



A XVI-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2016

MATERIALE SPECIFICE FABRICAȚIEI MAȘINILOR HIDRAULICE ȘI COMPORTAREA LOR LA FENOMENUL DE EROZIUNE

Elena Crina CRÎNGAȘU, Brândușa GHIBAN,
Carmen Anca SAFTA

SPECIFIC MATERIALS USED IN MANUFACTURING HYDRAULIC TURBINES AND THEIR BEHAVIOR TO EROSION

The goal of the paper is regarding the alloy materials used in the manufacturing of hydraulic machines and how the process of corrosion has influenced these materials. The mechanism of silt erosion is discussed and are compared the effects of erosion and cavitational phenomena.

Keyword: corrosio, erosion abraziv, hydraulic machine, stainless steel

Cuvinte cheie: coroziune, eroziune abrazivă, masini hidraulice, oțeluri inoxidabile

1. Introducere

Coroziunea este un proces chimic sau electrochimic de degradare a suprafețelor corpurilor metalice prin acțiunea oxigenului din aerul umed sau prin acțiunea diverselor substanțe chimice, [1].

Când procesul de degradare a suprafeței metalice este cauzat de curgerea unui fluid, de exemplu apă, vorbim despre eroziune. În această situație degradarea suprafețelor metalice de curgere se face și sub impactul suspensiilor solide din apă iar fenomenul de degradare poate fi considerat prin abraziune. Astfel, în cazul mașinilor hidraulice,

distrugerea suprafeței se face sub acțiunea chimică și mecanică a fluidului de curgere.

Distrugerea materialelor din componența mașinilor hidraulice (pompe și turbine hidraulice) și instalațiilor hidraulice se face și sub efectul fenomenului de cavitație, [2]. Efectul fenomenului de cavitație asupra diferitelor elemente constructive din componența mașinilor și instalațiilor hidraulice se manifestă ca o distrugere prin eroziune dar mecanismele fenomenului de eroziune cavitațională sunt mult mai complexe, figura 1 și figura 2.

Fenomenul de cavitație apare atunci când în lichidul în mișcare presiunea scade până la valoarea presiunii de vaporizare a lichidului la temperatura dată, atunci când se produce vaporizarea lichidului însoțită de degajarea gazelor dizolvate, [2, 3].



Fig. 1 Rotor turbină Francis distrus datorită fenomenului de eroziune abrazivă, [4]



Fig. 2 Eroziune cavitațională la conul aspirator al turbinei Francis, [5]

În literatura de specialitate lucrările lui Saini P.R. [6, 7] fac o retrospectivă a celor mai noi cercetări în domeniul fenomenului de cavitație și a eroziunii abrazive (datorită suspensiilor solide din apă) întâlnit la turbinele hidraulice de tip Francis și Pelton. Se menționează astfel că deși studiile teoretice și experimentale au adus îmbunătățiri în proiectarea acestor mașini, sau îmbunătățiri ale materialelor metalice utilizate, totuși efectul fenomenului de cavitație nu poate fi evitat pentru orice parametrii de funcționare ai turbinei. De asemenea eroziunea abrazivă nu poate fi evitată total, dar poate fi redusă la un nivel la care efectele economice pot fi acceptate.

În lucrarea de față sunt menționate elemente teoretice de bază specifice eroziunii abrazive la mașinile hidraulice. De asemenea sunt prezentate materiale din care sunt realizate elementele componente active din cadrul mașinilor hidraulice și comportarea acestor materiale la eroziune.

2. Eroziunea abrazivă la mașinile hidraulice

Mașinile hidraulice, motoare sau generatoare, sunt prezente în majoritatea instalațiilor industriale de proces sau instalații energetice. Din cadrul lor, pompele și turbinele hidraulice fac obiectul prezentei lucrării.

Atât pompele cât și turbinele sunt supuse fenomenului de cavitație (cu efectul de eroziune cavitațională) și fenomenului de eroziune abrazivă care prin distrugerile pe care le aduc materialului, coroborat cu solicitările la oboseală caracteristice regimurilor de exploatare conduc la reducerea duratei de viață a mașinii hidraulice, [8].

Eroziunea abrazivă provocată de acțiunea apei cu suspensii solide (nisip) asupra suprafețelor mecanice este un proces al cărui mecanism este atât de natură mecanică prin impactul și alunecarea particulelor solide pe suprafața metalică, cât și chimică prin acțiunea corozivă a apei, figura 3. Eroziunea care apare la impactul particulei abrazive cu suprafața metalică depinde de unghiul traiectoriei particulei abrazive sub care are loc impactul cu suprafața metalică și de viteza particulei, [9].

Astfel înlăturarea materialului la fiecare impact al particulei solide duce la deformarea suprafeței. În timp, pe suprafața deformată apar fisuri care pun în pericol funcționarea mașinii hidraulice.

Pentru mașinile hidraulice Brekke ([10], 2002) clasifică eroziunea abrazivă în trei categorii: microeroziune, eroziune dată de curgerea secundară cu vortex și eroziune accelerată.

Cum proiectarea mașinilor hidraulice se face pentru numere Reynolds care variază între 10^6 și 10^8 , mașinile hidraulice sunt expuse celor trei tipuri de eroziune cavitațională.

Microeroziunea apare la viteze de curgere foarte mari și particule de nisip cu dimensiuni maxime de 60 μm .

Efectul este o eroziune abrazivă puternică în care suprafața metalică are aspectul cojii de portocală, figura 4.

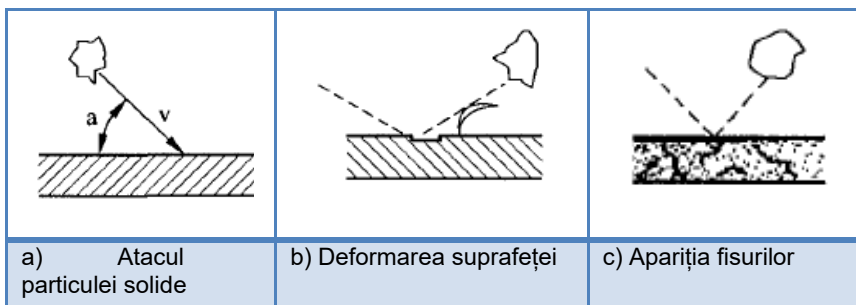


Fig. 3 Mecanismul eroziunii abrazive, [9]

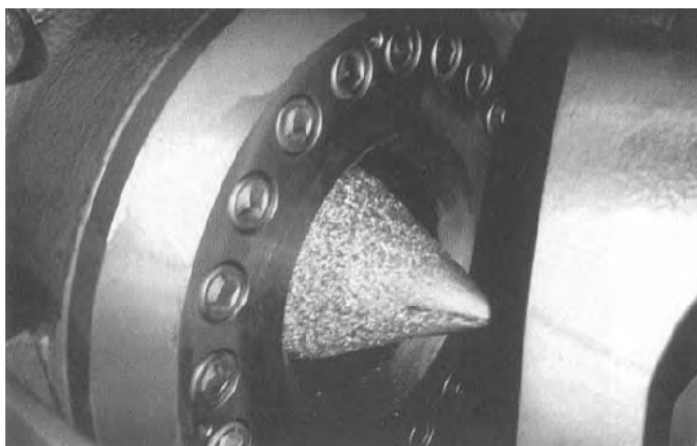


Fig. 4 Microeroziune pe suprafața acului injector la o turbină Pelton în urma funcționării în apă cu particule de nisip mai mici de 60 μm , [10]

Eroziunea dată de curgerea secundară cu vortex, figura 5, (cunoscută și ca "horseshoe vortex") apare ca urmare a schimbării direcției de curgere la întâlnirea unui obstacol cilindric când efectul stratului limită se combină cu schimbarea accelerării curgerii.

În acest caz obstacolul este dat de bordul de atac al paletelor aparatului director (la turbinele cu reacțiune) sau în spatele nervurilor ce susțin acul injectorului turbinei Pelton (turbină cu acțiune), [11].



Fig. 5 Eroziune dată de curgerea secundară cu vortex pe inelul superior al aparatului director, [12]

Eroziunea accelerată este caracteristică curgerilor cu accelerații normale pe liniile de curent ceea ce va separa curgerea bifazică apă-suspensii solide în apă și suspensii solide care vor intra în coliziune cu pereții metalici.

Se produce o deformare plastică a suprafețelor deoarece mărimea particulelor de nisip este de minim 0,5 mm, figura 6.



Fig. 6 Eroziune accelerată a cupelor rotorului de turbină Pelton, [11]

Toate suprafețele metalice care intră în contact cu jetul de apă aflat sub presiune și în curgere bifazică apă-nisip (sau măr) sunt

supuse distrugerilor date de eroziunea abrazivă, indiferent de tipul mașinii hidraulice. În cazul turbinelor hidraulice cu acțiune, de tipul turbinelor Pelton elementele constructive expuse fenomenului de eroziune sunt: elementele colectoare ale sistemului de admisie a apei la intrarea în turbină, sistemul de injector cu diuză și ac injector, elementele supapelor dereglare și deflectorul, rotorul cu cupe. Pentru turbinele cu reacțiune de tip Francis, Kaplan, Deriaz-Kviatkovski sau Bulb sunt expuse fenomenului de eroziune abrazivă elementele sistemului de distribuție a apei format din stator, aparat director, inel superior aparat director; la acestea se adaugă rotorul, inel labirint etanșare, sistem etanșare arbore, con aspirator, [11].

Asocierea fenomenului de eroziune abrazivă cu cel de eroziune cavitațională este întâlnit des în exploatare. S-a constatat că la curgerea fluidului bifazic prin turbina hidraulică, prezența sedimentelor și mărirea lor favorizează funcționarea în regim cavitațional, [10].

Pompele pentru suspensii (sau fluide încărcate) sunt proiectate astfel încât trecerea fluidului bifazic apă-particule solide să nu aibă un impact negativ asupra mașinii. În acest sens rotorul pompelor centrifuge au canal rotoric de lățime mai mare (pentru un număr mai mic de pale), grosimea paletelor rotorice este de 3 până la 4 ori mai mare decât în construcția pompei pentru apă curată, [13], și poziția nasului carcasi spirale are un unghi la centru $\theta_n = 25^\circ \sim 50^\circ$ și rezultă în funcție de turația specifică n_q a pompei folosind formula

$$\text{statistică: } \theta_n = 139 \left(\frac{n_q}{19,9} \right)^{7,39} e^{-26,57 \cdot \frac{n_q}{100}} \quad \text{și } n_q = (16,4 \div 35,6), \quad [10].$$

Elementele constructive care sunt supuse fenomenului de eroziune abrazivă au suprafețele metalice în contact permanent cu jetul de apă și sunt rotorul, inelele de etanșare și carcasa spirală, [13].

3. Materiale specifice construcției mașinilor hidraulice

Materialele specifice mașinilor hidraulice au proprietăți fizice, mecanice, chimice, electrice și termice care răspund necesității de rezistență la eroziune abrazivă și cavitațională.

În construcția mașinilor hidraulice sunt folosite materiale metalice și nemetalice, iar în cadrul turbopompelor sunt folosiți și unii elastomeri sau materiale sintetice care îmbracă/acoperă diferite suprafețe metalice, [13].

Rezistența la rupere, limita de elasticitate, limita de curgere, energia de deformare, limita la oboseală, duritatea, modulul de

elasticitate, reziliența maximă, fragilitatea, conductivitatea termică, punctul de topire, aderența oxizilor la suprafață, structura cristalină, mărirea granulelor compușilor din transformările de fază sunt doar câteva din caracteristicile materialelor rezistente la eroziune, [1, 2]. Aceste caracteristici se coroborează cu cerințele de fabricație (prelucrabilitate prin deformare plastică la cald și la rece), cerințele de exploatare (fiabilitate, întreținere ușoară și durată de viață) și cerințe economice (costuri de producție, livrare, calitate), [10].

În construcția turbinelor hidraulice se folosesc oțeluri inoxidabile. Acestea sunt aliaje complexe cu un conținut minim de 10,5 % Cr, cu sau fără alte elemente de aliere. Oțelurile inoxidabile formează oțeluri austenitice, feritice, martensitice sau duplex (ferito-austenitice), [14]. Dintre acestea, oțelul austenitic-martensitic cu δ -ferită și 20-25 % austenită stabilă (ASTM743-13Cr4Ni și SEW410-16Cr5Ni) au rezistență la coroziune și eroziune cavitațională, [15].

Pentru aceste mărci, o normalizare urmată de tratament termic la 580 °C, creează structura dură cu martensită.

Oțelurile inoxidabile austenitice au rezistență la coroziune datorită formării unui strat de oxid pe suprafață. La aceasta se adaugă granulația fină ceea ce duce la producerea unui strat stabil pe suprafața oțelului și scăderea coroziunii intergranulare, coroziunii pitting și a fisurii din cauza coroziunii sub sarcină. Cercetările în domeniu au arătat că tratamentul de nitrurare la temperatură ridicată îmbunătățește comportamentul cavitațional al oțelului austenitic AISI 304L (SUS304), [14].

Oțelurile inoxidabile feritice au un conținut de Cr de 10-30 % și nu prezintă transformări în stare solidă. De exemplu oțelul feritic JFE443CT (SUS443J1) are o rezistență mult mai bună la coroziune decât oțelul inoxidabil austenitic SUS304, dar cu o reziliență limitată, [14].

Aceste tipuri de oțeluri inoxidabile sunt sensibile la coroziunea intercristalină și au o limită de curgere mai mare decât a oțelurilor austenitice. De asemenea, ductilitatea scade în funcție de conținutul de crom și crește pentru un conținut scăzut de carbon și azot, [14].

Oțelurile inoxidabile martensitice sunt aliaje cu 12÷13 % Cr și 0,1÷1,2 % C fiind caracterizat de rezistență la coroziune ridicată, duritate și plasticitate obținute prin tratamente termice în stare călit și revenit.

Dacă conținutul de Cr este mai mare de 13 % și cel de C este peste 0,15 % se obține un oțel inoxidabil complet martensitic în care

conținutul scăzut de carbon duce la o creștere a conținutului de ferită, deci o scădere a rezistenței materialului, [14].

Tabelul 1 prezintă oțelurile inoxidabile pentru turbine hidraulice, [10].

În tabelul 1 sunt precizate elementele constructive de bază din alcătuirea turbinelor hidraulice și materialele metalice folosite.

Tabelul 1

Element constructiv		Condiții de exploatare	Material
Turbină cu reacțiune	Aparat director	Viteze mari cu apariția fenomenului de eroziune	12Cr4Ni
	Rotor		16Cr5Ni
	Con aspirator		16Cr5Ni
	Inel aparat director	Eroziune abrazivă	16Cr5Ni 17Cr1Ni
	Inel etanșare statică	Interstițiu minim pentru a evita scurgeri	Ni-Al bronz
	Labirint		16Cr5Ni
Turbină cu acțiune	Duză și ac injector	Viteze mari cu apariția fenomenului de eroziune	16Cr5Ni
	Cupe rotor Pelton		13Cr4Ni
	Tijă servomotor injector	Frecare redusă	cromat
	Carcasă	Se realizează prin sudare <i>in situ</i>	Oțel cu conținut scăzut de carbon și grăunți fini
	Conducte intrare injector		Oțel turnat (grăunți fini)

De exemplu, oțelul inoxidabil martensitic NSSC420J1M prezintă o rezistență foarte bună la eroziune cavitațională, iar oțelul 14317/GX4CrNi13-4 (DIN EN 10213-2) își poate îmbunătăți rezistența la eroziune cavitațională dacă este tratat prin călire, revenire, nitrurare și sablare.

Performanțe îmbunătățite pentru rezistența la eroziune a acestui oțel se obțin și prin călire superficială cu laser urmat de tratament de revenire, [16].

Oțelurile inoxidabile de tip duplex sunt create pentru industria petrolieră și au o rezistență net superioară la coroziune; nu se folosesc în hidroenergetică din cauza costurilor de material.

4. Concluzii

■ Parte a unui proces complex de coroziune, eroziunea abrazivă datorată curgerii bifazice a apei cu suspensii solide crează probleme majore în funcționarea mașinilor hidraulice.

■ Lucrarea de față a prezentat aspecte teoretice de bază privind eroziunea abrazivă și cavitațională punând accent pe tipurile de materiale folosite în construcția mașinilor hidraulice, astfel încât distrugerea suprafețelor metalice să fie cât mai mică.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Ghiban, B., *Corrosion and protection of metallic materials*, Ed. Printech, 2004.
- [2] Anton, I., *Cavitația*, vol. I, Editura Academiei, 1984.
- [3] Florea, J., Panaitescu, V., *Mecanica fluidelor*, Editura Didactică și pedagogic, București, 1979.
- [4] Gummer, J.H., *Combating silt erosion in hydraulic turbines*, HRW Hydro Review Worldwide, 03/01/2009, Hydroworld.com
- [5] Grecu, M., *Cavitația și eroziuni cavitaționale la turbinele Francis. Studiu de caz CHE Motru*, Teză doctorat, IOSUD-UPB, 2015.
- [6] Kumar, P., Saini, R.P., *Study of cavitation in hydro turbines - a review*, Renewable and sustainable Energy Reviews, 2009, pag. 374-383.
- [7] Padhy, K.M., Saini, P.R., *A review on silt erosion in hydroturbines*, Renewable and sustainable Energy Reviews, 2009, pag. 1974-1987.
- [8] Alămoreanu, E., Safta, C.A., *Fiabilitate și metode statistice în inginerie mecanică*, Editura Printech, 2007.
- [9] Karelin, V.Ya., Denisov, A.I., Wu, Y.L., *Fundamentals of Hydroabrasive Erosion Theory*. Book series on Hydraulic machinery, Vol. 2, edited by Duan C. G. and Karelin V. Y., 2002.
- [10] Brekke, H., Wu, H., Cai, B. Y., *Design of hydraulic machinery working in sand laden water*. Book series on Hydraulic machinery, Vol. 2, edited by Duan C. G. and Karelin V. Y., 2002.
- [11] Neopane, H.P., Dahlhaug, O.G., Cervantes, M., *Sediment Erosion in Hydraulic Turbines*, Global Journal of Researches in Engineering, Mechanical and Mechanics Engineering, Volume 11 Issue Version 1.0 November 2011.

- [12] Thapa, B., Chaudhary, P., Dahlhaug, G.O., Upadhyay, P., *Study of combined effect of sand erosion and cavitation in hydraulic turbines*, Int. Conference on Small Hydropower - Hydro Sri Lanka, 22-24 October 2007.
- [13] Robescu, D., Naianu, B.P., *Pompe, ventilatoare, suflante și compresoare*, Editura AISTEDA, 2002.
- [14] Mânzână, M.-E., *Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație-eroziune la diferite materiale metalice*, teză doctorat, IOSUD-UPB, 2012.
- [15] Matsumura, M., Chen, B.E., *Erosion-resistant materials*, Book series on Hydraulic machinery, Vol. 2, edited by Duan C. G. and Karelin V. Y., 2002.
- [16] Trusculescu, M., Pădurean, I., Demian, G., *The cavitation erosion resistance of the martensitic stainless steel GX4CrNi13-4 laser hardened*. Romanian Journal of Technical Sciences - Applied Mechanics, 2007. Vol.52: p. 65-70.

Drd. Ing. Elena Crina CRÂNGAȘU
Universitatea Politehnică București, Facultatea de Energetică,
Școala Doctorală
e-mail: crangasuelenacrina@gmail.com

Prof. Dr. Ing. Brânsușa GHIBAN
Departamentul Știința Materialelor și Metalurgie Fizică,
Universitatea Politehnică București,
e-mail: ghibanbrandusa@yahoo.com, brandusa.ghibana@upb.ro

Prof.Dr.Ing. Carmen Anca SAFTA
Departamentul de Hidraulică, Mașini Hidraulice și Ingineria Mediului,
Universitatea Politehnică București,
e-mail: safta.carmenanca@gmail.com