

INFLUENȚA CARACTERISTICILOR MATERIALELOR CUANTIFICATĂ ÎN MODELELE MATEMATICE ALE EROZIUNII

Prep. univ. dr. ing. Aristia-Ioana POPOVICI, U.T.C.B. - Facultatea de Utilaj Tehnologic

ABSTRACT

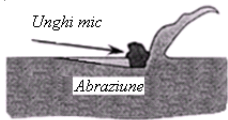
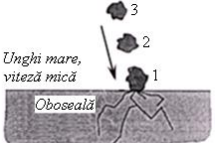
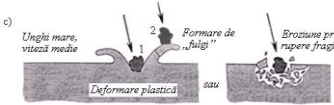
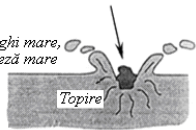
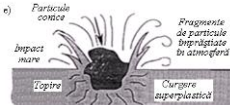
This paper presents how material properties influence erosive wear. Classical models of erosion are presented in term of abrasive erosion mechanism and relations calculus. Are presented the parameters that take into account the surface material and of the abrasive particles. It is analyzed the variation of erosive wear intensity depending on the surface material and material density of abrasive particles. The results are useful for choosing the most appropriate materials.

1. UZAREA DE EROZIUNE. MECANISMELE DE PRODUCERE A EROZIUNII

Eroziunea este definită de Hutchings în 1974 ca fiind “un proces de uzare abrazivă la care impactul repetat al particulelor mici antrenate de un fluid aflat în mișcare pe o suprafață provoacă îndepărtarea de material de pe acea suprafață”. Impactul particulelor dure se produce cu diverse viteze (cuprinse între 10÷500 m/s), la unghiuri de incidență între 0° ...90° [4][7].

În urma mișcării relative și a acțiunii repetate a particulelor, suprafața țintă suferă modificări care se dezvoltă iar după un anumit timp materialul se desprinde sub forma particulelor de uzură. În procesul de uzare erozivă, direcția și viteza fluidului purtător de particule și caracteristicile mecanice și metalografice ale materialelor suprafeței țintă și ale particulei erozive sunt semnificative. În funcție de viteză și de direcție sunt diferențiate posibilele mecanisme de producere a particulei de uzură (tabelul 1).

Tabelul 1 Mecanismele de producere a eroziunii [8][12]

α^* \ v*	MICI	MEDII	MARI
MICI			
	abraziune		
MARI			
	Oboseală superficială	- rupere fragilă - deformații plastice	Topirea suprafeței
			
			- curgere plastică - topire

* α – unghi de incidență; * v - viteza

2. MODELELE MATEMATICE ALE EROZIUNII

2.1. Modelele Finnie

Primul model 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 (figura 1).

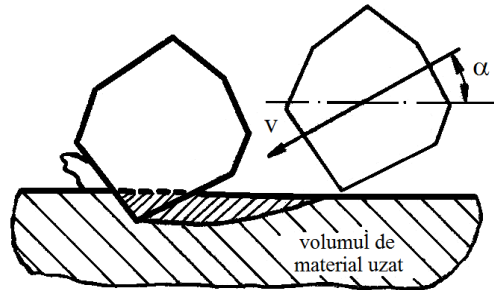


Fig. 1 Mecanismul eroziunii [5]

Relațiile de calcul propuse de Finnie au următoarea structură:

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

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

unde: 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 amprentei de impact; K_F – raportul dintre componenta orizontală (F_θ) și componenta verticală (F_v) a forței caracteristice impactului.

Al doilea model Finnie

Pentru cel de-al doilea model, *Finnie* reevaluează procentul particulelor abrazive cu efecte de microașchiere prin modificarea factorului p_a de la 50% la 10%. Astfel, relațiile de calcul devin:

$$R_u = \left(\frac{p_a}{2K} \right) \frac{\rho_m \cdot v^2 \cdot (1 - c_r^2)}{0.9272 \cdot H_s} \left(\sin 2\alpha - \frac{8}{K_F} \sin^2 \alpha \right), \text{ pentru } \operatorname{tg} \alpha \leq \frac{K_F}{8} \quad (3)$$

$$R_u = \left(\frac{p_a}{16} \right) \frac{\rho_m \cdot v^2 \cdot (1 - c_r^2)}{0.9272 \cdot H_s} (\cos^2 \alpha), \text{ pentru } \operatorname{tg} \alpha \geq \frac{K_F}{8} \quad (4)$$

2.2. Modelul Bitter

Bitter a considerat că mecanismul eroziunii abrazive are două componente care apar simultan: componenta de microașchiere, care se produce la unghiuri mici de incidență și componenta de deformare repetată a suprafeței țintă.

În cazul microașchierii, *Bitter* consideră două cazuri legate de momentul când microașchieria încetează, și anume: componenta tangențială a vitezei are o anumită valoare când particula părăsește suprafața și cazul când această viteză devine zero în timpul procesului de microașchiere [7].

Rata totală a uzării erozive este suma celor două componente și este diferențiată prin valoarea unghiului de impact la care particula părăsește suprafața:

$$R_u = R_{u,DW} + R_{u,C_1} - \text{pentru } \alpha \leq \alpha_0 \quad (5)$$

$$R_u = R_{u,DW} + R_{u,C_2} - \text{pentru } \alpha > \alpha_0 \quad (6)$$

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

Rata de uzură pentru componenta de deformare repetată a suprafețelor are forma:

$$R_{u,DW} = \frac{\rho_m (U_i \sin \alpha - U_{el})^2}{2\varepsilon_D} \quad (7)$$

Pentru cazul în care componenta tangențială a vitezei particulei nu este nulă, rata de uzură se calculează cu relația:

$$R_{u,C_1} = \frac{2\rho_m C_1 (U_i \sin \alpha - U_{el})^2}{(U_i \sin \alpha)^{0.5}} \cdot \left(U_i \cos \alpha - \frac{\varepsilon_C C_1 (U_i \sin \alpha - U_{el})^2}{(U_i \sin \alpha)^{0.5}} \right) \quad (8)$$

iar pentru cel de-al doilea caz, în care viteza este zero, cu relația:

$$R_{u,C_2} = \frac{\rho_m (U_i^2 \cos \alpha - C_2 (U_i \sin \alpha - U_{el})^{1.5})}{2\varepsilon_C} \quad (9)$$

În relațiile anterioare termenii utilizați au, în ordine, următoarele semnificații: v_i - 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_m - 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

2.3. Modelul Hutchings

Hutchings a dezvoltat două modele ale uzării abrazive prin eroziune, diferențiate de mecanismul de producere a eroziunii.

În **primul model**, cel al *eroziunii prin microașchiere*, *Hutchings* consideră ca principal mecanism de producere a eroziunii microașchiera produsă prin lovirea suprafețelor de particulele abrazive având diferite viteze și unghiuri de incidență. *Hutchings* propune două relații de calcul a ratei de uzură, diferențiate funcție de tipul impactului:

$$\text{a) impact cu incidență normală } (\alpha_0 = 90^\circ): R_n = K_{er} \cdot \frac{\rho_m \cdot v^2}{H} \quad (10)$$

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).

$$\text{b) impact oblic } (\alpha_0 < 90^\circ): R_{n0} = K_{er} \cdot \frac{\rho \cdot v^n}{H} f(\alpha) \quad (11)$$

unde: n – exponentul vitezei (cuprins între 2...2,5); $f(\alpha)$ - funcție a unghiului de incidență.

În al doilea model, cel al *eroziunii prin deformare plastică*, *Hutchings* consideră că eroziunea este provocată de particule abrazive sferice, rezultate în urma procesului de oboseală superficială, care atacă suprafața țintă sub un unghi de incidență normal; la impactul particulei cu suprafața se dezvoltă o energie cinetică ce conduce la deformarea plastică și elastică locală a materialului [4]. Solicitarea repetată a materialului sfârșește prin despinderea particulei de uzură, moment marcat de atingerea valorii critice a deformației la rupere prin întindere (ε_{crit}).

Pentru impactul oblic, relația propusă are forma:
$$R = 0.033 \cdot \alpha_p \cdot \frac{\rho_m \cdot \rho_a^{0.5} \cdot v^3}{\varepsilon_{crit}^2 \cdot H_d^{1.5}} \quad (12)$$

Coefficientul α reprezintă raportul dintre volumul de material deformat plastic și volumul amprenteii, și este dependent de geometria amprenteii, viteza de impact și de caracteristicile materialului țintă.

Hutchings propune o relația de calcul pentru ε_{crit} , bazată pe ecuația *Coffin-Manson* (modelul de oboseală, impact normal):

$$\varepsilon_{st} = \Delta\varepsilon_p \cdot N_c^{1/2} \quad (13)$$

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

$$\Delta\varepsilon_p \text{ se calculează cu relația: } \Delta\varepsilon_p = 0.2 \cdot \frac{a}{r} \quad [11] \quad (14)$$

unde: r – raza particulei; a – raza amprenteii: $a = r\sqrt{2 \cdot v} \cdot \sqrt[4]{2 \cdot \sigma / 3 \cdot H}$

2.4. Modelul Sundararajan

Relațiile de calcul ale uzării erozive propuse de *Sundararajan*, se bazează pe aceleași ipoteze ca cele ale modelelor *Hutchings*, care consideră deformația plastică localizată cauza principală a uzării erozive iar desprinderea particulei de uzură se produce atunci când tensiunile asociate deformației 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:

$$R_{ss} = \frac{6.5 \cdot 10^{-3} \rho_a^{0.25} v^{2.5} (1 - e_r^2)^{1.25}}{C_p T_t^{0.75} H_s^{0.25}} \quad [9] \quad (15)$$

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

Apoi *Sundararajan* a dezvoltat acest model în care tratează relația dintre deformație și energia cinetică diferențiat pentru impactul normal și oblic și propune o relație de calcul a uzării erozive cumulate. Relațiile de calcul sunt:

- Impact normal:
$$R_{sn} = \left[\frac{5.5 \cdot 10^{-2}}{(T_s - 436)^{0.75}} \right] \frac{2^n \cdot F_t \cdot v^2 \cdot \sin(\alpha)^2 (1 - e_r^2)}{n \cdot C_p} \quad (16)$$

- Impact oblic:
$$R_{s0} = \left[\frac{5.5 \cdot 10^{-2}}{(T_s - 436)^{0.75}} \right] \frac{(n+1) \cdot \frac{\mu}{\mu_{crit}} \cdot \left(2 - \frac{\mu}{\mu_{crit}} \right) v^2 \cdot \cos(\alpha)^2}{2^{2-n} \cdot C_p \cdot n \cdot (1 + \lambda)} \quad (17)$$

- Intensitatea de uzare erozivă cumulată (R_c) se calculează cu relația: $R_c = R_{sn} + R_{s0} \quad (18)$

2.5. Modelul Complex: Kraghelsky-Nepomiasscii completat de T. Andrei

Particula abrazivă de formă sferică, considerată rigidă lovește suprafața cu o anumită viteză, sub un unghi de incidență ($0^\circ \dots 90^\circ$), conform figurii 2.

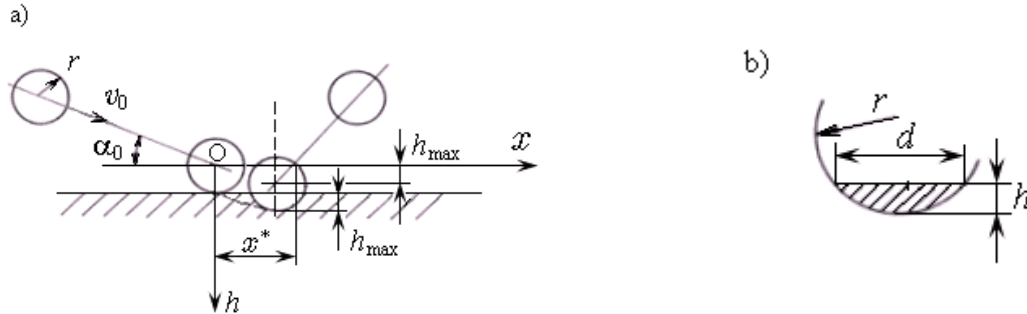


Fig. 2 Interacțiunea particulei cu suprafața supusă eroziunii [12]

În urma impactului mecanic al particulei abrazive se produce deformarea plastică sau elastică a suprafeței țintă. 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:

$$I_{er} = \frac{m_{uz}}{m_{ab}} = \frac{V \cdot \rho_m}{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ab} n_{ab}} \quad (19)$$

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:

$$n_{el} = \left[\frac{3 \pi \sigma_0 \theta}{4 k \mu} \sqrt{\frac{r}{h}} \right]^t; \quad n_{pl} = \left(\frac{e_0}{2} \sqrt{\frac{\sigma_c - 2 \mu HB}{\sigma_c + 2 \mu HB}} \right)^t \left(\frac{r}{h} \right)^{t/2} \quad (20)$$

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:

$$V_{e,p} = \frac{\pi}{2} n_{ab} k_{e,p}^{-t} r^{\frac{1-t}{2}} \int_0^{x^*} h^{\frac{t+3}{2}} dx \quad (21)$$

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 3 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** .

Deformație elastică

$$I_{er} = \frac{8 \rho_m}{3 \rho_{ab}} \left(\frac{4 k \mu}{3 \pi \sigma_c \theta} \right)^t \left(\frac{5 \pi}{4} \rho_{ab} \theta V_0^2 \sin^2 \alpha_0 \right)^{\frac{t+5}{5}} H_{1,2,3}(\mu, \tau, \alpha_0)$$

$$H_1(\mu, \tau, \alpha_0) = \left[\frac{2 \mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} + (\text{ctg } \alpha_0 - \mu) \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} (1 - \varepsilon^{5/2})^{-1/2} d\varepsilon \right]$$

$$H_2(\mu, \tau, \alpha_0) = \left[\frac{2 \mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} + (\mu - \text{ctg } \alpha_0) I' \right]$$

$$H_3(\mu, \tau, \alpha_0) = \left[\mu - (\text{ctg } \alpha_0 - \mu) \frac{8\sqrt{\pi}}{5} \frac{t}{2t+5} \frac{\Gamma\left(\frac{t}{5}\right)}{\Gamma\left(\frac{t}{5} + \frac{1}{2}\right)} \right]$$

Deformație plastică

$$I_{er} = \frac{8 \rho_m}{3 \rho_{ab}} \left(2 \sqrt{\frac{1 + \frac{2 \mu HB}{\sigma_c}}{1 - \frac{2 \mu HB}{\sigma_c}}} \right)^t \left(2 V_0 \sin \alpha_0 \sqrt{\frac{\rho_{ab}}{3 c \sigma_c}} \right)^{\frac{t+5}{2}} H'_{1,2,3}$$

$$H'_1 = \frac{2 \mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} + (\text{ctg } \alpha_0 - \mu) \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} (1 - \varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon$$

$$H'_2 = \frac{2 \mu}{t+5} \varepsilon^{*\frac{t+5}{2}} - (\text{ctg } \alpha_0 - \mu) \int_0^{\varepsilon^*} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} (1 - \varepsilon^2)^{\frac{1}{2}} d\varepsilon$$

$$H'_3 = \mu - (\text{ctg } \alpha_0 - \mu) \sqrt{\pi} \frac{t+1}{t+3} \frac{\Gamma\left(\frac{t+1}{4}\right)}{\Gamma\left(\frac{t+3}{4}\right)}$$

Fig. 3

2.6. Caracteristicile materialului pentru fiecare model

În relațiile de calcul a intensității de uzare propuse în modelele prezentate intervin anumiți parametri ce țin cont de materialul particulei abrazive și/sau cel al suprafeței țintă. În tabelul 3 sunt marcate caracteristicile materialului pentru fiecare model: Finnie (F), Bitter (B), Hutchings (H), Sundararajan (S) și modelul Complex (C) cu cele două cazuri - deformații elastice și plastice.

Tabelul 3 Caracteristicile materialului în modelele analizate

Modelul	F		B	H		S	C	
	1	2		1	2		El	Pl
ρ_m – densitatea materialului suprafeței țintă	x	x	x	x	x		x	x
ρ_{ab} – densitatea materialului particulei			x		x	x	x	x
σ_c – rezistența la curgere a materialului suprafeței							x	x
E – modulul de elasticitate al materialului suprafeței	x	x	x			x	x	
HB – duritatea suprafeței țintă	x	x	x	x	x	x		x

3. INFLUENȚA CARACTERISTICILOR MATERIALELOR CUANTIFICATĂ ÎN MODELELE MATEMATICE ALE EROZIUNII. REZULTATE. CONCLUZII

Pentru evidențierea influenței caracteristicilor materialelor asupra eroziunii, în cele ce urmează sunt studiate modelele eroziunii considerând 3 materiale cu proprietăți distincte, prezentate în tabelul 4.

Tabelul 4 Proprietățile materialelor

Material	OLC 45	28 TiMnCr 12	38 MoCrAl 9
Proprietatea			
HB [N/m ²]	197·10 ⁶	230·10 ⁶	570·10 ⁶
σ_c [N/m ²]	40·10 ⁶	120·10 ⁶	790·10 ⁶
E [N/m ²]	2.1·10 ¹¹		
ρ_m [kg/m ³]	7800		

De asemenea se consideră influența materialului particulei abrazive prin parametrul densității (ρ_{ab}), considerând două valori corespunzătoare unei concentrații diferite de particule contaminante: 4000 kg/m^3 și 6000 kg/m^3 .

Observații:

- în *modelul Complex* – cazul deformațiilor elastice, caracteristica materialului este considerată prin parametrul σ_c – rezistența la curgere a materialului suprafeței iar în cazul deformației plastice prin parametrul HB – duritatea suprafeței țintă;
- în cazul *modelelor Finnie*, influența caracteristicilor particulelor este considerată prin factorul p_a (procentul de particule abrazive) calculat în funcție de concentrația de particule;
- *primul model Hutchings* nu ține cont de caracteristicile particulelor.

În tabelul 5 sunt înscrise valorile parametrilor ce intervin în relațiile de calcul ale modelelor analizate.

Tabelul 5 Parametrii relațiilor de calcul

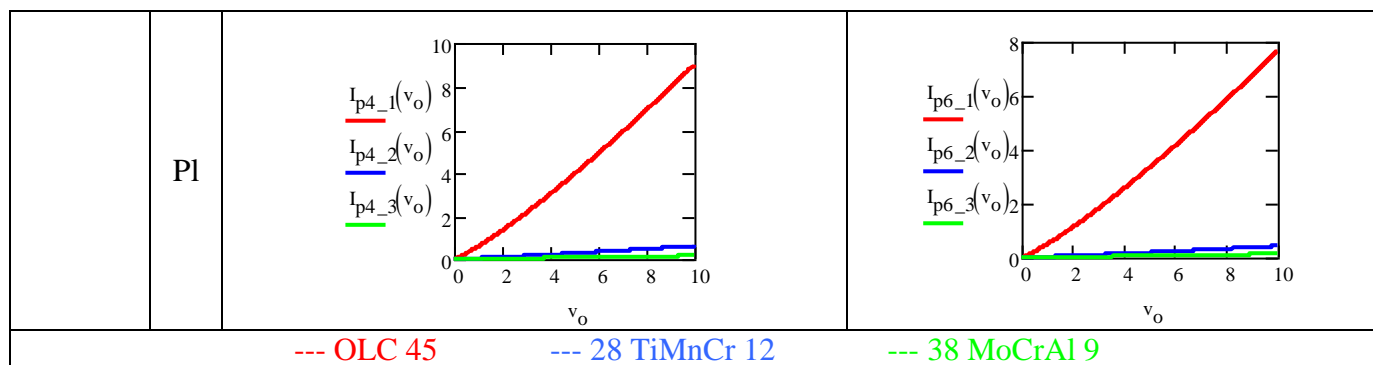
Model	Parametrii	
	Specifici modelului	Comuni modelelor
F	p_a -procentul particulelor abrazive cu efecte de microașchiere <ul style="list-style-type: none"> • 50% - pentru primul model: $p_a=10^{-2}$ și $1.5 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$; • 10% pentru cel de-al doilea $p_a=2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$; c_r – coeficient de restituire – 0.5; Ψ – 10;	ρ_m – 7800 kg/m^3 ; α - unghiul de incidență – 30° v – $0.1 \div 10 \text{ m/s}$; μ - 0.1.
B	c_r – coeficient de restituire – 0.5; α_0 - unghiul la care viteza devine zero = 0° ; ϵ_D - $4.7 \cdot 10^{10} \text{ J/m}^3$; ϵ_C - $2.2 \cdot 10^{10} \text{ J/m}^3$	
H	c_r – coeficient de restituire – 0.5 ; Γ – 10;	
S	n – coeficient al materialului – 0.1 F_t – coeficient ce ține cont de impact – 0.025 λ – coeficient ce ține cont de forma particulei – 2.5 C_p – căldura specifică – 460 J/kg K ; T_m – temperatura de topire a materialului țintă – 1800 K ;	
C	k – constantă funcție de ipoteza de rupere asumată - 3; t – parametrul de oboseală prin frecare – 1; ν_p - coeficientul lui Poisson – 0.3;	

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 6.

Tabelul 6 Variația intensității de uzare funcție de viteza de impact

Modelul		ρ_{ab}	
		4000 [kg/m^3]	6000 [kg/m^3]
Finnie	1		

	2	<p> $E_{F2_41}(v)$ $E_{F2_42}(v)$ $E_{F2_43}(v)$ </p>	<p> $E_{F2_61}(v)$ $E_{F2_62}(v)$ $E_{F2_63}(v)$ </p>
Bitter		<p> $E_{B_41}(v)$ $E_{B_42}(v)$ $E_{B_43}(v)$ </p>	<p> $E_{B_61}(v)$ $E_{B_62}(v)$ $E_{B_63}(v)$ </p>
Hutchings	1	<p> $E_{H1_1}(v)$ $E_{H1_2}(v)$ $E_{H1_3}(v)$ </p>	
	2	<p> $E_{H2_41}(v)$ $E_{H2_42}(v)$ $E_{H2_43}(v)$ </p>	<p> $E_{H2_61}(v)$ $E_{H2_62}(v)$ $E_{H2_63}(v)$ </p>
Sundararajan		<p> $E_{S_41}(v)$ $E_{S_42}(v)$ $E_{S_43}(v)$ </p>	<p> $E_{S_61}(v)$ $E_{S_62}(v)$ $E_{S_63}(v)$ </p>
Complex	EI	<p> $I_{e4_1}(v_0)$ $I_{e4_2}(v_0)$ $I_{e4_3}(v_0)$ </p>	<p> $I_{e6_1}(v_0)$ $I_{e6_2}(v_0)$ $I_{e6_3}(v_0)$ </p>



Concluzii

- pentru toate modelele analizate, intensitatea de uzare crește cu micșorarea durității. În cazul modelului Complex duritatea are o importanță semnificativă, pentru modelele Finnie și Hutchings duritatea materialelor influențează mai puțin valoarea intensității de uzare iar în cazul modelului Sundararajan aceasta are nici o influență extrem de mică; modelul Bitter acorda o importanță mare deformației elastice a materialelor de aceea pentru acest model duritatea nu afectează valoarea intensității de uzare erozivă.
- o densitate mai mare a particulelor abrazive afectează mai mult uzura suprafețelor cu care vin în contact;
- modelele Bitter, Hutchings și Sundararajan oferă valori de același ordin de mărime al intensității de uzare erozivă;
- valoarea minimă a intensității de uzare rezultă în cazul primului model Finnie iar valoarea maximă rezultă în cazul modelului Complex – deformații elastice. Aceste diferențe se datorează parametrilor diferiți de care țin cont modelele analizate.
- influența caracteristicilor materialului are o importanță deosebită; conform rezultatelor, o duritate mai mare poate să micșoreze de 2 până la de 5 ori rata de uzare erozivă.

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.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Bingley, M.S, O'Flynn, D.J., – *Examination and comparison of various erosive wear models*, Wear 258, pp 511-525, 2005
- [2] Brach, R.M., - *Impact dynamics with applications to solid particle erosion*, International Journal of Impact Engineering, volume 7, issue 1, 1988, pp. 37-53
- [3] Finnie, I., - *Some observations on the erosion of ductile metals*, Wear 19, 1972, pp 81-90
- [4] Hutchings, I.M., *A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence*, Wear 70, pp 269-281, 1981
- [5] Petrescu, F.N., *Tribologie*, Institutul de Construcții București, București, 1986
- [6] Popovici, A.I., *Studiul actual al cercetarilor asupra eroziunii*, SINUC 2010 - AI XVI – lea Simpozion Național de Utilaje pentru Construcții, București, 2010
- [7] Popovici, A.I., “*Contribuții la efectele uzării asupra performanțelor sistemelor hidraulice de reglare automată*”, Teză de doctorat, București, septembrie 2012
- [8] Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., - *Engineering Tribology*, Tribology Series, 24, 1993, ISBN 0-444-89235-4
- [9] Stack, M.M., Corlett, N., Zhan, S., - *Impact angle effects on the transition boundaries of the aqueous erosion-corrosion map*, Wear 225-229, pp 190-198, 1999
- [10] Sundararajan, G., - *A comprehensive model for the solid particle erosion on ductile materials*, Wear 149, pp 111-127, 1991
- [11] Tabor, D., - *The hardness of metals*, Clarendon, Oxford, 1951
- [12] Tudor, A., Vlase, M., *Uzarea Materialelor*, Editura Bren, București, 2010