

ANALIZA PROCESELOR DE UZARE EROZIVĂ SPECIFICE SERVOVALVELOR

S.I. univ. dr. ing. **Aristia-Ioana POPOVICI**, U.T.C.B. - Facultatea de Utilaj Tehnologic
Prof. univ. dr. ing. **Florin PETRESCU**, U.T.C.B. - Facultatea de Utilaj Tehnologic

ABSTRACT

Elementele servovalvelor (principala componentă a unui sistem hidraulic) sunt sensibile la contaminarea uleiurilor hidraulice și uzura elementelor componente. Contaminarea se referă la infestarea uleiului hidraulic cu particule solide, iar uzura la eroziunea abrazivă; aceste două procese se influențează reciproc. Efectele procesului de uzare erozivă, provocate de acțiunea particulelor contaminante, se manifestă pe suprafețele active ale elementelor servovalvelor. În această lucrare este prezentată analiza proceselor de uzare cu ajutorul modelelor clasice ale eroziunii Finnie, Bitter, Hutchings, Sundararajan și Modelul Complex. Rezultatele obținute sunt utile în vederea estimării uzării erozive specifice servovalvelor.

1. INTRODUCERE

Sistemele hidraulice de reglare automată (SHRA) reprezintă un ansamblu de elemente interconectate care prin intermediul unui lichid hidraulic, asigură reglarea și controlul unor mărimi de ieșire în funcție de legea de variație a mărimii de intrare. Principala componentă a unui sistem hidraulic este servovalva.

Uzarea erozivă la servovalvă este localizată la nivelul cuplei sertar-bucșă (figura 1). Particulele purtate de lichid au efect eroziv asupra muchiilor și suprafețelor active ale sertarului.

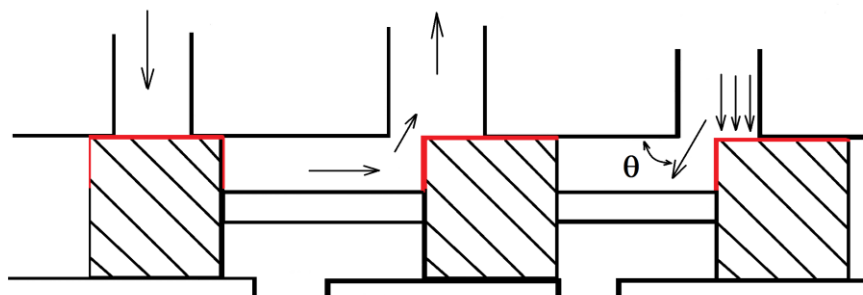


Figura 1. Zonele de eroziune în cupla sertar-bucșă.

Eroziunea produsă de particulele contaminante este analizată pe baza modelelor clasice (Finnie, Bitter, Hutchings, Sundararajan și Modelul Complex), cu particularizarea parametrilor din relațiile modelelor, pentru servovalve.

Fiecare dintre modelele analizate sunt dezvoltate pe două ipoteze privind mecanismele de producere a uzării erozive: microașchiera și microdeformarea plastică.

2. MODELELE MATEMATICE ALE EROZIUNII

2.1. Modelul Complex: Kraghelsky – Nepomiascii completat de A. Tudor

Acest model consideră că particula abrazivă de formă sferică produce deformarea plastică sau elastică a suprafeței țintă. Astfel intensitatea de uzare prin eroziune este definită ca raportul dintre masa materialului uzat (m_{uz}) și masa particulelor erozive care au produs această uzură (m_{ab}) și se calculează cu relația:

$$I_{er} = \frac{m_{uz}}{m_{ab}} = \frac{V \cdot \rho_m}{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ab} n_{ab}} \quad (1)$$

Numărul de cicluri la care se produce desprinderea particulei este dependent de starea de deformare a materialului suprafeței uzate. Relațiile de calcul pentru deformările elastice și plastice sunt:

$$n_{el} = \left[\frac{3 \pi \sigma_0 \theta}{4 k \mu} \sqrt{\frac{r}{h}} \right]^t; \quad n_{pl} = \left(\frac{e_0}{2} \sqrt{\frac{\sigma_c - 2 \mu HB}{\sigma_c + 2 \mu HB}} \right)^t \left(\frac{r}{h} \right)^{t/2} \quad (2)$$

Volumul de material deformat de o particulă și volumul de material uzat în regim elastic de deformare, V_e sau plastic, V_p se calculează cu relația:

$$V_{e,p} = \frac{\pi}{2} n_{ab} k_{e,p}^{-t} r^{\frac{1-t}{2}} \int_0^{x^*} h^{\frac{t+3}{2}} dx \quad (3)$$

Integrala din relație se calculează cunoscând legea de variație a deformății suprafeței și limita de integrare. Calculul intensității de uzare erozivă I_{er} se face cu relațiile din figura 2 considerând trei cazuri distincte (H_1 , H_2 și H_3) referitoare la cinematica particulei cu suprafața:

1. componenta tangențială a vitezei particulei se anulează la creșterea deformății suprafeței ($\mu \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 > 1$) – **cazul H_1** ;
2. componenta tangențială a vitezei particulei se anulează la scăderea deformății suprafeței ($0.5 \leq \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \leq 1$) – **cazul H_2** ;
3. componenta tangențială a vitezei particulei nu se anulează în procesul de deformare a suprafeței ($\mu \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 < 0.5$) – **cazul H_3** .

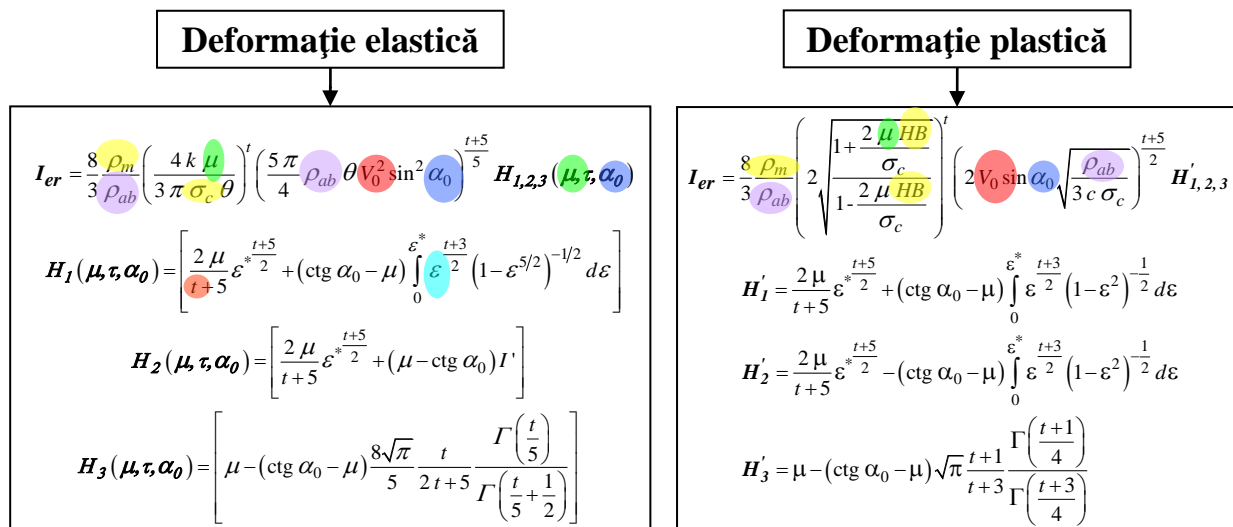


Fig. 2

2.2. Modelele Finnie

Pentru calculul ratei de uzură (definită ca raportul între masa materialului uzat și masa materialului erodent), *Finnie* consideră particulele abrazive ascuțite, efectele de așchiere și de recul ale acestora și că materialul este deformat plastic în urma impactului cu particula abrazivă. Modelele Finnie sunt aplicate la două procese de eroziune: unul în care procentul particulelor abrazive cu efecte de microașchiere (p_a) este de 10 % și cel de al doilea, unde procentul este de 50 %.

Relațiile propuse de Finnie pentru primul model (elaborat în 1958) sunt:

$$R_{au} = \frac{p_a \cdot \rho_m \cdot v^2 \cdot (1 - c_r^2)}{0.9272 \cdot H_s \cdot \Psi \cdot K_F} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{K_F} \sin^2 \alpha \right), \text{ pentru } \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{K_F}{6} \quad (4)$$

$$R_{au} = \frac{p_a \cdot \rho_m \cdot v^2 \cdot (1 - c_r^2)}{0.9272 \cdot H_s \cdot \Psi \cdot K_F} \left(\frac{K_F}{6} \cos^2 \alpha \right), \text{ pentru } \operatorname{tg} \alpha \geq \frac{K_F}{6} \quad (5)$$

unde: R_{au} – rata de uzare adimensională; p_a – procentul particulelor abrazive cu efecte de microașchiere; ρ_m – densitatea materialului țintă; v – viteza de impact a particulei ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); α – unghiul de incidență; c_r – coeficient de restituire; H_s – duritatea statică; Ψ – raportul dintre lungimea de contact (L) și adâncimea de tăiere (δ) ale amprenteii de impact; K_F – raportul dintre componenta orizontală (F_θ) și componenta verticală (F_v) a forței caracteristice impactului.

Relațiile sunt deduse cu considerarea următoarelor ipoteze:

- particulele abrazive sunt ascuțite;
- efectele de așchiere și de recul ale particulelor sunt semnificative;
- materialul este deformat plastic în urma impactului cu particula abrazivă.

Relațiile de calcul modificate (în 1960) de Finnie au structura:

$$R_{au} = \left(\frac{p_a}{2K} \right) \frac{\rho_m \cdot v^2 \cdot (1 - c_r^2)}{0.9272 \cdot H_s} \left(\sin 2\alpha - \frac{8}{K_F} \sin^2 \alpha \right), \text{ pentru } \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{K_F}{8} \quad (6)$$

$$R_{au} = \left(\frac{p_a}{16} \right) \frac{\rho_m \cdot v^2 \cdot (1 - c_r^2)}{0.9272 \cdot H_s} \left(\cos^2 \alpha \right), \text{ pentru } \operatorname{tg} \alpha \geq \frac{K_F}{8} \quad (7)$$

2.3. Modelul Hutchings

Hutchings a dezvoltat două modele ale uzării prin eroziune: modelul eroziunii prin microașchiere și modelul eroziunii prin deformare plastică. Pentru **eroziunea prin microașchiere**, Hutchings propune două ecuații de calcul a ratei de uzare (R):

- pentru unghiul de incidență normală $\alpha_0 = 90^\circ$, relația de calcul are forma:

$$R_n = K_{er} \cdot \frac{\rho_m \cdot v^2}{H} \quad (8)$$

unde: K_{er} – coeficient al uzării erozive (raportul dintre volumul de material desprins ca uzură și volumul total de material afectat de procesul de microașchiere).

- pentru impactul oblic, $\alpha_0 < 90^\circ$, relația are forma:

$$R_{n0} = K_{er} \cdot \frac{\rho \cdot v^n}{H} f(\alpha) \quad (9)$$

unde: n – exponentul vitezei, cu valori în intervalul 2K 2,5;

$f(\alpha)$ - funcție a unghiului de incidență.

În cazul **eroziunii generată prin deformare plastică** cu particule abrazive sferice, care atacă suprafața țintă sub un unghi de incidență $\alpha_0 < 90^\circ$, relația propusă are forma:

$$R = 0.033 \cdot \alpha_p \cdot \frac{\rho_m \cdot \rho_a^{0.5} \cdot v^3}{\varepsilon_{crit}^2 \cdot H_d^{1.5}} \quad (10)$$

Coeficientul α este definit de raportul dintre volumul de material deformat plastic și volumul amprenteii. Acest coeficient este dependent de geometria amprenteii, viteza de impact și de caracteristicile materialului țintă.

Hutchings calculează ε_{crit} pe baza ecuației *Coffin-Manson* (modelul de oboseală, impact normal):

$$\varepsilon_{crit} = \Delta\varepsilon_p \cdot N_c^{1/2} \quad (11)$$

unde: N_c – numărul de solicitări la care apare particula de uzură.

$\Delta\varepsilon_p$ (deformare plastică) se calculează cu relațiile:

$$\Delta\varepsilon_p = 0.2 \cdot \frac{a}{r} \quad (12)$$

$$a = r \sqrt{2 \cdot v \cdot \sqrt[4]{2 \cdot \sigma / 3 \cdot H}} \quad (13)$$

unde: r – raza particulei; a – raza amprenteii

2.4. Modelul Bitter

Eroziunea abrazivă analizată cu modelul Bitter (1963), este privită ca având două componente care apar simultan:

- componenta de microașchiere;
- componenta de deformare plastică a materialului suprafeței erodate.

Bitter consideră că procesul de microașchiere este însoțit de alunecarea particulei pe suprafață.

Viteza de alunecare a particulei poate fi caracterizată prin:

- componenta tangențială - nenulă în momentul desprinderii de suprafața incidentă;
- componenta tangențială - nulă la un anumit moment al impactului.

Bitter propune, în acest context, relații de calcul pentru rata adimensională de uzură, diferențiate în funcție de mărimea componentei tangențiale a vitezei.

Relația de calcul pentru **componenta tangențială nenulă** are forma:

$$R_{MC1} = \frac{2\rho C_1 (U_i \sin \alpha - U_{el})^2}{(U_i \sin \alpha)^{0.5}} \cdot \left(U_i \cos \alpha - \frac{\varepsilon_c C_1 (U_i \sin \alpha - U_{el})^2}{(U_i \sin \alpha)^{0.5}} \right) \quad (14)$$

iar pentru cazul în care **componenta tangențială a vitezei particulei este nulă**:

$$R_{MC2} = \frac{\rho (U_i^2 \cos \alpha - C_2 (U_i \sin \alpha - U_{el})^{1.5})}{2\varepsilon_c} \quad (15)$$

Pentru componenta de deformare repetată a suprafețelor Bitter propune relația de calcul a ratei de uzură de forma:

$$R_{M,DW} = \frac{\rho(U_i \sin \alpha - U_{el})^2}{2\varepsilon_D} \quad (16)$$

În relațiile anterioare termenii utilizați au următoarele semnificații:

R_{MC1} , R_{MC2} și $R_{M,DW}$ – rata de uzare erozivă

v_1 - viteza de impact a particulei;

v_{el} - viteza de impact la care este atinsă limita de elasticitate a materialului;

ε_D - energia specifică de deformare;

ρ_{me} - densitatea materialului particulei erozive;

E_c - modulul de elasticitate la impact;

ε_c - energia specifică la uzarea de microașchiere;

C_1 și C_2 - constante cu relațiile de definiție precizate

Rata totală a uzării erozive se calculează ca sumă a componentelor precizate, diferențiate de valoarea unghiului de incidență:

$$R_M = R_{M,DW} + R_{M,C_1} - \text{pentru } \alpha \leq \alpha_0 \quad (17)$$

$$R_M = R_{M,DW} + R_{M,C_2} - \text{pentru } \alpha > \alpha_0 \quad (18)$$

unde α_0 - corespunde unghiului de impact la care componenta tangențială a vitezei este zero, caz care are loc când particula părăsește suprafața incidentă.

2.5. Modelul Sundararajan

Relațiile de calcul ale uzării erozive propuse de *Sundararajan*, se bazează pe aceleași ipoteze ca cele ale modelelor *Hutchings*, care consideră deformarea plastică localizată cauza principală a uzării erozive iar desprinderea particulei de uzură se produce atunci când tensiunile asociate deformăției ating o valoare critică.

Sundararajan împreună cu *Shewmon* au construit un model valabil pentru unghiul de incidență normal, propunând relația de calcul a ratei de uzare:

$$R_{ss} = \frac{6.5 \cdot 10^{-3} \rho_a^{0.25} v^{2.5} (1 - e_r^2)^{1.25}}{C_p T_t^{0.75} H_s^{0.25}} \quad [9] \quad (19)$$

unde coeficientul de restituire e_r se calculează cu relația:
$$e_r = \frac{1.36 \cdot H_s^{0.625}}{E_c^{0.5} \rho_a^{0.125} v^{0.25}} \quad (20)$$

Sundararajan a dezvoltat mai departe acest model în care tratează diferențiat (pentru impactul normal și oblic) relația dintre deformare și energia cinetică și propune o relație de calcul a uzării erozive cumulate. Relațiile de calcul sunt:

• Impact normal:
$$R_{sn} = \left[\frac{5.5 \cdot 10^{-2}}{(T_s - 436)^{0.75}} \right] \frac{2^n \cdot F_t \cdot v^2 \cdot \sin(\alpha)^2 (1 - e_r^2)}{n \cdot C_p} \quad (21)$$

• Impact oblic:
$$R_{s0} = \left[\frac{5.5 \cdot 10^{-2}}{(T_s - 436)^{0.75}} \right] \frac{(n+1) \cdot \frac{\mu}{\mu_{crt}} \cdot \left(2 - \frac{\mu}{\mu_{crt}} \right) v^2 \cdot \cos(\alpha)^2}{2^{2-n} \cdot C_p \cdot n \cdot (1 + \lambda)} \quad (22)$$

Intensitatea de uzare erozivă cumulată (R_c) se calculează cu relația: $R_c = R_{sn} + R_{s0} \quad (23)$

3. REZULTATE OBȚINUTE

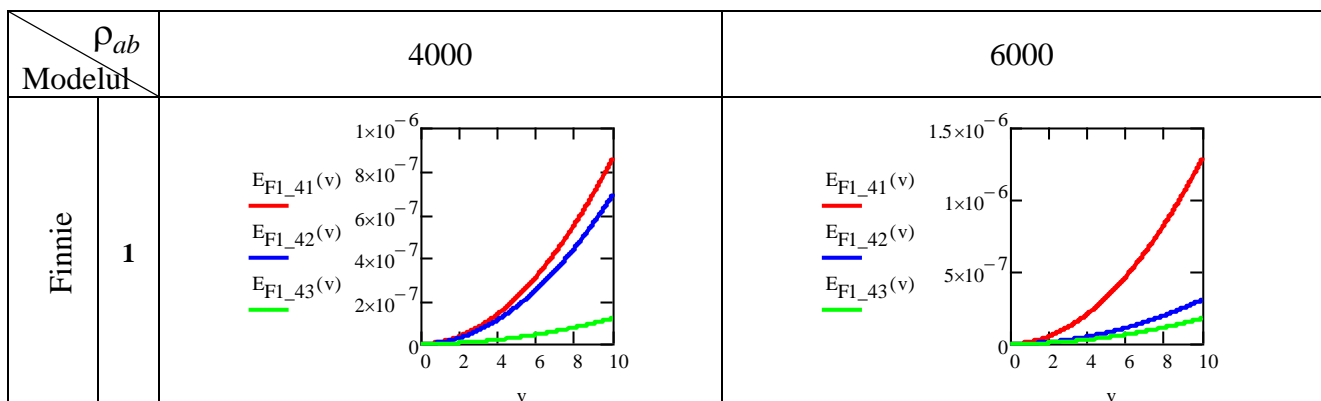
În relațiile de calcul a ratei de uzare intervin parametrii prezentați în tabelul 1, însoțiți de valorile asociate acestora, utilizate în relațiile de calcul ale modelelor analizate.

Tabelul 1. Parametrii relațiilor de calcul

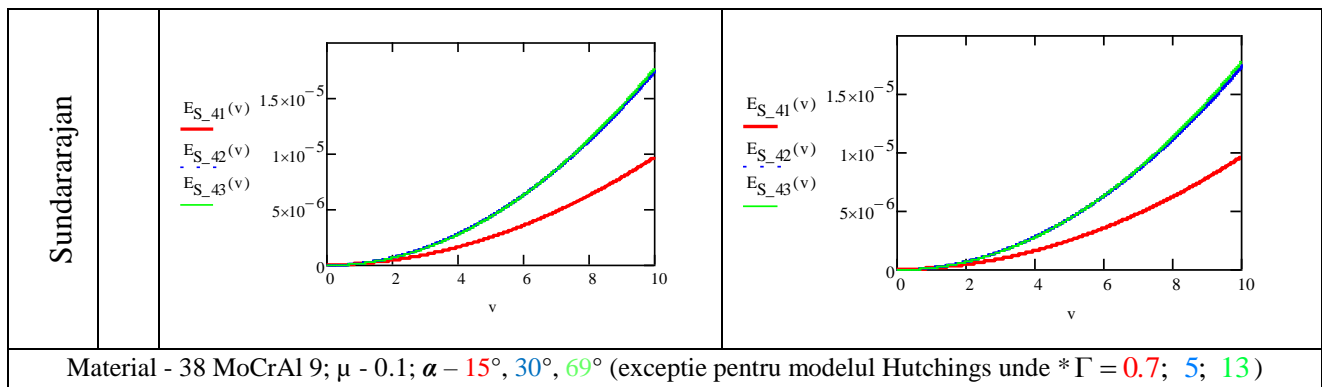
Model	Parametrii	
	Specifici modelului	Comuni modelelor
F	<p>p_a - procentul particulelor abrazive cu efecte de microașchiere (pentru o concentrație de 20 mg/l)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 50% - pentru primul model: $p_a = 10^{-2}$ și $1.5 \cdot 10^{-2}$ kg/m³; • 10% pentru cel de-al doilea $p_a = 2 \cdot 10^{-3}$ și $3 \cdot 10^{-3}$ kg/m³; <p>c_r - coeficient de restituire - 0.5; Ψ - (0.7-15) 10;</p>	<p>ρ_m - 7800 kg/m³;</p> <p>ρ_{ab} - densitatea materialului particulei: 4000 și respectiv 6000 kg/m³;</p> <p>HB - duritatea suprafeței țintă - $570 \cdot 10^6$ [N/m²]</p> <p>E - $2.1 \cdot 10^{11}$ [N/m²]</p> <p>α - unghiul de incidență : (15°, 30°, 69°)</p> <p>v - viteza de impact a particulei - 0.1 ÷ 10 m/s;</p> <p>μ - coef. de frecare între particulă și material (valoarea 0.1).</p>
B	<p>c_r - coeficient de restituire - 0.5;</p> <p>α_0 - unghiul la care viteza devine zero = 0°;</p> <p>ϵ_D - $4.7 \cdot 10^{10}$ J/m³; ϵ_C - $2.2 \cdot 10^{10}$ J/m³</p>	
H	<p>c_r - coeficient de restituire - 0.5 ; Γ - (0.7 ; 5 ; 13)</p>	
S	<p>n - coeficient al materialului - 0.1</p> <p>F_t - coeficient ce ține cont de impact - 0.025</p> <p>λ - coeficient ce ține cont de forma particulei - 2.5</p> <p>C_p - căldura specifică - 460 J/kg K;</p> <p>T_m - temperatura de topire a materialului țintă - 1800 K;</p>	
C	<p>k - constantă funcție de ipoteza de rupere asumată - 3;</p> <p>t - parametrul de oboseală prin frecare - 1;</p> <p>ν_p - coeficientul lui Poisson - 0.3;</p> <p>σ_c - rezistența la curgere a materialului suprafeței - $790 \cdot 10^6$ [N/m²];</p>	

Considerând relațiile și parametrii specifici, s-a analizat variația intensității erozive pentru fiecare model prezentat, funcție de viteza de impact, acesta fiind un parametru comun tuturor modelelor. Rezultatele obținute sunt înscrise în tabelul 2.

Tabelul 2. Variația intensității de uzare funcție de viteza de impact



	2	<p> $E_{F2_41}(v)$ $E_{F2_42}(v)$ $E_{F2_43}(v)$ </p>	<p> $E_{F2_41}(v)$ $E_{F2_42}(v)$ $E_{F2_43}(v)$ </p>
Bitter		<p> $E_{B_41}(v)$ $E_{B_42}(v)$ $E_{B_43}(v)$ </p>	<p> $E_{B_41}(v)$ $E_{B_42}(v)$ $E_{B_43}(v)$ </p>
Hutchings*	1	<p> $E_{HL_1}(v)$ $E_{HL_2}(v)$ $E_{HL_3}(v)$ </p>	
	2	<p> $E_{H2_61}(v)$ $E_{H2_62}(v)$ $E_{H2_63}(v)$ </p>	<p> $E_{H2_41}(v)$ $E_{H2_42}(v)$ $E_{H2_43}(v)$ </p>
Complex	Elastic	<p> $I_{e4_1}(v_o)$ $I_{e4_2}(v_o)$ $I_{e4_3}(v_o)$ </p>	<p> $I_{e4_1}(v_o)$ $I_{e4_2}(v_o)$ $I_{e4_3}(v_o)$ </p>
	Plastic	<p> $I_{p4_1}(v_o)^{0.15}$ $I_{p4_2}(v_o)$ $I_{p4_3}(v_o)$ </p>	<p> $I_{p4_1}(v_o)$ $I_{p4_2}(v_o)$ $I_{p4_3}(v_o)$ </p>



Observație: În cazul modelelor Finnie, influența caracteristicilor particulelor este considerată prin factorul p_a (procentul de particule abrazive) calculat în funcție de concentrația de particule. În cazul primului model Hutchings nu se ține cont de caracteristicile particulelor, diferențierea fiind funcție de valorile parametrului Γ .

4. CONCLUZII

Analizând rezultatele obținute aplicând modelele clasice ale eroziunii, se impun următoarele concluzii privind predicția nivelului intensității uzării:

- **influența durității** asupra intensității uzării erozive este diferențiată în funcție de modelul matematic astfel: modelul Complex acordă o importanță semnificativă durității; modelele Finnie, Hutchings și Sundararajan consideră că intensitatea uzării erozive este puțin influențată de duritate; modelul Bitter acorda importanță deformației elastice a materialelor de aceea pentru acest model duritatea nu afectează valoarea intensității de uzare erozivă.
- creșterea durității asociată cu **nivelul valorilor caracteristicilor materialelor** micșorează de 2 până la de 5 ori rata de uzare erozivă;
- uzura erozivă crește în funcție de numărul și densitatea particulelor abrazive care vin în contact cu suprafețele implicate;
- intensitatea uzării erozive este diferențiată în funcție de modelul utilizat pentru calculul acesteia: primul model Finnie conduce la cea mai mică valoare a intensității de uzare iar modelul Complex (deformație elastică) la valoarea cea mai mare. Aceste diferențe se datorează parametrilor diferiți de care țin cont modelele analizate. Modelele Bitter, Hutchings și Sundararajan oferă valori de același ordin de mărime al intensității de uzare eroziva.

Prin efectuarea determinărilor experimentale și compararea rezultatelor cu cele calculate pe baza modelelor eroziunii se vor valida modelele care aproximează cel mai bine valoarea intensității de uzare erozivă specifică servovalvelor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Bingley, M.S., O'Flynn, D.J., - *Examination and comparison of various erosive wear models*, Wear **258** 511-525, 2005
- [2] Bitter, J.G.A., - *A study of erosion phenomena: Part I and Part II*, Wear **6** 5-21, 169-190, 1963
- [3] Finnie, I., - *Erosion of surface by solid particles*, Wear **3** 87-103, 1960
- [4] Finnie, I., - *Erosion of surface by solid particles*, Wear **19** 81-90, 1972
- [5] Hutchings, I.M., - *A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence*, Wear **70** 269-281, 1981
- [6] Johnson, G.R., Cook, W.H., - *Eng. Fract. Mech.* **21** 31-48, 1985
- [7] Meng, H.C., Ludema, K.C., - *Wear models and predictive equations: their form and content*, Wear **181-183** 443-457, 1995
- [8] Popovici, A.I., - *Contribuții la studiul efectelor uzării asupra performanțelor sistemelor hidraulice de reglare automată*, București: Teză de doctorat, UTCB, 2012
- [9] Sundararajan, G., Shewmon, P.G., - *Wear* **84** 237-258, 1983
- [10] Tudor, A., - *Frecarea și uzarea materialelor*, Editura Bren, București, 2002