) de frecare.

Respectând condițiile locale de contact ale elementelor cuplajului homocinetic s-a stabilit performanța cuplului material–lubrifianț pe baza evoluției coeficientului de frecare și intensității de uzare în funcție de sarcina normală aplicată contactului.

Rezultatele determinărilor experimentale privind stabilirea cuplului optim material-lubrifiant sunt înscrise în tabelul 2 și tabelul 3.

Tabel 2. Coeficienții de uzură determinați experimental [$K_u \cdot 10^{-7}$] [mm^2/N]

MATERIAL ROLĂ	MATERIAL BOLȚ			
	100Cr6	21 MoMnCr 12	28 TiMnCr 12	38 MoCrAl 09
100Cr6	1.6	9.5 / 0.7	7.0 / 1.0	4.8 / 1.1
21 MoMnCr 12	0.9 / 9.1	6.3	3.0 / 6.7	2.6 / 7.7
28 TiMnCr 12	1.0 / 6.4	7.0 / 2.6	4.9	3.8 / 6.1
38 MoCrAl 09	1.1 / 4.5	8.6 / 1.8	4.2 / 3.0	2.9

Cuplurile de materiale identice sunt caracterizate printr-o singură valoare a coeficientului de uzură iar celelalte prin două valori: prima reprezentând coeficientul de uzură caracteristic materialului utilizat la confecționarea bolțului, iar cea de-a doua, coeficientul de uzură al materialului rolei (tabelul 2).

Fiecare material este astfel caracterizat din punct de vedere al intensității de uzare în combinație cu el însuși și cu celelalte materiale.

Pentru caracterizarea cuplului de material se consideră un coeficient de uzură global (K_{ue}), definit în acest sens ca sumă a coeficienților de uzură ai fiecărui material. Coeficientul de uzură global poate fi astfel utilizat pentru întocmirea clasamentului combinației optime de materiale, care corespunde uzării minime a cuplului, respectiv durabilității maxime a acestuia (tabelul 3).

Tabel 3. Coeficienții de uzură globali determinați experimental

Nr. crt	$K_{ue} \cdot 10^{-7}$ [mm^2/N]	material bolț / material rolă	Nr. crt	$K_{ue} \cdot 10^{-7}$ [mm^2/N]	material bolț / material rolă
1	3.2	100Cr6 / 100Cr6	9	9.8	28 TiMnCr 12 / 28 TiMnCr 12
2	5.6	100Cr6 / 38 MoCrAl 09	10	9.9	38 MoCrAl 09 / 28 TiMnCr 12
3	5.8	38 MoCrAl 09 / 38 MoCrAl 09	11	10.0	100Cr6 / 21 MoMnCr 12
4	5.9	38 MoCrAl 09 / 100Cr6	12	10.2	21 MoMnCr 12 / 100Cr6
5	7.2	28 TiMnCr 12 / 38 MoCrAl 09	13	10.3	38 MoCrAl 09 / 21 MoMnCr 12
6	7.4	100Cr6 / 28 TiMnCr 12	14	10.4	21 MoMnCr 12 / 38 MoCrAl 09
7	8.2	28 TiMnCr 12 / 100Cr6	15	10.5	28 TiMnCr 12 / 21 MoMnCr 12
8	9.6	21 MoMnCr 12 / 28 TiMnCr 12	16	12.6	21 MoMnCr 12 / 21 MoMnCr 12

Asociate determinării coeficientului de uzare sunt determinările experimentale privind variația coeficientului de frecare; rezultatele sunt prezentate în graficul din figura 4.

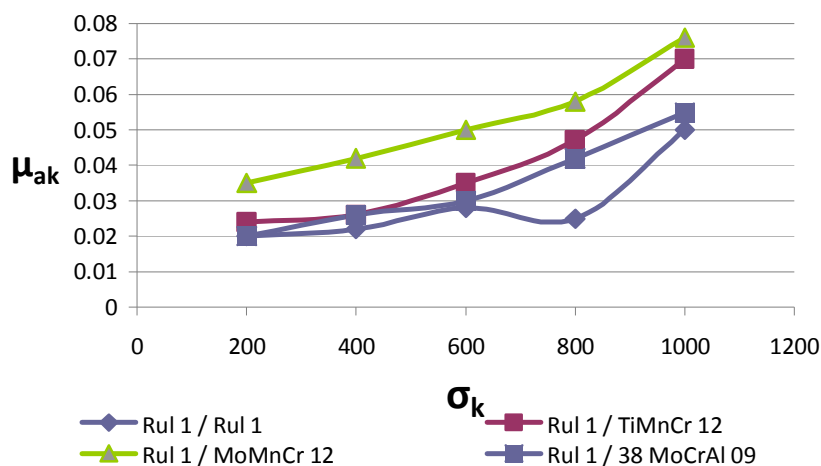


Figura 4. Variația coeficientului de frecare în cazul utilizării uleiului TIN 125 EP2, pentru materialele analizate

5. CONCLUZII

În urma analizei comparative și a interpretării datelor experimentale obținute se desprind o serie de aspecte utile în aprecierea comportării la uzare a cuplurilor de materiale testate:

- perechea de epruvete obținută din oțel pentru rulmenți prezintă o rezistență la uzare superioară celorlalte trei perechi de oțeluri analizate;
- cuplurile de materiale identice, caracterizate în general ca nefavorabile din punct de vedere al uzării de aderență, pentru că pot forma joncțiuni sudate cu ușurință, prezentând aceeași tendință de deformare, au rezistențe la uzură diferențiate în funcție de structura și proprietățile straturilor de suprafață;
- comportarea cea mai favorabilă au prezentat-o combinațiile materialelor 100Cr6 și 38 MoCrAl 09, cu ele însăși și între ele;
- oțelul pentru niturare 38 MoCrAl 09 (niturare în mediu gazos, două trepte de temperaturi, adâncimea stratului 0.7 mm și duritate superficială de 1100 HV) are o bună comportare la uzare, ceea ce arată că straturile de suprafață joacă un rol esențial în complexul fenomen de frecare-uzare;
- de asemenea, au rezistență sporită la uzare combinațiile 28TiMnCr12 cu 38MoCrAl 09 (primul utilizat la bolț, al doilea la bucșe) și 28 TiMnCr 12 cu 100Cr6 (indiferent dacă sunt utilizate la bolț sau bucșe).
- oțelul pentru rulmenți, folosit ca material pentru bolț, a condus la cel mai redus nivel al uzurii;
- materialul 21 MoMnCr 12 a prezentat o comportare favorabilă numai în cuplu cu materialul 28 TiMnCr 12 (utilizat la construcția bucșei);

- datele prezentate referitoare la variația coeficientului de frecare în funcție de presiunea de contact pentru cuplurile de material analizate sunt utile pentru cuantificarea coeficientului de frecare global al cuplajului homocinetic (relația 1) respectiv a pierderii specifice de putere caracteristică cuplajului homocinetic.

Datele obținute și prezentate permit alegerea rațională a cuplului de materiale pentru cuplele de frecare caracteristice transmisiilor cicloidală cu bolțuri, astfel încât să se asigure funcționarea acestora la parametrii optimi și durabilitate maximă.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **Miloiu, Ghe.**, – *Transmisii mecanice moderne*, Editura Tehnică, București, 1980
- [2] **Kudriavtev, V.N.**, – *Transmisii mecanice planetare*, Moscow-Leningrad, 1966
- [3] **Petrescu, F.**, – Contribuții la studiul frecării și uzării la angrenajele reductoarelor speciale folosite la mecanismele mașinilor de construcții, Teză de doctorat, I.C.B., București, 1987
- [4] **Popovici, A.I., Davidescu, A., Petrescu, F.** – Aspecte teoretice și practice privind rezistența la uzură a angrenajelor cicloidală cu bolțuri, SINUC 2013, București, 2013
- [5] **Popovici, A.I., Petrescu, F., Sebacher, B.** – Aspecte privind optimizarea profilului danturii angrenajelor cicloidală cu bolțuri / Some aspects regarding optimization of teeth profile of cycloid gears with bolts, Tehnologia Inovativa – Revista construcția de mașini, Seria nouă, anul 63, nr. 3 și 4 / 2011, pg. 45-48, ISSN 0573-7419, București, 2011
- [6] **Blagojevic, M.**, et al., – *Influence of the friction on the cycloidal speed reducer efficiency*, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 18, No 2, 217-227, 2012