

***Cercetarea rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje cu bază de
aluminiu cu tratamen termic de îmbătrânire artificială***

Teză de doctorat – Rezumat
pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

autor ing. Alexandru-Nicolae LUCA

Conducători științifici: Prof.univ.dr.ing. **Iare BORDEAȘU**
Prof.univ.dr.ing **Brândușa GHIBAN**

Timișoara

Luna Mai, Anul 2024

CUPRINS

(extras)

Introducere

Cap.1 Stadiul actual al cercetărilor și aplicațiilor aluminiului și aliajelor sale

- 1.1 *Scurt istoric privind aluminiul și aplicațiile sale*
- 1.2 *Calitățile aplicative ale aliajelor de aluminiu. Tipuri de aliaje*
- 1.3 *Stadiul actual al cercetărilor privind comportarea la cavitație a aluminiului și aliajelor sale*
- 1.4 *Concluzii*
- 1.5 *Obiectivele și noutatea tezei*

Cap.2 Materialele cercetate

- 2.1 *Aliajul 7075 stare T651*
- 2.2 *Aliajul 6082 stare T651*
- 2.3 *Aliajul 2017A stare 451*
- 2.4 *Mecanisme de durificare a aliajelor cercetate*
- 2.5 *Fenomenul de îmbătrânire în aliajele de aluminiu*
- 2.6 *Concluzii*

Cap.3 Aparatura de laborator. Metoda de testare la cavitație. Procedura de prelucrare și interpretare a rezultatelor experimentale

- 3.1 *Aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice*
- 3.2 *Metoda de testare*
- 3.3 *Procedura de prelucrare a datelor. Interpretarea lor*
- 3.4 *Echipamente pentru tratamente termice, durificare superficială și analiză structurală*
 - 3.4.1 *Cuptorul pentru tratament termic*
 - 3.4.2 *Microscopie optice și electronice*
 - 3.4.3 *Echipamente pentru determinarea caracteristicilor mecanice*
- 3.5 *Concluzii*

Cap.4 Cercetarea rezistenței la cavitație a aliajului 7075.

- 4.1 *Testarea la cavitație a aliajului în stare livrată (proba martor)*
 - 4.1.1 *Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației*
 - 4.1.2 *Evoluția degradării structurii suprafeței*
 - 4.1.3 *Morfologia degradării structurale*
 - 4.1.4 *Concluzii*
- 4.2 *Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/o oră)*
 - 4.2.1 *Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației*
 - 4.2.2 *Evoluția degradării structurii suprafeței*
 - 4.2.3 *Morfologia degradării structurale*
 - 4.2.4 *Concluzii*
- 4.3 *Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/12 ore)*
 - 4.3.1 *Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației*
 - 4.3.2 *Evoluția degradării structurii suprafeței*
 - 4.3.3 *Morfologia degradării structurale*
 - 4.3.4 *Concluzii*
- 4.4 *Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/24 ore)*
 - 4.4.1 *Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației*
 - 4.4.2 *Evoluția degradării structurii suprafeței*
 - 4.4.3 *Morfologia degradării structurale*
 - 4.4.4 *Concluzii*
- 4.5 *Compararea rezultatelor*
- 4.6 *Concluzii de capitol*

Cap.5 Cercetarea rezistenței la cavitație a aliajului 6082

- 5.1 *Testarea la cavitație a aliajului în stare livrată (proba martor)*
 - 5.1.1 *Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației*
 - 5.1.2 *Evoluția degradării structurii suprafeței*
 - 5.1.3 *Morfologia degradării structurale*
 - 5.1.4 *Concluzii*

5.2	<i>Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/o oră)</i>
5.2.1	<i>Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i>
5.2.2	<i>Evoluția degradării structurii suprafeței</i>
5.2.3	<i>Morfologia degradării structurale</i>
5.2.4	<i>Concluzii</i>
5.3	<i>Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/12 ore)</i>
5.3.1	<i>Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i>
5.3.2	<i>Evoluția degradării structurii suprafeței</i>
5.3.3	<i>Morfologia degradării structurale</i>
5.3.4	<i>Concluzii</i>
5.4	<i>Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/24 ore)</i>
5.4.1	<i>Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i>
5.4.2	<i>Evoluția degradării structurii suprafeței</i>
5.4.3	<i>Morfologia degradării structurale</i>
5.4.4	<i>Concluzii</i>
5.5	<i>Compararea rezultatelor</i>
5.6	<i>Concluzii de capitol</i>
Cap.6	Cercetarea rezistenței la cavitație a aliajului 2017A
6.1	<i>Testarea la cavitație a aliajului în stare livrată (proba martor)</i>
6.1.1	<i>Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i>
6.1.2	<i>Evoluția degradării structurii suprafeței</i>
6.1.3	<i>Morfologia degradării structurale</i>
6.1.4	<i>Concluzii</i>
6.2	<i>Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/o oră)</i>
6.2.1	<i>Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i>
6.2.2	<i>Evoluția degradării structurii suprafeței</i>
6.2.3	<i>Morfologia degradării structurale</i>
6.2.4	<i>Concluzii</i>
6.3	<i>Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/12 ore)</i>
6.3.1	<i>Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i>
6.3.2	<i>Evoluția degradării structurii suprafeței</i>
6.3.3	<i>Morfologia degradării structurale</i>
6.3.4	<i>Concluzii</i>
6.4	<i>Testarea la cavitație a aliajului cu tratament termic de îmbătrânire artificială (proba 180/24 ore)</i>
6.4.1	<i>Diagrame și parametrii specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i>
6.4.2	<i>Evoluția degradării structurii suprafeței</i>
6.4.3	<i>Morfologia degradării structurale</i>
6.4.4	<i>Concluzii</i>
6.5	<i>Compararea rezultatelor</i>
6.6	<i>Concluzii de capitol</i>
Cap.7	Compararea rezultatelor cercetării
7.1	<i>Corelarea proprietăților mecanice cu rezistența la cavitație</i>
7.2	<i>Histogramele comparării valorilor parametrilor de referință</i>
7.3	<i>Concluzii</i>
Cap.8	Concluzii generale. Sinteza contribuțiilor principale. Direcții viitoare de cercetare
8.1	<i>Concluzii generale</i>
8.2	<i>Sinteza contribuțiilor principale</i>
8.3	<i>Direcții viitoare de cercetare</i>
	BIBLIOGRAFIE

Introducere

Eroziunea cavitațională reprezintă unul dintre cele trei efecte cunoscute ale cavitației, datorată impactului suprafeței cu undele de șoc și microjeturile generate de implozia rapidă a bulelor umplute cu gaze și/sau vapori la presiuni mari, formate prin mecanismul de apariție și dezvoltare la scăderea presiunii statice sub cea de vaporizare. Acest fenomen de eroziune determină modificări ale geometriei și structurii suprafețelor, conducând la scoaterea din funcțiune a echipamentului pe durata reparațiilor, sau prin schimbarea totală sau parțială a componentelor deteriorate.

Printre zonele, în care rezistența la eroziunea cavitațională este amplu studiată, se află cel al elicelor navelor maritime sau fluviale și al rotoarelor de mașini hidraulice. Prin înțelegerea modului de funcționare a echipamentelor, precum și a mecanismelor de evoluție și dezvoltare a cavitației, se pot concepe soluții inovatoare privind reducerea intensității distructive a cavitației, în vederea optimizării performanței și creșterea duratei de viață a acestor echipamente.

Dezvoltarea echipamentelor ce lucrează în cavitație, de diverse intensități distructive, a determinat, pe plan mondial, o profundă cercetare a cauzelor, cu scop de creare material, sau structuri, care să reziste cât mai mult la efectul eroziv al cavitației. Cunoscute pentru amplele studii de comportare și rezistență la cavitație sunt laboratoarele din SUA, China, Franța, Anglia, India, Polonia, Japonia,

În România, cele mai cunoscut laborator de studiere/cercetare a eroziunii prin cavitație este Laboratorul de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație din Universitatea Politehnica Timișoara, ce are o activitate de cercetare de peste 60 de ani. Prin scop și obiective, teza de doctorat pune în evidență comportarea și rezistența la cavitație a trei aliaje cu bază de aluminiu (7075, 2017A și 6082) în stări livrate și stări rezultate în urma aplicării tratamentelor termice volumice de îmbătrânire artificială la temperatura de 180°C, cu trei durate de menținere (o oră, 12 ore și 24 ore). Conținutul tezei, este structurat pe 8 capitole astfel: primul este destinat prezentării, succinte, a stadiului domeniilor de folosire a aliajelor cu bază de aluminiu; cel de-al doilea este destinat prezentării celor trei aliaje cu bază de aluminiu, cel de-al treilea este destinat prezentării procedurilor de cercetare și a aparatelor utilizate. Următoarele trei capitole sunt destinate prezentării rezultatelor cercetărilor experimentale, analizate pe baza curbilor și parametrilor specifici comportării și rezistenței la cavitația vibratoare (conform prevederilor ASTM G32-2016 și cutumei laboratorului) și a imaginilor macro și microscopice ale suprafețelor degradate. Capitolul 7 este destinat evaluării rezistenței la cavitație prin corelarea acesteia cu proprietățile mecanice ale stărilor materialelor cercetate. Ultimul capitol este destinat sintezei concluziilor generale, a contribuțiilor personale cât și a descrierii direcțiilor viitoare de cercetare.

Rezultatele din prezenta teză sunt o continuare a celor realizate în Laboratorul de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație din Universitatea Politehnica Timișoara, sunt pe valul actualelor cercetări privind crearea de structuri de aliaje de aluminiu ce pot satisface cerințele funcționării în condiții de cavitație cu intensitate slabă și medie și constituie bază pentru viitoare cercetări, pe alte categorii de aliaje ale aluminiului.

Cap.1 Stadiul actual al cercetărilor și aplicațiilor aluminiului și aliajelor sale

Aluminiul și aliajele pe bază de aluminiu sunt printre cele mai importante și des întâlnite materiale de inginerie, cu un spectru larg de aplicații. Această superioritate practică provine din capacitatea intrinsecă a aliajelor pe bază de aluminiu pentru combinația dorită de proprietăți fizico-mecanice [113]. Acestea beneficiază de o rezistență superioară la coroziune, de o prelucrabilitate excelentă, de un raport ridicat rezistență-densitate și de conductivități electrice și termice adecvate. Aceste proprietăți superioare fac ca această clasă de aliaje metalice să fie adecvată pentru fabricarea componentelor structurale și industriale, cum ar fi piesele auto (pistoane, cutii de direcție, blocuri de motoare și roți) și echipamente militare.

Deși folosirea aluminiului și a aliajelor sale este veche, cunoașterea comportamentului și rezistenței lor la eroziunea cavitației, care să le facă utilizabile pentru piese de tip elice de bărci/vapoare, componente de supape sau carcase și rotoare de pompe, a început mult mai târziu.

Din documentarea realizată se constată că primele studii de rezistență la eroziunea cavitației sunt realizate pe aluminiu cu o puritate de 99 %, sau aliaje cu bază de aluminiu slab aliate, efectuate în tunelul hidrodinamic de tip Knapp, unde intensitatea distructivă a cavitației este cea mai mică dintre cele trei aparate (tunel cu cameră de lucru strangulată, disc rotitor și aparat vibrator) [1-3, 25, 24, 53, 54, 68, 69]. Pentru a pune în evidență sefectul structurii și al proprietăților mecanice ale aliajelor de aluminiu, la început Hobbs [68], apoi Hammitt [181], respectiv Hammitt & colaboratorii [185] derulează studii pe aliajele de aluminiu 1100-0 și 2024-T4 în tunel hidrodinamic și aparat vibrator și arată dependența valorii maxime a vitezei medii de pătrundere a eroziunii $MDPR_{max}$ (notație în prezenta teză cu $MDER_{max}$), definită de curba de mediere a valorilor experimentale de reziliență finală (UR) și de duritatea Brinnell, stabilind forme analitice de tipul:

$$1/MDPR \approx C1 \cdot UR^n \quad \text{sau} \quad 1/MDPR \approx C2 \cdot HB^n \quad (1.1)$$

Unde:

$n = 0.7...0.98$ - funcție de tipul materialului

$C1, C2 = 0.8...1.8$ -- funcție de tipul și materialului și duritatea suprafeței

$UR = (R_m - \text{rezistența mecanică la rupere și } E - \text{modulul de elasticitate longitudinal})$

Evident, există foarte multe forme de corelare între proprietățile fizico-mecanice ale materialelor și parametrii eroziunii cavitației, dependente de aparatul/standul în care s-a realizat procesul de eroziune. Însă, niciuna dintre relații nu dă o precizie a rezistenței la cavitație, cu foarte ridicat grad de încredere. Din acest considerent, scopul acestei lucrări este de a dovedi necesitatea aplicării regimurilor de tratament termic de îmbunătățire artificială la aliajele de aluminiu, în vederea extinderii utilizării lor la fabricarea de piese ce lucrează în diverse regimuri de cavitație (cilindri și pistoane de motoare termice, elice de bărci, rotoare de pompe, etc).

Ca urmare a efectului elementelor de aliere și a celui adus de metodele tradiționale de îmbunătățire a proprietăților mecanice, prin modificările microstructurale, aliajele de aluminiu au început să fie tot mai intens cercetate din punct de vedere al sporirii rezistenței la eroziunea prin cavitație. Motivul firesc este de extindere a utilizării lor și la piese ce lucrează în condiții hidrodinamice cavitaționale, cum sunt: supapele, pistoanele și cilindrii motoarelor termice, rotoare de pompe, elice de vapoare, ogive de avioane, și nu numai.

Analizele acestor rotoare și elice, după anumite durate de exploatare, arată zone afectate de eroziunea cavitației, fig. 1.1, fapt ce a determinat, în ultimii 30 ani, amplificarea studierii rezistenței structurii aliajelor cu bază de aluminiu existente, simultan cu utilizarea de tehnologii care să conducă la modificări de structură și proprietăți cu care rezistența la eroziunea cavitației să fie sporită.



a)

b)

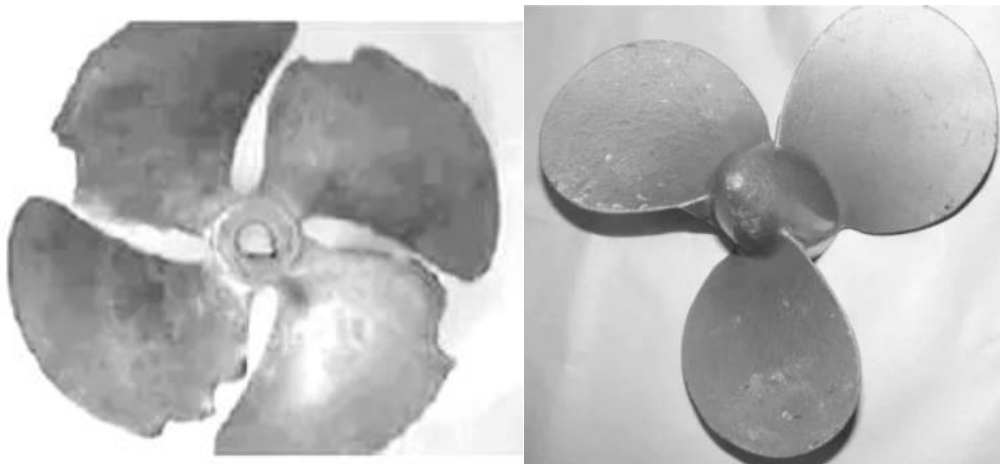
a) rotoare ale pompelor de uz gospodăresc: a) rotor turnat din aliaj de aluminiu, b) rotor distrus de cavitație



c)

d)

c, d) rotor afectat de eroziunea prin cavitație (componentă a pompei de răcire a motorului autocarului Mercedes-furnizat de firma SC. DUCODAN SRL)



e) elice de barcă cu motor afectată de eroziunea cavitației

Fig.1.1 Eroziuni ale cavitației la rotoare și elice fabricate din aliaje cu bază de aluminiu

Așadar, efectul eroziv produs de undele de șoc și microjeturile generate prin mecanismul hidrodinamic la cavitației asupra structurilor diverselor aliaje de aluminiu a devenit obiect de cercetare științifică și se constată preocuparea constructorilor în folosirea acestora la piese solicitate hidrodinamic, dincolo de cel folosit ca structuri

de rezistență pentru domeniul automotiv, naval, aviatic, sportiv sau militar.

Pentru îmbunătățirea comportării la eroziunea cavitației, cu creșterea rezistenței acestor aliaje ale aluminiului, este absolut necesară aplicarea tehnologiilor adecvate care să contribuie la obținerea unor structuri și proprietăți fizico-mecanice favorabile. Printre acestea, continuă a fi preferate tratamentele termice volumice, cum sunt cele de îmbătrânire artificială.

Obiectivele tezei

Obiectivele tezei de doctorat sunt:

- cercetarea comportamentului și rezistenței la cavitație vibratoare a aliajelor cu bază de aluminiu 7075 stare T651, 6082 stare T651 și 2017A stare 451, cu destinație în fabricarea pieselor de lucru în cavitație precum: palele elicelor de barci cu motor și veliere, rotoarelor pompelor din sistemul de răcire al motoarelor termice și folosite pentru uzul gospodăresc;
- aprofundarea mecanismului de degradare prin eroziunea cavitației, produsă structurii suprafețelor celor trei aliaje de aluminiu pentru patru stări: starea de livrare (semifabricat laminat-denumită martor), stări rezultate prin tratamentul termic volumic de îmbătrânire artificială la 180 °C, cu trei durate de menținere (o oră, 12 ore, 24 ore);
- investigarea morfologiei și mecanismului generării și propagării fisurilor, ruperilor, cavernelor, precum și caracterizarea macro și microstructurală a structurii suprafețelor;
- evaluarea rezultatelor obținute, pe baza metodei comparative, cu rezultate similare obținute și pe alte mărci și stări de aliaj de aluminiu, folosind curbele și parametrii specifici recomandați de normele ASTM G32-2016 și folosiți în cutuma Laboratorului de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație al Universității Politehnica Timișoara.

Noutatea tezei de doctorat

Noutatea tezei de doctorat constă în extinderea utilizării aliajelor de aluminiu 7075, 6082 și 2017A la fabricare de piese ce lucrează în cavitație cu intensitatea distructivă moderată, specifică elicelor bărcilor cu motor și ale velierelor și rotoarelor de pompe din sistemul de răcire al motoarelor termice. Pentru aceasta se urmărește efectul regimului de tratament termic de îmbătrânire artificială asupra comportării și rezistenței structurii celor trei aliaje la solicitările ciclice ale undelor de șoc și microjeturilor rezultate din implozia norului de bule cavitaționale, ca urmare a modificării valorilor proprietăților mecanice, a dispersiei compușilor fragili intermetalici și a gradului de finețe microstructurală.

Cap.2 Materialele cercetate

În cercetarea care face obiectivul acestei teze s-au folosit trei categorii de aliaje de aluminiu durificabile prin precipitare: aliaj 2017 A stare 451, aliaj 6082 stare T651 și aliaj tip 7075 stare T651, toate prelevate din semifabricate laminate de la S.C. ALRO S.A. Probele pentru testele de cavitație au fost permise de la Universitatea Națională de Științe Inginerești Politehnica din București- Laboratorul de Știința Materialelor Metalice și Metalurgie Fizică al Centrului de Expertizare Materiale Speciale (CEMS). Din fiecare tip de aliaj au fost testate la cavitație vibratoare probe prelevate direct din starea de *semifabricat laminat, probe supuse tratamentului termic de îmbătrânire artificială la 180 °C cu trei durate de menținere (o oră, 12 ore și 24 ore) după tratamentele aferente de călire pentru punere în soluție*. Pentru facilitarea discuțiilor, pe seama comportării și rezistenței structurii suprafeței solicitate de cavitația vibratoare, pentru identificarea probelor experimentale a fost utilizată o simbolizare, așa cum este indicată în tabelul 2.1, fără a se mai folosi denumirile stărilor.

Compoziția chimică a celor trei aliaje este dată în tabelul 2.2, comparativ cu cea prevăzută în standardul aferent, iar proprietățile mecanice, determinate în laboratorul CEMS, sunt afișate în tabelul 2.3. Datele din tabelul 2.2 arată că aliajele selectate pentru experimentări au compoziția chimică corespunzătoare, încadrându-se în prescripțiile de marcă.

Tabelul 2.1 Simbolizarea probelor experimentale

Serie/ Aliaj	Cod probă	Tratament de călire de punere în soluție și/sau îmbătrânire artificială (T6)
	MARTOR	Proba martor - Laminat
7075	180/1h	Laminat și îmbătrânit la 180°C/1h/aer
	180/12h	Laminat și îmbătrânit la 180°C/12/aer
	180/24h	Laminat și îmbătrânit la 180°C/24h/aer

6082	MARTOR	Proba martor - Laminat
	180/1h	Laminat t și îmbătrânit la 180°C/1h/aer
	180/12h	Laminat și îmbătrânit la 180°C/12/aer
2017A	MARTOR	Proba martor - Laminat
	180/1h	Laminat și îmbătrânit la 180°C/1h/aer
	180/12h	Laminat și îmbătrânit la 180°C/12/aer
	180/24h	Laminat și îmbătrânit la 180°C/24h/aer

Tabelul 2.2 Compoziția chimică a probelor experimentale

Aliaj	Compoziția chimică, %gr										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Pb	Al
Experimental 7075	0.68	0.107	1.58	0.076	2.05	0.19	5.76	0.2	0.023	0.15	Rest
EN AW-7075	≤0.4	≤0.5	1,2-2,0	≤0.3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	≤0.2	-	-	Rest
Experimental 6082	0,85	-	-	0,57	0,67	-	-	-	-	-	Rest
EN AW-6082	≤1	-	-	≤0,65	≤0,85	-	-	-	-	-	Rest
Experimental 2017A	0,35	0,002	4,1	0,65	0,56	-	-	-	-	-	Rest
EN AW-2017	≤0,5	-	≤4	≤0,7	≤0,6	-	-	-	-	-	Rest

Tabelul 2.3 Valorile caracteristicilor mecanice ale epruvetelor experimentale

Aliaj	Stare	Caracteristici mecanice				
		R _m MPa	R _{p0.2} MPa	A ₅ %	HB daN/cm ²	KCU J/cm ²
7075	ISO EN AW7075	410-530	300-460	2-6	119-160	10
	Martor	531,841	424,82	6	140	12,8
	Imbătrânire la 180°C/1h	549,549	410,55	5	157	14,1
	Imbătrânire la 180°C/12h	339,459	203,66	5	91,3	7,8
	Imbătrânire la 180°C/24h	570,921	417,51	4,5	140	12,7
6082	ISO EN AW 6082	295 – 310	240 – 260	7 – 10	89 – 94	
	Martor (stare T651)	226,05	161,71	13,58	67,00	25,9
	Imbătrânire la 180°C/1h	328,98	155,21	11,88	67,00	8
	Imbătrânire la 180°C/12h	249,81	181,87	20,37	67,00	24
	Imbătrânire la 180°C/24h	406,52	331,97	16,04	81,30	16,3
2017 A	ISO EN AW 2017	360-390	240-260	10-12	105-110	
	Martor (stare T451)	291,16	225,01	19,43	121,0	29,10
	Imbătrânire la 180°C/1h	274,22	126,4	24,26	84,90	25,3
	Imbătrânire la 180°C/12h	281,11	135,68	14,49	80,00	14,3
	Imbătrânire la 180°C/24h	281,11	140,09	12,58	74,90	14,5

Tratamentele termice au fost efectuate într-un cuptor Nabetherm, în cadrul Laboratorului de Știința Materialelor Metalice și Metalurgie Fizică al Universității Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București. Pentru fiecare tip de tratament termic au fost efectuate șase teste pentru a determina proprietățile mecanice: rezistență mecanică la rupere (R_m), limita de curgere (R_{p0.2}), alungirea (A₅), tenacitatea/reziliența (KCU), duritatea Brinnell (HB)/microduritatea HV_{0.5}.

Determinarea caracteristicilor mecanice ale probelor experimentale supuse diferitelor tratamente termice de îmbătrânire a fost efectuată pe o mașină de testare universală Walter + Bai AD Elveția model LFV 300. Rezistența la impact a fost realizată determinând valorile KCU pe ciocanul Pendulum Charpy tip Walter Bai cu 300J.

Analiza structurală microscopică a fost efectuată pe un stereomicroscop OLYMPUS SZX, echipat cu software QuickMicroPhoto 2,2, iar analiza metalografică microscopică pe microscopul optic REICHERT Univar echipat cu software Image Pro Plus,

Analiza de microscopie electronică cu baleiaj a fost efectuată pe un microscop electronic cu scanare, cel mai utilizat fiind modelul Thermophischer Quattro S.

Cap.3

Aparatura de laborator. Metoda de testare la cavitație. Procedura de prelucrare și interpretare a rezultatelor experimentale

Programul experimental de testare la cavitație, a rezistenței structurii, s-a derulat în Laboratorul de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara, pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice (fig.3.1) . [12, 15, 59, 122, 125, 192].

Parametrii funcționali ai aparatului vibrator, care determină hidrodinamica cavitației, respectiv intensitatea de distrugere, au fost riguros controlați printr-un soft special implementat în calculatorul legat la aparatul vibrator [121, 122,165]. Valorile acestora, conform normelor ASTM G32, sunt:

- Amplitudinea dublă a vibrațiilor = 50 μm
- Frecvența vibrațiilor = 20000 ± 1 % Hz
- Puterea generatorului electric de ultrasunete = 500 W
- Mediul lichid = apă dublu distilată
- Temperatura lichidului = 22 ± 1 °C

Precizare: deoarece construirea sistemului mecanic vibrator este pentru METODA DIRECTĂ DE TESTARE (cu probă vibratoare prinsă în sistemul mecanic), pentru probe metalice și nemetalice cu diametrul de 15.8 mm și lungime de 18 mm și cu mase de 16..17.5 g. Pentru generarea eroziunii prin cavitația vibratoare, la probele de din aliaje ușoare, cum sunt ale aluminiului, datorită masei foarte scăzute, chiar dacă proba respectă dimensiunile geometrice necesare, s-a utilizat METODA INDIRECTĂ DE TESTARE (metoda cu probă staționară). În acest sens s-a construit un sistem special de fixare a probei, așa cum se poate observa în fig. 3.1 b.

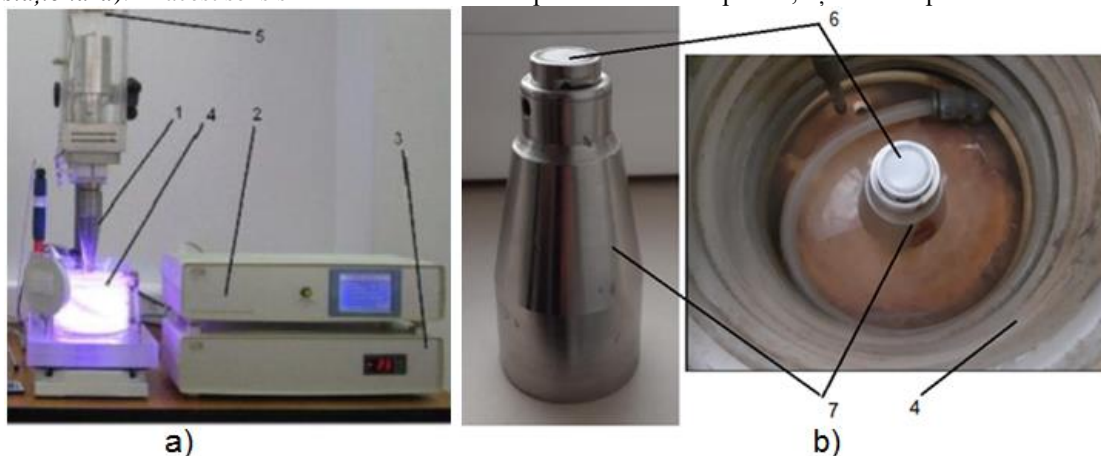


Fig.3.1 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice

a) aparatul vibrator; b) dispozitiv fixare probă pentru testare prin metoda indirectă

- 1- sonotroda; 2- generatorul electronic de ultrasunete; 3- dispozitiv electronic pentru reglarea temperaturii apei; 4- vasul cu lichid și serpentina de răcire; 5- transductorul piezoceramic de 20 KHz și 500 W; 6- proba pentru testare la cavitație (d= 15.8 mm, lungime = 18 mm); 7- dispozitiv fixare probă pentru realizarea testului experimental

Pentru urmărirea și analiza comportării structurilor la atacurile cavitației sunt construite diagrame specifice, ce conțin valorile experimentale ale masei erodate cumulate M_i și ale vitezei medii de pătrundere a eroziunii v_i , precum variațiile curbelor de mediere $M(t)$ și $v(t)$ ale acestor valori. Relațiile folosite au formele de mai jos:

- pentru masa erodată cumulată:

$$M_i = \sum_{i=1}^{i=13} \Delta m_i \quad [\text{mg}] \quad (3.1)$$

- pentru curba analitică de mediere valorilor experimentale ale masei erodate cumulate [12]

$$M(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \quad \text{sau} \quad M(t) = A \cdot t \cdot (1 + e^{-B \cdot t}) \quad (3.2)$$

- pentru viteza medie de eroziune:

$$v_i = \Delta m_i / \Delta t_i \quad [\text{mg/min}] \quad (3.3)$$

- pentru curba analitică de mediere a valorilor experimentale obținute pentru vitezele medie de eroziune [12]

$$v(t) = A \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-B \cdot t} \quad (3.4)$$

unde:

pentru $i = 1, \Delta t_i = 0, M_i = 0$

i - reprezintă numărul perioadei de testare;

Δm_i - este masa de material pierdută prin eroziune în perioada i , în grame

Δt_i - durata perioadei intermediare "i" a cavitației (de 5, 10 și 15), în minute;

A - este parametrul de scară, stabilit statistic pe baza valorilor experimentale, pentru construirea curbei de aproximație/mediere a acestora, cu condiția ca abaterea lor față de aceasta să fie minime;

B - este parametrul de formă al curbei, stabilit statistic pe baza valorilor experimentale.

Valorile parametrilor **A** și **B** s-au obținut în programul Matchad, după un model construit în Laboratorul de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație [12].

Deoarece cavitația, ca fenomen hidrodinamic, al cărui efect distructiv, prin eroziunea cavitației, este puternic dependent de microstructură (cu constituienți, faze, defecte, compuși intermetalici, etc), proprietățile fizico-mecanice ale materialului și de valorile parametrilor aparatului care determină hidrodinamica cavitației vibratoare, în diagramele ce exprimă variațiile adâncimilor medii de eroziune, este dată o legendă cu valorile abaterii medii standard ce intervine în relațiile granițelor superioară (S) și inferioară (I) a domeniului de dispersie a valorilor experimentale (numit în statistică ca fiind gradul de precizie sau intervalul de toleranță), care arată acuratețea derulării experimentului. Pentru un proces hidrodinamic, de complexitatea cavitației, datele oferite de literatura de specialitate [1-3, 12, 52, 54] arată că valorile intervalului de toleranță, pentru un test corect condus cu parametrii regimului hidrodinamic riguros controlați, poate avea valori de până la 90 % (eroare de aproximare de ± 10 %).

Relațiile folosite la determinarea abaterii medii standard σ și a granițelor S și I, conform literaturii [12, 77], au formele:

- pentru abaterea medie standard:

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=0}^{13} (M_i - M(t_i))^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad n=13 \quad (3.5)$$

- pentru intervalul de toleranță 99%:

$$S99(t) = M(t) + 1 \cdot \sigma; \quad I99(t) = M(t) - 1 \cdot \sigma \quad (3.6)$$

- pentru intervalul de toleranță 90%:

$$S90(t) = M(t) + 10 \cdot \sigma; \quad I90(t) = M(t) - 10 \cdot \sigma \quad (3.7)$$

De asemenea, pentru aprecierea rezistenței structurii, în diverse momente ale cavitației, prin deformațiile și cavernele produse, sunt folosite imaginile fotografice ale suprafeței erodate, realizate cu aparatul **Canon Power Shot A 480**, precum și cele obținute cu ajutorul microscopelor optice și electronice.

Tratamentele **termice de îmbătrânire artificială la 180 °C** (aplicate după cele de călire pentru punere în soluție) s-au realizat la Universitatea Politehnică din București, Facultatea Știința și Ingineria Materialelor, conform ciclogramei fig. 3.2 utilizandu-se cuptorul de tratament termic de tip Etuva Thermo SCIENTIFIC-THERMOLYNE.

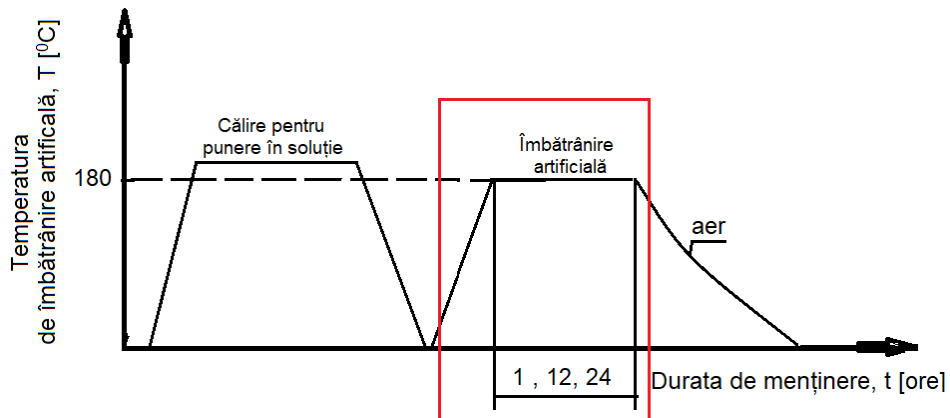


Fig. 3.2 Ciclograma tratamentului termic de îmbătrânire artificială

Analiza structurală macroscopică a fost efectuată pe un stereomicroscop OLYMPUS SYX57 echipat cu software QuickMicroPhoto 2,2, dotat cu o varietate de oculare, obiective și tehnici de iluminat, ce permit zoom-uri mari, funcție de scopul investigării. Pentru analiza metalografică microscopică s-a folosit microscopul optic de tip REICHERT UnivaR echipat cu software Image Pro Plus.

Cap.4 Cercetarea rezistenței la cavitație a aliajului 7075

Rezultatele testului de rezistență și comportare la eroziunea cavitației vibratoare, a structurilor acestui aliaj, în stare laminată (de semifabricat) și în stările rezultate după tratamentul termic de îmbătrânire artificială la 180 °C cu trei durate (o ora, 12 ore și 24 ore), sunt redată prin diagramele specifice, imaginile fotografice și microscopice.

Determinarea valorilor experimentale ale masei erodate cumulate M_i și ale vitezelor de eroziune v_i s-a realizat cu relațiile (3.1) și (3.4) pe baza pierderilor de masă (Δm_i), iar curbele analitice de mediere $M(t)$ și $v(t)$ au fost construite cu relațiile (3.2) și (3.3).

Compararea rezultatelor

Pentru determinarea diferențelor de rezistență la cavitație dintre cele 4 stări, ca urmare a valorilor proprietăților mecanice și microstructurilor, s-a construit histograma din fig.4.1.

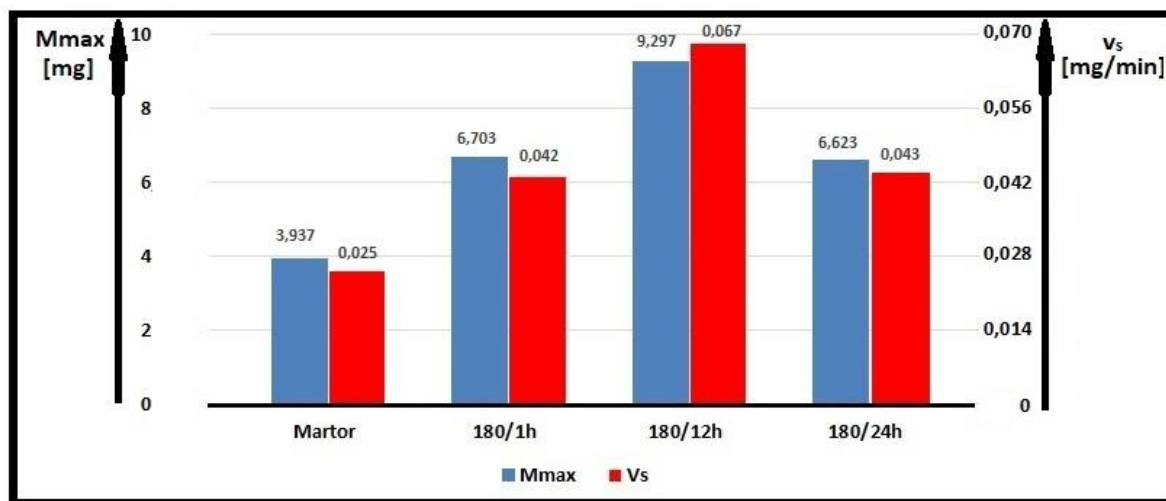


Fig.4.1 Histograma comparării rezistenței la eroziunea prin cavitație vibratoare (7075)

Din punct de vedere al rezistenței structurii la eroziunea cavitației vibratoare, datele din histogramă arată că cea mai mare rezistență este cea conferită de proba Martor, prelevată direct din semifabricatul în stare de livrare de tip laminat.

Tratamentele termice 180/1h și 180/24h au condus la structuri cu rezistențe la eroziunea prin cavitație de același ordin, diferențele dintre valorile parametrilor M_{max} și v_s fiind ne semnificative, datorită diferențelor mici dintre valorile proprietăților mecanice (R_m și $R_{p0.2}$), precum și reducerii efectului durității mai mari a aliajului cu tratament 180/1h ($HB = 157$) comparativ cu cea obținută prin tratamentul 180/12h ($HB = 140$), de către nivelul mai ridicat al rezilienței ($KCU = 14.1 \text{ J/cm}^2$ pentru tratamentul 180/1h, față de $KCU = 12.9 \text{ J/cm}^2$ pentru tratamentul 180/12h).

Concluzii de capitol

1. Imaginile fotografice, microscopice și valorile parametrilor de referință (M_{max} și v_s) arată că cea mai mare rezistență la solicitările ciclice ale cavitației vibratoare o are structura aliajului MARTOR (semifabricat laminat-fără tratament termic), iar cea mai slabă este cea a structurii rezultate prin tratamentul cu durată de 12 ore;

2. Faptul că structurile celor trei tratamente au condus la proprietăți mecanice cu valori diferite și la comportări/rezistențe diferite justifică importanța tratamentului termic volumic de îmbătrânire artificială la 180 °C, ca soluție tehnologică pentru aplicare la piese fabricate din aliaj de aluminiu 7075 ce lucrează în regim de cavitație, cum sunt elicele de bărci/vapoare, rotoarele de pompe de uz gospodăresc

3. Imaginile obținute cu microscopice optice, stereo și electronice cu baleiaj arată caverne de diverse dimensiuni, create prin ruperi din materialul de bază și prin expulzări ale compușilor intermetalici, care confirmă diferențele de rezistență a structurii la solicitările ciclice ale microjeturilor cavitaționale.

4. Evoluțiile exponențiale pe prima parte, cu tendința de liniarizare pe a doua parte a cavității, a curbelor mediere a rezultatelor $M(t)$ și de creștere spre o valoare de maxim, cu scădere spre valoarea de stabilizare, a curbelor $v(t)$ confirmă durificarea stratului sollicitat de undele de șoc și de microjeturile cavitaționale, precum și efectul amortizant creat de aerul/apa pătrunse în caverne în faza de comprimare a sistemului mecanic oscilator.

5. Acuratețea ridicată a derulării experimentului de testare la eroziunea prin cavitație vibratoare și a prelucrării rezultatelor, pentru toate cele 4 stări ale aliajului, este dovedită de valorile reduse la abaterii standard $\sigma = 0.176 \dots 0.251$ și ridicate ale intervalului de toleranță de 97 %.

Cap.5 Cercetarea rezistenței la cavitație a aliajului 6082

Rezultatele testului de rezistență și comportare la eroziunea cavitației vibratoare, a structurilor acestui aliaj, în stare laminată (de semifabricat) și în stările rezultate după tratamentul termic de îmbătrânire artificială la 180 °C cu trei durate (o ora, 12 ore și 24 ore), sunt redată prin diagramele specifice, imaginile fotografice și microscopice.

Pentru evidențierea diferențelor de rezistență la cavitație, între cele 4 stări, s-a construit histograma din fig.5.1.

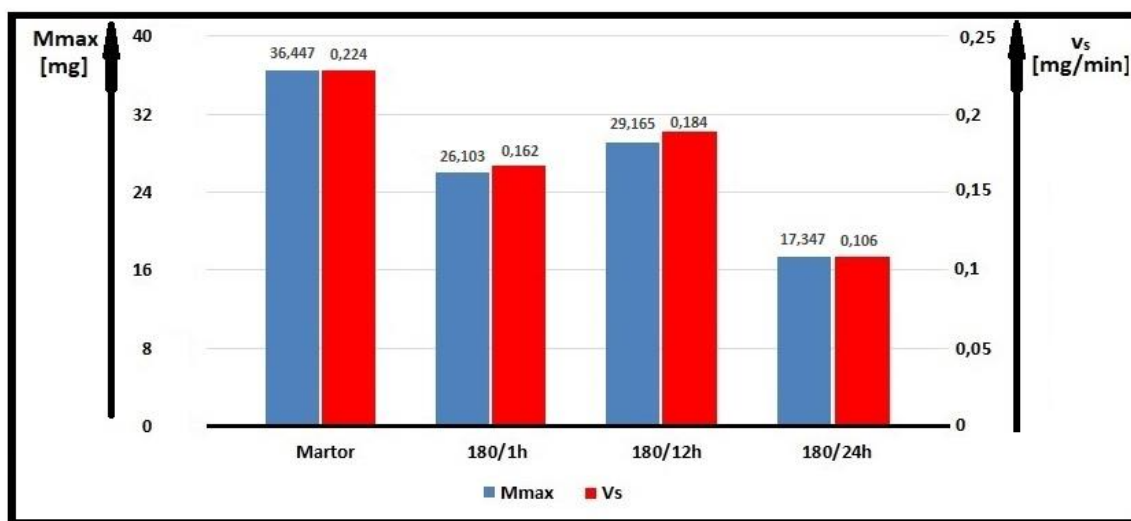


Fig.5.1 Histograma comparării rezistenței la eroziunea prin cavitație vibratoare

Din punct de vedere al rezistenței structurii la eroziunea cavitației vibratoare, datele din histogramă arată că cea mai mare rezistență este ce conferită de structura probei obținută prin regimul de tratament termic 180/24h, de îmbătrânire artificială la 180 °C cu durată de 24 ore, în primul rând datorită celor mai mari valori ale proprietăților de rezistență mecanică ($R_m = 406,52$ MPa, $R_{p0.2} = 331,97$ MPa, $HB = 81,30$ daN/cm²) care, după valorile parametrilor M_{max} și v_s , față de structura aliajului în stare de semifabricat (Martor) este mai mare de circa 2 ori, iar față de cea obținută prin tratamentul termic de îmbătrânire 180/1h este cu (50..52) % și față de obținută prin tratamentul termic de îmbătrânire 180/12h este mai mare cu (68...73)%.

Concluzii de capitol

1. Imaginile fotografice, microscopice și valorile parametrilor de referință (M_{max} și v_s) arată că cea mai mare rezistență la solicitările ciclice ale cavitației vibratoare o are structura aliajului supus tratamentului termic de îmbunătățire la 180 °C cu durată de 24 ore, datorită valorilor ridicate ale rezistenței mecanice la rupere R_m , limitei de curgere $R_{p0.2}$ și durității HB, iar cea mai slabă este cea a structurii probei martor (starea de semifabricat).

2. Imaginile obținute cu microscopul optic, stereo și electronic cu baleiaj arată caverne de diverse dimensiuni medii și mari, de tip gropi și șanțuri, create prin ruperi din materialul de bază și prin expulzări ale compușilor intermetalici, care confirmă diferențele de rezistență a structurii la solicitările ciclice ale microjeturilor cavitaționale.

3. creșterea rezistenței structurii la solicitările cavitației este puternic dependentă de valorile durității (HB), limitei de curgere ($R_{p0.2}$) și rezistenței mecanice la rupere (R_m)- în această ordine.

4. Acuratețea ridicată a derulării experimentului de testare la eroziunea prin cavitație vibratoare și a prelucrării rezultatelor, pentru toate cele 4 stări ale aliajului, este dovedită de valorile abaterii standard $\sigma = 1.093 \dots 2.215$ și ridicate ale intervalului de toleranță de 98 %.

Cap.6 Cercetarea rezistenței la cavitație a aliajului 2017 A

Rezultatele cercetării sunt prezentate prin valori experimentale, curbe analitice de aproximare a acestor valori, imagini fotografice de la cele mai sugestive durate de cavitație și imagini microscopice ale structurii erodate.

Determinarea valorilor experimentale ale masei erodate cumulate M_i și ale vitezelor de eroziune v_i s-a realizat cu relațiile (3.1) și (3.4) pe baza pierderilor de masă (Δm_i), iar curbele analitice de mediere $M(t)$ și $v(t)$ au fost construite cu relațiile (3.2) și (3.3).

Compararea rezultatelor

Evidențierea diferențelor de rezistență la cavitație dintre cele 4 stări este realizată prin compararea valorilor celor doi parametri caracteristici afișați în histograma din fig.6.1.

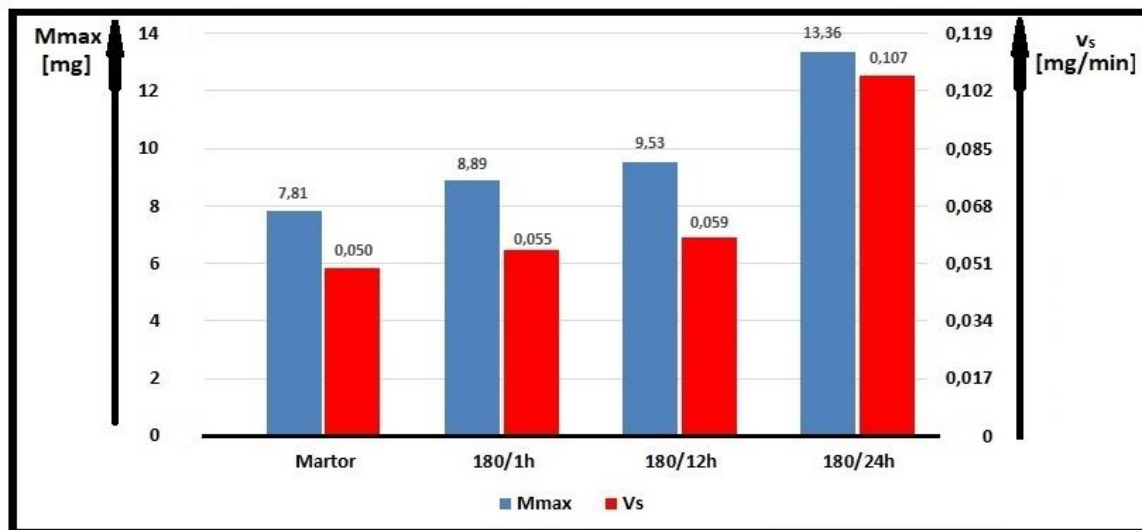


Fig. 6.1 Histograma comparării rezistenței la eroziunea prin cavitație vibratoare

Datele din histogramă, prin compararea valorilor celor doi parametri, arată că cea mai mare rezistență este cea conferită de structura probei martor, prelevată direct din starea de semifabricat laminat, iar cea mai slabă este cea a probei 180/24, pentru care durata de menținere la 180 °C a fost de 24 ore.

Concluzii de capitol

1. Imaginile fotografice, microscopice și datele cuprinse în diagramele specifice comportării și rezistenței la cavitație a structurilor probelor din aliaj 2017A, în 4 stări diferite (semifabricat laminat, cu tratamente de îmbătrânire artificială la 180 °C cu durate de menținere de o oră, 12 ore și 24 ore), arată că;

- cea mai mare rezistență la solcările ciclice ale cavitației vibratoare o are structura de semifabricat laminat (proba MARTOR), iar cea mai slabă este cea a structurii rezultate prin tratamentul 180/24h;
- structurile rezultate prin tratamentele termice cu durate de o oră (180/1h) și 12 ore (180/12h), au rezistențe la cavitație foarte apropiate, cu mici diferențe vizibile și prin microcavrențele formate și valorile parametrilor (M_{max} și v_s).

2. Cercetările efectuate pe aliajul 2017A trebuie să continue pentru alte valori ale duratei de menținere la temperatura de îmbătrânire de 180 °C până se obține o structură a cărei rezistență la cavitație să fie mai mare decât a semifabricatului (proba MARTOR).

3. Imaginile macro și microscopice arată efectul compușilor intermetalici fragili și al proprietăților mecanice (unele care ajută rezistența la cavitație (R_m , $R_{p0.2}$ și HB) și altele care scad rezistența la cavitație (A5 și KCU)), prin cavernele de diverse dimensiuni create prin smulgeri din materialul de bază și prin expulzări ale compușilor intermetalici.

4. Formele cavernelor de la microcratere la craverne, cu diverse forme și dimensiuni, sunt determinate de dimensiunile și formele geometrice ale compușilor intermetalici și ale grăunților metalului de bază.

5. Coroborat cu rezultate similare obținute în alte laboratoare, pe alte mărci de aliaj de aluminiu, rezultă că, în acest caz, creșterea rezistenței structurii la solcările cavitației este puternic dependentă de valorile durității (HB).

6. Evoluțiile exponențiale pe prima parte, cu tendința de liniarizare pe a doua parte a cavității, a curbelor mediere a rezultatelor $M(t)$ și de creștere spre o valoare de maxim a curbelor $v(t)$, cu scădere sau nu spre valoarea de stabilizare v_s , reconfirmă mecanismul mecanic de durificare și cel de amortizare al aerului și apei pătrunse în caverne.

7. Derularea corectă a programului de testare la cavitație, pe toate probele, indiferent de stare, precum acuratețea rezultatelor obținute, sunt dovedite de valorile reduse la abaterii standard $\sigma = 0.173...0.712$ și ridicate ale intervalului de toleranță de 97 %.

Cap. 7

Evaluarea rezistenței structurilor prin compararea valorilor parametrilor de referință

În cadrul acestui capitol se va analiza rezistența la cavitație a celor trei aliaje de aluminiu, ficare cu patru stări (semifabricat laminat și tratament termic volumic de îmbătrânire artificială la 180°C cu durate de o oră, 12 ore și 24 ore), prin compararea valorilor parametrilor de referință recomandați de normele ASTM G32-2016 și folosiți în cutuma laboratorului [12, 25].

Corelarea proprietăților mecanice cu rezistența la cavitație

Pentru a putea face o analiză pertinentă asupra cauzelor ce au dus la anumite comportări la cavitație, ale structurilor aliajelor studiate, cu tratament termic de îmbătrânire artificială la 180 °C cu trei durate de menținere (1oră, 12 ore și 24 ore), și ținând cont de faptul că, din punct de vedere microstructural modificările sunt nesemnificative, în diagramele aferente acestui subcapitol sunt prezentate corelațiile celor cinci proprietăți mecanice (R_{cav}), parametrul definitoriu pentru rezistența structurii la solicitarea cavității [122].

Observație: Parametrul R_{cav} este definit pe baza valorii vitezei (v_s) de stabilizare a eroziunii (spre care curba $v(t)$ tinde să se stabilizeze la 165 minute-vezi legendele din diagramele ce conțin curbele de mediere și valorile experimentale v_i), conform relației:

$$R_{cav} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2}{4 \cdot v_s} = [\mu\text{m}/\text{min}] \quad (7.1)$$

Unde:

v_s -este valoare vitezei de stabilizare eroziune în perioada (vezi legendele din diagramele specifice)

d_p - este diametrul suprafeței ariei afectate de cavitație (vezi tabelele 4.1...4.4-pentru aliajul 7075, 5.1....5.4-pentru aliajul 6082 și 6.1...6.4, pentru aliajul 2017 A)

ρ - densitatea aliajului de aluminiu (aliaj 7075 = 2.8 g/cm³, aliaj 6082 = 2.7 g/cm³ aliaj 2017 A= 2.8 g/cm³)

Aceste diagrame arată tendința de influență a rezistenței structurii de către fiecare proprietate.

Motivul construirii acestor diagrame este faptul că relațiile de influență a proprietăților mecanice, centralizate de Garcia ș.a în [53], și reluate de foarte mulți cercetători în lucrările lor, precum Franc ș.a în [51] sunt legături ale vitezei de pătrundere a eroziunii (MDER), directe sau combinate, cu duritatea suprafeței, rezistența mecanică la rupere, reziliența (vezi formulele (1.1)).

Precizare: În analizele anterioare s-a avut în vedere efectul cumulativ al celor 5 proprietăți. Efectul individual fiind determinant doar atunci când 4 dintre proprietăți sunt valoric egale.

Pentru construirea acestor diagrame sunt folosite valorile din tabelul 7.1.

Tabelul 7.1 Valorile rezistenței la cavitație și ale caracteristicilor mecanice

Aliaj	Stare	R_{cav}	R_m	R_p	HB	KCU	A5
		[min/ μm]	[MPa]	[MPa]	[daN/cm ²]	[J/cm ²]	[%]
7075 laminat	Martor	21.27	531.841	424.82	140	12.8	6
	180/1h	12.82	549.549	410.55	157	14.1	5
	180/12h	8.92	339.549	203.66	91.3	7.8	5
	180/24h	12.98	570.921	417.51	140	12.7	4.5
6082	Martor	2.46	226.05	161.71	67	25.9	13.58
	180/1h	3.39	328.98	155.21	67	8	11.88
	180/12h	4.44	249.81	181.87	67	24	20.37
	180/24h	5.1	406.52	331.97	81.3	16.3	16.04
2017A	Martor	10.2	291.16	225.01	121	29.1	19.43
	180/1h	9.43	274.22	126.4	84.9	25.3	24.26
	180/12h	9.17	281.11	135.68	80	14.3	14.49
	180/24h	5.58	281.11	140.09	74.9	14.5	12.58

5083 laminat	Martor	2.08	229.65	122.68	79	4.8	6.3
	180/1h	5.88	276.14	146.6	82.5	5.3	6.5
	180/12h	12.65	317.09	147.51	86.1	5.3	6.5
	180/24h	31.25	324.53	155.43	87.1	5.3	6.5
7075 laminat	140/1h	22.72	344.55	205.94	86.1	5.4	5.6
	140/12h	8.13	355.93	232.27	95.5	9.6	6.3
	140/24h	31.25	595.22	451.37	146	12.8	9.5
	120/1h	9.61	247.17	154.27	89.5	4	5.4
	120/12h	16.39	343.4	210.99	76.5	4.9	5.8
120/24h	10.41	354.05	210.03	86.1	7.2	6.4	
7075 turnat	Martor	4.4	225	175	74.5	6	6

Histogramele comparării valorilor parametrilor de referință

În figurile ce urmează sunt prezentate histograme ale comparării valorilor parametrilor ce caracterizează rezistența structurilor la solicitările ciclice de oboseală locală (de distrugere prin eroziune). Acestea sunt organizate după starea aliajului și parametrii tehnologici ai tratamentului termic de îmbunătățire artificială la 180 °C.

În histograma din fig.7.1 sunt comparate rezistențele la cavitație ale structurilor aliajelor în stare de semifabricat laminat. Pentru creșterea gradului de încredere s-a introdus și datele referitoare la rezistența structurii aliajelor 5083 laminat ($R_m = 226.65$ MPa, $R_{p0.2} = 122.68$ MPa, $HB = 79$ daN/mm², $A_5 = 6\%$, $KCU = 4.8$ J/cm²) și ale aliajului 7075 semifabricat turnat ($R_m = 225.75$ MPa, $R_{p0.2} = 175$ MPa, $HB = 74.5$ daN/cm², $A_5 = 6\%$, $KCU = 9.5$ J/cm²).

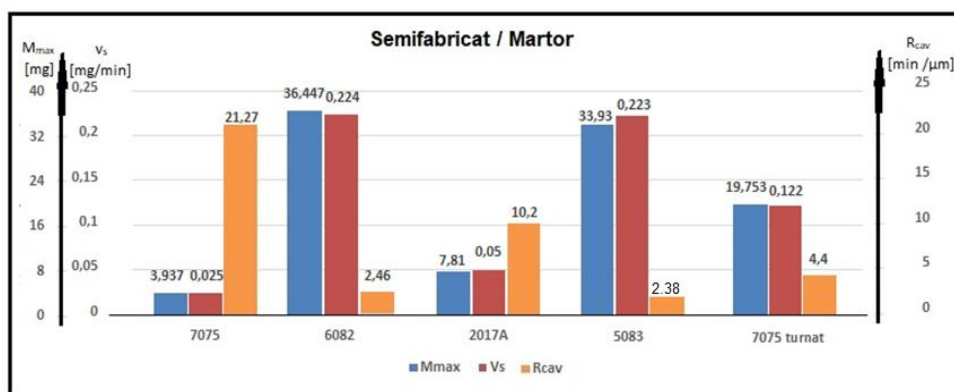


Fig. 7.1 Histograma comparării parametrilor rezistenței la eroziunea prin cavitație (stări semifabricat-probe Martor)

Datele din histograma prezentată în fig. 7.1 arată cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației o are structura aliajului 7075 iar cea mai slabă o are structura aliajului 6082;

În histograma din fig.7.2 sunt comparate rezistențele la cavitație ale structurilor aliajelor cercetate, cu tratamente termice de îmbătrânire artificială la 180 °C și cu durată de menținere de o oră. Pentru creșterea gradului de încredere s-a introdus și datele referitoare la rezistența structurii aliajelor 5083 laminat [77].

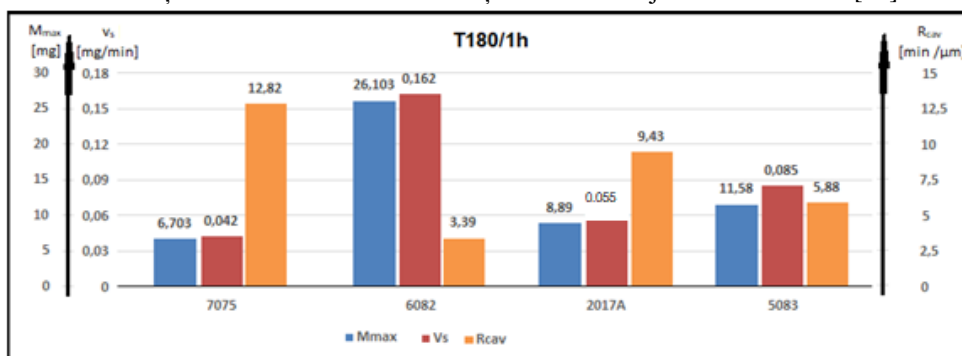


Fig. 7.2 Histograma comparării parametrilor rezistenței la eroziunea prin cavitație (tratamente 180/1h)

Datele din histograma prezentată în fig. 7.2 arată că cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației o are structura aliajului 7075 iar cea mai slabă o are structura aliajului 6082.

În histograma din fig.7.3 sunt comparate rezistențele la cavitație ale structurilor aliajelor cercetate, cu tratamente termice de îmbătrânire artificială la 180 °C și cu durate de menținere de 12 ore. Pentru creșterea gradului de încredere s-a introdus și datele referitoare la rezistența structurii aliajelor 5083 laminat [77].

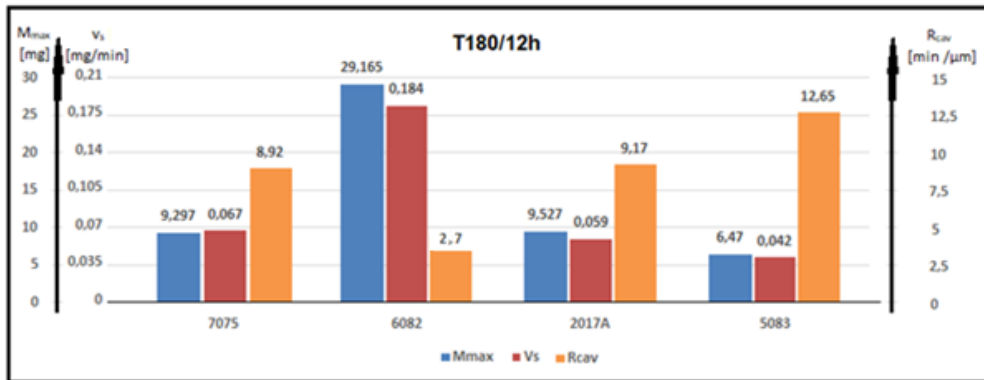


Fig. 7.3 Histograma comparării parametrilor rezistenței la eroziunea prin cavitație (tratamente 180/12h)

Datele din histograma prezentată în fig. 7.3 arată că cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației o are structura aliajului 5083 iar cea mai slabă o are structura aliajului 6082.

În histograma din fig.7.4 sunt comparate rezistențele la cavitație ale structurilor aliajelor cercetate, cu tratamente termice de îmbătrânire artificială la 180 °C și cu durate de menținere de 24 ore. Pentru creșterea gradului de încredere s-a introdus și datele referitoare la rezistența structurii aliajelor 5083 laminat [77].

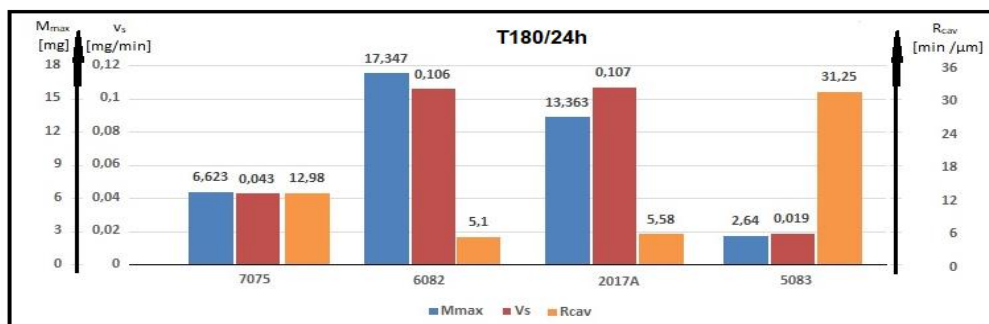


Fig. 7.4 Histograma comparării parametrilor rezistenței la eroziunea prin cavitație (tratamente 180/24h)

Datele din histograma prezentată în fig. 7.4 arată că cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației o are structura aliajului 5083 iar cea mai slabă o are structura aliajului 6082.

În histograma din fig.7.5 sunt comparate rezistențele la cavitație ale structurilor aliajului 7075, cu tratamente termice de îmbătrânire artificială la 180 °C, 140 °C, 120 °C și cu durată identică de menținere de o oră.

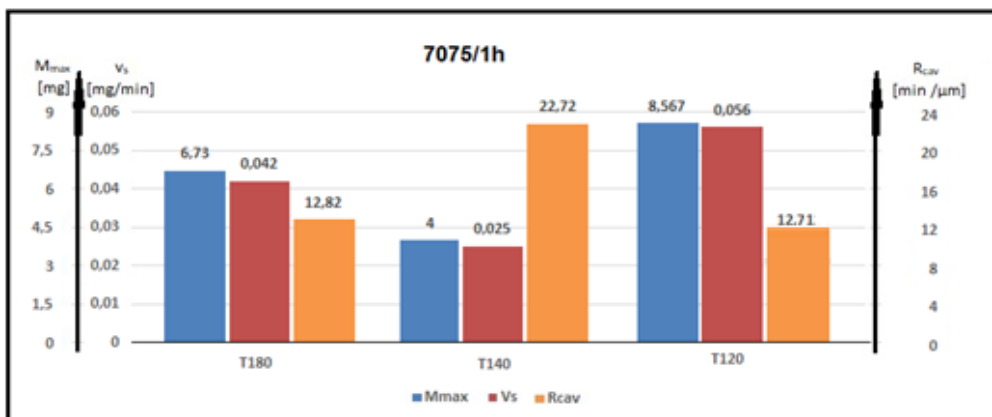


Fig. 7.5 Histograma comparării parametrilor rezistenței la eroziunea prin cavitație a aliajului 7075 cu diferite temperaturi de îmbătrânire artificială (180 °C, 140 °C și 120 °C) și durata de menținere de o oră

Datele din histograma prezentată în fig. 7.5 arată că cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației o are structura aliajului cu tratament T140, iar cea mai slabă o are structura aliajului cu tratament T120.

În histograma din fig.7.6 sunt comparate rezistențele la cavitație ale structurilor aliajului 7075, cu tratamente termice de îmbătrânire artificială la 180 °C, 140 °C , 120 °C și cu durată identică de menținere de 12 ore.

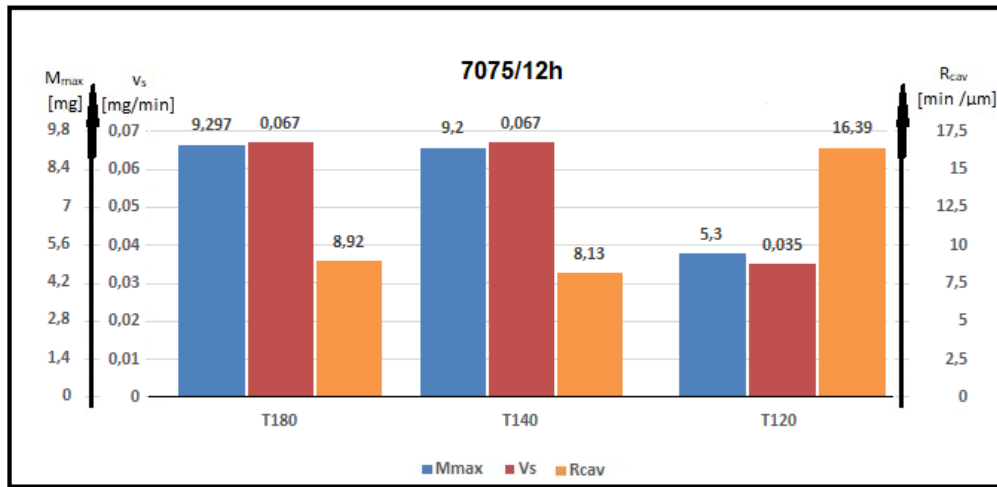


Fig. 7.6 Histograma comparării parametrilor rezistenței la eroziunea prin cavitație a aliajului 7075 cu diferite temperaturi de îmbătrânire artificială (180 °C, 140 °C și 120 °C) și durată de menținere de 12 ore

Datele din histograma prezentată în fig. 7.6 arată că cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației o are structura aliajului cu tratament T120, iar structurile aliajului cu tratamente T140 și T180 sunt mai mici.

În histograma din fig.7.7 sunt comparate rezistențele la cavitație ale structurilor aliajului 7075, cu tratamente termice de îmbătrânire artificială la 180 °C, 140 °C , 120 °C și cu durată identică de menținere de 24 ore.

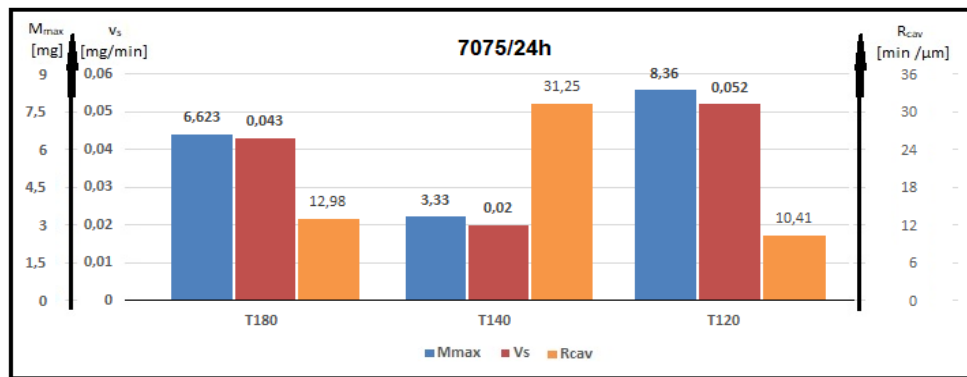


Fig. 7.7 Histograma comparării parametrilor rezistenței la eroziunea prin cavitație a aliajului 7075 cu diferite temperaturi de îmbătrânire artificială (180 °C, 140 °C și 120 °C) și durată de menținere de 24 ore

Datele din histograma prezentată în fig. 7.7 arată că cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației o are structura aliajului cu tratament T140, iar cea mai slabă o are structura aliajului cu tratament T120.

Concluzii

Comparațiile rezistențelor arată că nu există o lege prin care rezistența structurii diferitelor aliaje cu bază de aluminiu să se coreleze cu microstructura și cu proprietățile mecanice, astfel încât să se anticipeze cu certitudine dacă se obține spor sau nu, față de rezistența structurii de semifabricat, prin folosirea unor regimuri de tratament termic identice (temperatură și durată de menținere) sau diferite (fie prin temperatură, fie prin durate de menținere). Tot histogramele comparative arată că aliaje diferite pot avea rezistențe la cavitație de ordin apropiat, pentru același regim de tratament termic.

Cap. 8

Concluzii generale. Sinteza contribuțiilor principale. Direcții viitoare de cercetare

8.1 Concluzii generale (selectare)

Din documentarea realizată, din rezultatele cercetărilor experimentale și din analizele efectuate se desprind următoarele concluzii cu caracter general:

- mulți ani, după descoperire, aluminiu și aliajele sale au avut ca destinație obiecte menajere (vase), podoabe și structuri de rezistență;
- modificarea proprietăților mecanice, prin aliere cu diferite elemente chimice, a dus la obținerea de diverse tipuri de aliaje, numite duraluminiu, datorită creșterii valorilor proprietăților mecanice, la un nivel comparativ cu al oțelurilor carbon slab aliate, fapt ce a determinat la amplificarea folosirii acestor aliaje în toate domeniile, dintre care se remarcă: domeniul automotive, aviatic, naval, echipamente sportive și militar;
- dezvoltarea tehnologiilor de tratamente termice volumice și de suprafață, precum și a celor moderne (cum este durificarea mecanică prin folosirea fasciculului laser și cea de retopire WIG), prin care microstructura obținută dobândește proprietăți mecanice modificate față de stările de semifabricat, a determinat specialiștii să folosească aceste tehnologii la aliajele de aluminiu pentru a le putea folosi și la piese ce lucrează în curenți cavitaționali, de diverse intensități distructive;
- deși cercetările comportării și rezistenței structurilor aliajelor cu bază de aluminiului, la solicitările ciclice ale cavitației, sunt în plin avânt, nu s-a reușit elucidarea mecanismelor de distrugere datorită complexității hidrodinamicii cavitației, a comportării mecanice și a dependenței acestei rezistențe de caracteristicile mecanice (R_m , $R_{p0.2}$, A_5 , HB, KCU), tipul și multitudinea compușilor intermetalici;
- cercetările realizate în cadrul acestei teze, pe cele trei aliaje de aluminiu, fiecare cu patru stări diferite, arată că erodarea se manifestă simultan prin mecanismele de rupere ductilă și fisurare prin oboseală, formându-se cratere de diverse dimensiuni, izolate și dispersate pe toată suprafața;
- pentru evaluarea comportării și rezistenței la cavitație este indicat să se folosească digramele specifice, datorită datelor conținute, cu privire la valorile parametrilor recomandați de normele ASTM G32-2016 (M_{max} , R_{cav} , v_s), la statistica prelucrării datelor experimentale (interval de toleranță și abatere medie standard) și la formele curbilor de mediere a valorilor experimentale $M(t)$ și $v(t)$;
- informațiile despre comportarea și rezistența la eroziunea cavitației sunt credibile dacă analiza pe baza curbilor și parametrilor specifici eroziunii cavitației este completată de cea realizată pe baza imaginilor macroscopice de la diverse momente ale atacului cavitației și pe baza celor microscopice obținute cu microscopie de înaltă rezoluție (stereo, SEM, etc);
- folosirea tratamentelor termice volumice de îmbătrânire artificială constituie soluție de modificare a rezistenței la cavitație a aliajelor de aluminiu dacă, prin parametrii regimului de tratament termic (temperatură și durată de menținere), se obțin valori ridicate pentru R_m , $R_{p0.2}$ și HB și scăzute pentru A_5 și KCU;

8.2 Sinteza contribuțiilor principale (selecție)

Contribuțiile semnificative aduse în prezenta teză, prin documentare și testele experimentale, derulate pe cele 36 probe (cate 3 pentru fiecare stare), dincolo de cele menționate la fiecare capitol, sunt:

- evidențierea dependenței rezistenței și comportării structurilor aliajelor de aluminiu 7075, 6082 și 2017A de microstructura, compoziția chimică și proprietățile mecanice, în special de duritate, determinate de durata de menținere la temperatura de îmbătrânire artificială de 180 °C;
- investigarea comportării și rezistenței la cavitație, a aliajelor de aluminiu 7075, 6082 și 2017A, în patru stări: una livrată (semifabricat laminat) și trei diferențiate prin duratele de menținere (o oră, 12 ore și 12 ore) la temperatura de îmbătrânire artificială de 180 °C, care a arătat că doar pentru aliajul 6082, pentru toate duratele de menținere, s-a obținut un spor însemnat de rezistență la eroziunea cavitației. Pentru aliajele 2017 A și 7075 rezistența structurii de semifabricat, fără tratamentul termic este mai mare (cel mult cu diferență mică) decât cele obținute prin tratamentele termice de îmbătrânire artificială la 180 °C, indiferent de durata de menținere;
- realizarea investigațiilor morfologice al structurii degradate prin cavitație, cu prezentarea de date cantitative, pe baza imaginilor macro și microstructurale, folosind cele mai performante aparate foto și de microscopie;
- realizarea unor analize profunde ale comportării structurilor la eroziunea cavitației, pe baza dispersiei valorilor experimentale, a evoluției curbilor specifice $M(t)$, $v(t)$ și a valorilor parametrilor caracteristici (M_{max} , v_s și R_{cav});
- evidențierea creșterii rezistenței la cavitație, a structurilor celor trei aliaje de aluminiu (7075, 6082 și 2017A) cu creșterea valorilor durității (HB), rezistenței mecanice la rupere (R_m), limtei de curgere ($R_{p0.2}$) și cu scăderea valorilor pentru alungirea la rupere (A_5) și reziliența (KCU);
- analiza cauzelor ce au dus la diferențele dintre rezistențele structurilor aliajelor cercetate, folosind histogramele comparative și alte rezultate obținute pe același aliaj (7075), cu regimuri de tratament termic diferit (temperatură și/sau durate de menținere), respectiv cu stare de semifabricat turnat (7075 turnat);
- justificarea continuării cercetării pe alte tipuri de aliaje de aluminiu, respectiv pentru alte regimuri de tratament termic de îmbătrânire artificială, pentru a se obține rezistențele necesare folosirii acestor aliaje cu bază de aluminiu

la piese ce lucrează în condiții de cavitație moderată sau industrială);

8.3 Direcții viitoare de cercetare

Rezultatele cercetării conduc spre formularea unor noi direcții de studiu, ce pot fi derulate pe aliajele cu bază de aluminiu, astfel încât acestea să poată fi utilizate la piese solicitate cavitațional, cu intensități peste cele medii (industriale). Mai jos se menționează 4 dintre acestea:

1. continuarea studiilor pe regimuri cu aceeași temperatură (180 °C) dar alte durate de menținere;
2. extinderea cercetărilor și pe alte tipuri de aliaje cu bază de aluminiu, cum sunt cele din clasa 3****, 4**** sau 8****;
3. folosirea tehnologiilor moderne de durificare a structurii suprafețelor expuse la cavitație cum sunt: durificarea mecanică cu spoturi sonice, cu bile, cu fasciul laser, prin retopire WIG;
4. găsirea unor relații de corelare proprietăți mecanice-parametrul eroziunii cavitaționale ($MDER_s$, R_{cav} , MDE_{max} , etc), care să permită anticiparea rezistenței la solicitările mecanice.

Bibliografie (selectivă)

1. Anton, I., Cavitatea, Vol I, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1984
2. Anton, I., Cavitatea, Vol II, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1985
3. Anton, I., Turbine hidraulice, Ed. Facla Timisoara, 1979
12. Bordeasu, I., Monografia Laboratorului de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație al Universității Politehnica Timișoara (1960-2020), Editura Politehnica, ISBN 978-606-35-0371-9, Timisoara, 2020
15. Bordeasu, I., Ghiban, B., Madalina Micu, L.M., **Luca, A.N.**, Demian, A.M., Istrate, D., The Influence of Heat Aging Treatments on the Cavitation Erosion Behavior of a Type 6082 Aluminum Alloy, Materials, vol.16, Issue 5875, <https://doi.org/10.3390/ma16175875> (ISI), 2023
24. Bordeășu, I., Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
25. Bordeășu, I., Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Timișoara, Teză de doctorat, 1997
51. Franc, J.P., Kueny, J.L., Karimi, A., Fruman, D.H., Fréchou, D., Briançon-Marjollet. L., Yves Billard, J.Y., Belahadji, B., Avellan, F., Michel, J. M., La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels, Press Universitaires de Grenoble, Grenoble, France, 1995
53. Garcia R., Hammitt F. G., Nystrom R.E., Corelation of cavitation damage with other material and fluid properties, Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM, STP 408 Atlantic City, 1966
54. Garcia, R., Comprehensive Cavitation damage Data for Water and Various Liquid Metals Including Correlation with Material and Fluid Properties, Technical Raport Nr. 6, The University of Michigan, 1966
59. Ghera, C., Odagiu O. P., Nagy, V., Micu, L. M., **Luca, A.N.**, Bordeasu, I., Demian, M. A., Buzatu, A. D., Ghiban, B., Influence Of Ageing Time On Cavitation Resistance Of 6082 Aluminum Alloy, University Politehnica Of Bucharest Scientific Bulletin Series B-Chemistry And Materials Science, Vol. 84, Issue 4, pp. 225-237, 2022
68. Hobbs, J.M., Experience with a 20 – KC Cavitations erosion test, Erosion by Cavitations or Impingement, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960
69. Hobbs, J.M., Vibratory cavitation erosion testing at nel, Confernce Machynery Groop, Edinburgh, 1974
77. Istrate, D., Influența tratamentelor termice asupra comportarii unui aliaj din sistemul Al-Mg pentru aplicatii maritime, Teza doctorat, U.P Bucuresti, Romania, 2023
113. Mitelea, I., Materiale ingineresti, Editura Politehnica, Timișoara, Romania, 2009
122. Oanca, O., Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale, Teza de doctorat, Timișoara, 2014
125. Odagiu P. O., Salcianu, C. L., Ghera, C., Buzatu, A.D., Micu, L. M., **Luca, A. N.**, Bordeasu, I., Ghiban, B., Heat Treatment Parameters Influence On The Cavitation Resistance Of An Aluminum Alloy, U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 85, Issue. 3, 2023
165. ***Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32, 2016
181. Hammitt, F.G., Cavitation Damage and Performance Research Facilities, Symp. Cavitation Research Facilities and Techniques, ASME, ed. G.M. pp.175-184, 1964
185. Hammitt, F.G., Nath, A., De, K. M., Erosion of ferroru and aluminium alloys in cavitating venturi, Report no.UMICH 014456-53, University of Michigan, Depatment of Mechanical Engineering, Cavitation and Multipfase Flow Laboratory, 1980
192. Bordeășu, I., **Luca, A.N.**, Lazăr, I., Lază, D., Bădărău, R., Ghiban, B., Buzatu, A.D., Demian, A.M., Odagiu, O.P., Micu, M.L., Modification of Cavitation Erosion Resistance of Aluminum Alloy 7075 by Maintaining of Artificial Aging Heat Treatment at 180 C, Hidraulica, no.4, pp.33-41. 2022