



UNIVERSITATEA POLITEHNICA
TIMIȘOARA



FACULTATEA DE MECANICĂ

**Microstructura și rezistența la eroziune prin cavitație a
unor straturi depuse prin sudare pe oțeluri inoxidabile
Duplex**

- REZUMAT -

Doctorand:

Ing.Daniel Paul MUTAȘCU

Conducători științifici:

Prof. univ. dr. ing. Ion MITELEA

Prof. univ. dr. ing. Ilare BORDEAȘU

Timișoara, 2024

Cuprins

(extras)

Introducere

Cap. 1 Stadiul actual al cercetărilor

1.1 Introducere

1.2 Microstructura și proprietățile oțelurilor inoxidabile Duplex

1.3 Mecanismul degradării prin cavitație

1.3.1 Mecanisme ale ruperii prin eroziune cavitațională

1.3.1.1 Influența perioadei de incubatie și a vitezei de deformare

1.3.1.2 Influența structurii de cristalizare

1.3.1.3 Mecanismul ruperii prin oboseală

1.3.2 Observații în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara

1.3.3 Manifestarea mecanismului de distrugere prin cavitație, funcție de hidrodinamica cavitației

1.3.3.1 Elicele navale

1.3.3.2 Rotoarele de turbine hidraulice

1.3.3.3 Rotor de pompă centrifugă

1.4 Tehnici de durificare a suprafeței pentru îmbunătățirea rezistenței la cavitație

1.4.1 Tratamente termice volumice și rezistența la eroziune prin cavitație

1.4.2 Rezistența la cavitație a suprafețelor durificate prin tratamente de nitrurare

1.4.2.1 Nitrurarea în gaz

1.4.2.2 Nitrurarea cu fascicul laser

1.5 Obiectivele tezei de doctorat

Cap. 2 Eroziunea prin cavitație a straturilor din aliaje ”Stellite 21” depuse prin sudare WIG pe suprafața oțelurilor inoxidabile Duplex

2.1 Introducere

2.2 Particularitățile procesului de depunere prin sudare WIG în curent pulsant

2.2.1 Bazele procesului de sudare WIG

2.2.2 Parametrii de proces ai depunerii prin sudare WIG în curent pulsant

2.3 Investigații microscopice asupra sistemului strat – substrat

2.4 Evaluarea diluției. Analize macrografice și de dispersie în energie a razelor X

2.5 Încercări de duritate

2.6 Analize de difracție cu raze X

2.7 Rezistența la cavitație a straturilor depuse din aliaje “Stellite 21”

2.7.1 Procedura experimentală

2.7.2 Curbele de cavitație

2.8 Concluzii

Cap. 3 Rezistența la cavitație a straturilor din aliaje Corodur 65 depuse prin sudare WIG pe oțeluri inoxidabile Duplex

3.1 Introducere

3.2 Procedura experimentală

3.3 Evaluarea datelor experimentale

3.3.1 Eterogenități chimice și gradul de diluție

3.3.2 Microstructura sistemului strat - substrat

3.3.3 Analize de difracție cu raze X

3.3.4 Măsurători de duritate

3.3.5 Rezultatele încercărilor de cavitație

3.3.6 Examinări macrografice asupra suprafețelor testate la cavitație

3.3.7 Măsurători de rugozitate a suprafeșelor cavitate

3.3.8 Topografia suprafețelor erodate prin cavitate

3.4 Concluzii

Cap. 4 Caracteristicile structurale și rezistența la cavitație a straturilor din aliaje austenitice manganoase depuse prin sudare pe oțeluri inoxidabile Duplex

4.1 Introducere

4.2 Materiale, procedura experimentală

4.3 Evaluarea rezultatelor experimentale

4.3.1 Examinări macrografice

4.3.2 Examinări micrografice

4.4 Analize EDX. Gradul de diluție

4.5 Difracția cu raze X

4.6 Incercări de duritate

4.6 Evaluarea testelor de cavitație

4.8 Topografia suprafețelor cavitate

4.9 Concluzii

Cap. 5 Concluzii finale și contribuții originale. Direcții viitoare de cercetare

Lista publicațiilor rezultate în urma cercetării doctorale, publicate sau acceptate spre publicare, sub afiliere UPT

BIBLIOGRAFIE

Cap. 1 Stadiul actual al cercetărilor

Eroziunea cavitațională este cel mai nefast efect al cavitației, care apare în funcționarea mașinilor și echipamentelor hidraulice, datorită distrugerii materialelor solide din care sunt confecționate frontierele ce vin în contact cu lichidul. Acest fenomen a fost identificat, pentru prima oară, în anul 1848, odată cu verificarea primei nave moderne de pasageri, construită din metal și propulsată de un motor cu aburi care acționa o elice navală din oțel, construită de Great Britain, proiectată de Isambard Kingdom Brunel și lansată la apă în 1843 [14]. În anul 1875 Italianul Bartellor consemnează eroziuni de cavitație la elicele navelor Mauritania și Luisitania [14]. Efectele negative asupra performanței unei elice navale au fost identificate abia în 1893 de către Parsons, care a construit primul tunel pentru cavitație [5].

Cu trecerea timpului, s-a constatat că distrugeri, specifice cavitației, apar în toate echipamentele și instalațiile ce lucrează cu lichide (turbine și pompe hidraulice, aparate de comandă și control din instalațiile hidraulice de acționare, vane, fittinguri și pompe ale rețelelor de alimentări cu apă și irigații, etc), în care apar variații importante ale presiunii, prin scădere sub valoarea celei de vaporizare și creștere bruscă. Din acest motiv, multe piese ce funcționează în condiții de cavitație sunt fabricate din materiale care să aibă proprietăți fizico-mecanice și microstructuri care să reziste solicitărilor de oboseală produse de impacturile cu microjeturile și undele de șoc generate de hidrodinamica cavitației. Cercetările derulate pe rotoarele de mașini hidraulice și elicele vapoarelor [1],[4],[5], arată că oțelurile inoxidabile au o bună rezistență la eroziunea cavitației, care poate fi îmbunătățită prin diverse tratamente termice sau tehnologii de durificare a suprafeței solicitate. Dintre

acestea, cele cu structură martensitică au o rezistență ceva mai mare. Însă, dificultatea prelucrării mecanice a determinat oamenii de știință să caute soluții de utilizare și a oțelurilor cu structură din austenită sau combinată, cum sunt cele duplex (austenită-ferită) [18],[22]. Așa se face că, în multe cazuri, oțelurile inoxidabile austenitice clasice și cele care conțin Mo pot fi înlocuite cu succes de către oțelurile austenito - feritice (duplex). Aceste materiale alternative oferă o excelentă rezistență la coroziune, caracteristici mecanice mai ridicate, tenacitate la încovoiere prin șoc, până la temperaturi de -50°C [20],[23], conducând la reducerea costurilor de fabricație. Datorită acestor avantaje, azi, oțelurile inoxidabile Duplex sunt tot mai des folosite în fabricarea pieselor solicitate intens la eroziunea cavitațională (rotoare de mașini hidraulice, elice navale, sertare ale aparatelor de comandă, distribuție și reglare din sistemele hidraulice de acționare) [14]. Pentru creșterea duratei de viață a unor astfel de echipamente, în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara, de peste 80 de ani sunt realizate cercetări pe diverse clase de oțeluri supuse celor mai noi tehnici de îmbunătățire a caracteristicilor ce măresc rezistența la eroziunea cavitației [7], [8], [11], [12], [16], [24], [25].

Oțelurile inoxidabile Duplex, în stare de echilibru, conform [9], [21], [22], [23], [27] au structura ferito-austenitică sau austenito-feritică (cca 50% ferită și 50% austenită) și sunt caracterizate prin:

- stabilitate la coroziune sub tensiune în fluide apoase ce conțin ioni de clor și o excelentă stabilitate la coroziune în puncte;
- valori mari ale caracteristicilor de rezistență mecanică (limită de curgere și rezistență la rupere);
- proprietăți superioare oțelurilor inoxidabile austenitice clasice (X5CrNi18-10 și X2CrNiMo17-12-2) [2], [10].
- conținutul în Ni (element scump), mai mic decât cel din oțelurile inoxidabile austenitice, care justifică economic folosirea la piese ce lucrează în curenți cavitaționali.

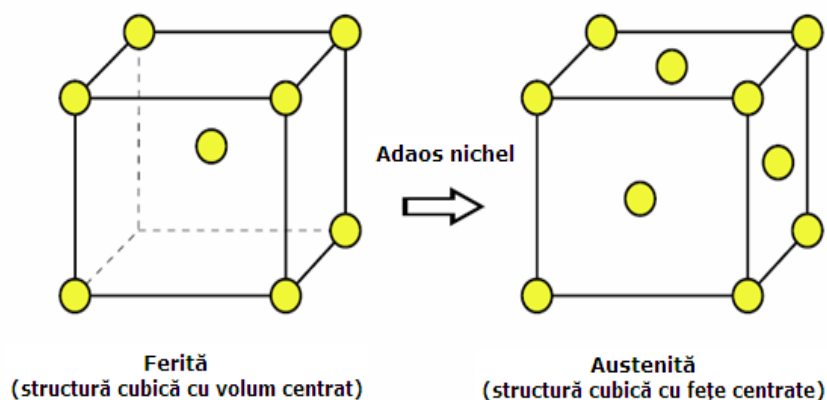


Fig. 1.1 Modificarea tipului de rețea cristalină prin aliere cu nichel

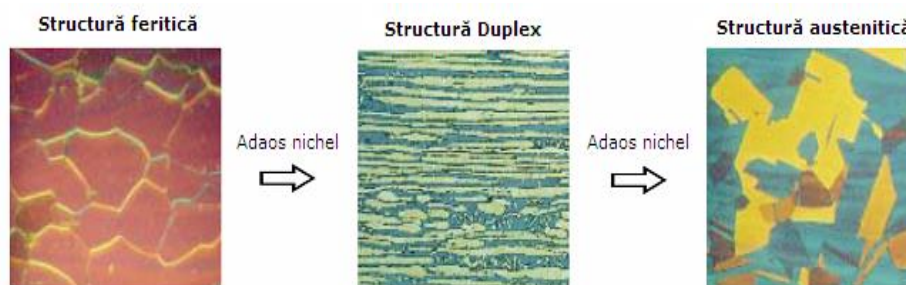


Fig. 1.2 Modificarea structurii microscopice prin aliere cu nichel

Proporția celor două faze (austenita (A) și ferita (F)), poate fi modificată în limite largi, în funcție de:

- conținutul în elemente de aliere;
- temperatura de încălzire pentru punere în soluție a fazelor intermetalice.

Totodată, aplicarea unor tratamente termice provoacă declanșarea următoarelor fenomene cu consecințe asupra schimbării microstructurii [23]:

- precipitarea carburilor de tipul $M_{23}C_6$ și a nitrurilor de tipul Cr_2N pe interfața grăunților de ferită – austenită, fără consecințe privind coroziunea intercristalină;
- precipitarea ușoară a fazei σ (din ferită) în cursul încălzirii;
- durificarea prin recoacere la temperaturi cuprinse între 400 și 900°C.

În multe cazuri, oțelurile inoxidabile austenitice care conțin Mo pot fi înlocuite cu succes de către oțelurile austenito - feritice (duplex) [23].

În fig. 1.3 a,b și fig. 1.4 a,b se prezintă un rotor de turbină Kaplan, respectiv de turbină Francis, ambele înainte și după degradarea prin eroziunea cavitațională [14]. Se observă modul diferit de distrugere și mult mai accentuat la rotorul de turbină Francis.



a)

b)

Fig. 1.3 Rotor de turbină Kaplan executat din oțel inoxidabil [14]:

a - rotorul turbinei înainte de degradarea prin eroziune cavitațională;

b - paleta rotorului după degradarea prin eroziune cavitațională



a)

b)

Fig. 1.4 Rotor de turbină Francis executat din oțel inoxidabil [4]:

a – rotorul turbinei înainte de degradarea prin eroziunea cavitațională;

b – paleta rotorului după degradarea prin eroziunea cavitațională.

Obiectivele urmărite în cadrul tezei de doctorat sunt:

- cercetarea comportării și a rezistenței la cavitație vibratoare a **straturilor depuse prin sudare pe oțelul inoxidabil duplex** X2CrNiMoN22-5-3;

- aprofundarea mecanismului de degradare a straturilor de suprafață la solicitările produse prin cavitația vibratoare;
- investigarea morfologiei și caracterizarea macro - și microstructurală a suprafețelor solicitate la eroziunea cavitației cu studierea mecanismului de generare și propagare a fisurilor și ruperilor;

Noutatea tezei de doctorat:

Noutatea tezei de doctorat constă în găsirea unei **corelații** între starea structurală a materialului stratului depus prin sudare pe probe din oțel inoxidabil duplex X2CrNiMoN22-5-3 și parametrii degradării prin eroziune cavitațională („1/MDER” ”MDE”, ”Rz”) precum și optimizarea procesului tehnologic de sudare în vederea măririi duratei de viață a pieselor care lucrează în astfel de condiții hidrodinamice.

Cap. 2 Eroziunea prin cavitație a straturilor din aliaje ”Stellite 21” depuse prin sudare WIG pe suprafața oțelurilor inoxidabile Duplex

În prezentul capitol se analizează parametrii procesului de depunere prin sudare WIG în curent pulsant a aliajelor “Stellite 21” cu conținut mai redus în carbon pe substraturi din oțel inoxidabil Duplex, X2CrNiMoN22-5-3. Parametrii optimizați ai procesului sunt prezentați împreună cu o analiză a durității și structurii stratului depus. De asemenea, se investighează rolul straturilor din aceste aliaje “Stellite 21”, depuse prin procesul de sudare WIG pe oțeluri inoxidabile Duplex pentru a reduce degradarea suprafeței pieselor supuse eroziunii cavitației.

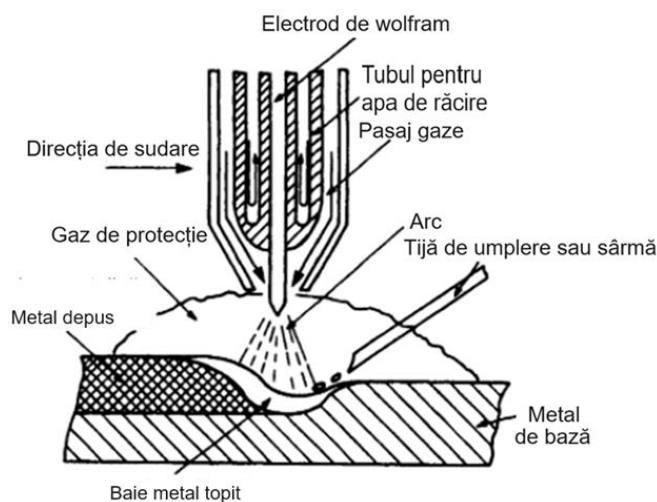


Fig. 2.1 Procesul de încărcare prin sudare WIG

În cazul operării manuale, aliajele selectate pentru durificare sunt livrate sub formă de vergele metalice și sunt topite și curg pe substrat pentru a forma stratul depus. În cazul operării automate, acest proces necesită de regulă un dispozitiv de alimentare cu aliaj și dispozitive de manipulare a piesei.

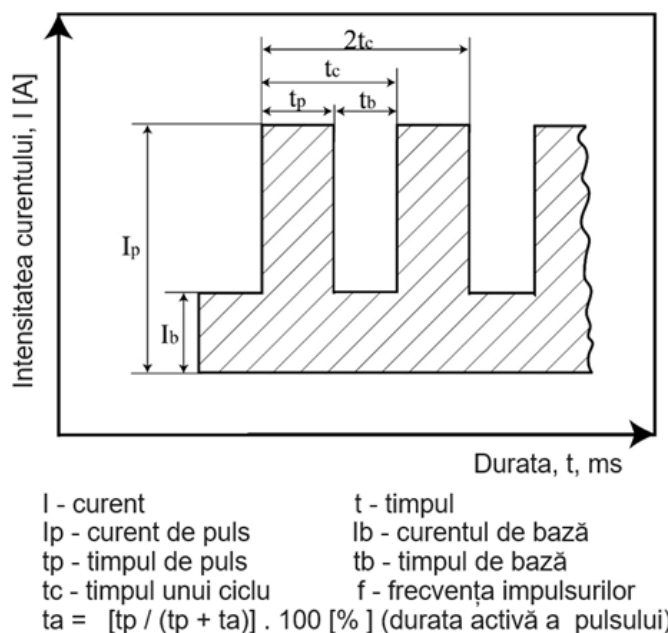


Fig. 2.2 Parametrii procesului de sudare WIG în curent pulsant

Materialul care face obiectul cercetărilor experimentale efectuate este marca de oțel inoxidabil Duplex 2205, simbolizat X2CrNiMoN22-5-3 conform normei europene EN 10088 și UNS S31803 după ASTM A276. El a fost supus tratamentului termic de călire pentru punere în soluție de la temperatura de 1060 °C cu răcire bruscă în apă. Microstructura tipică a acestui oțel tratat termic, apreciată prin determinări metalografice cantitative, folosind un feriscop Fischer, este alcătuită din cca. 48 % ferită și 52 % austenită.

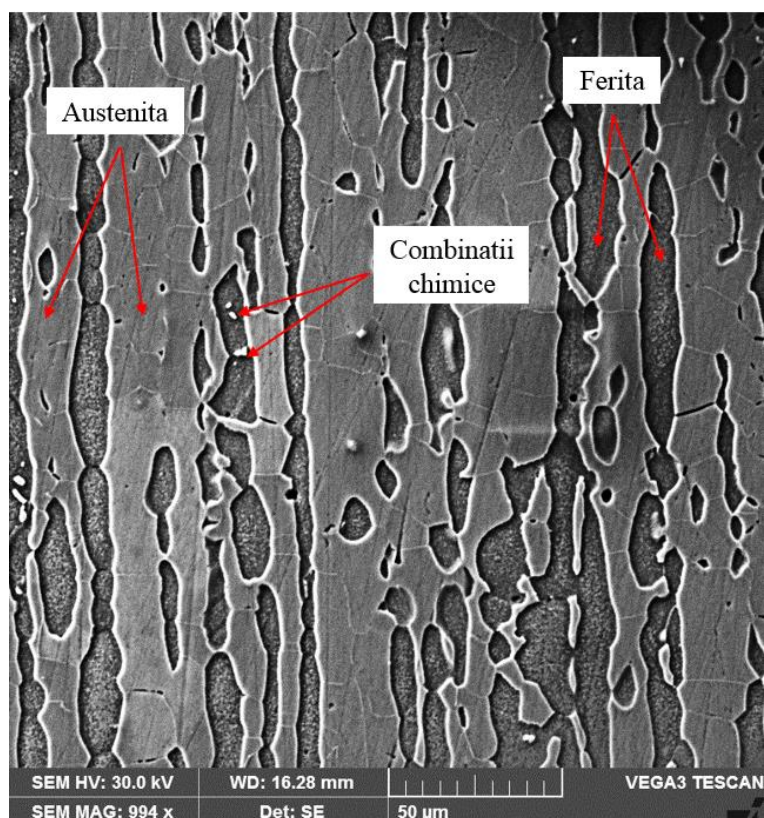


Fig. 2.3 Microstructura substratului din oțel inoxidabil Duplex – SEM x 994

Compoziția chimică a oțelului utilizat ca substrat:

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	N, %
0,021	0,79	0,82	0,019	0,012	22,34	5,61	3,1	0,14

Microstructura stratului depus din aliaj Stellite 21 este arătată în fig. 2.4. Așa cum s-a demonstrat și în alte lucrări de cercetare [32], [59], ea este constituită dintr-o matrice bogată în Co cu aspect dendritic în care sunt distribuite particule de combinații chimice de tipul carburilor. Atât Cr ca principal element de aliere cât și Mo, sunt elemente care reacționează cu C pentru a forma carburi distribuite în zonele interdendritice și pe limitele grăunților cristalini. Ele au dimensiuni și o distribuție dependente de condițiile de procesare.

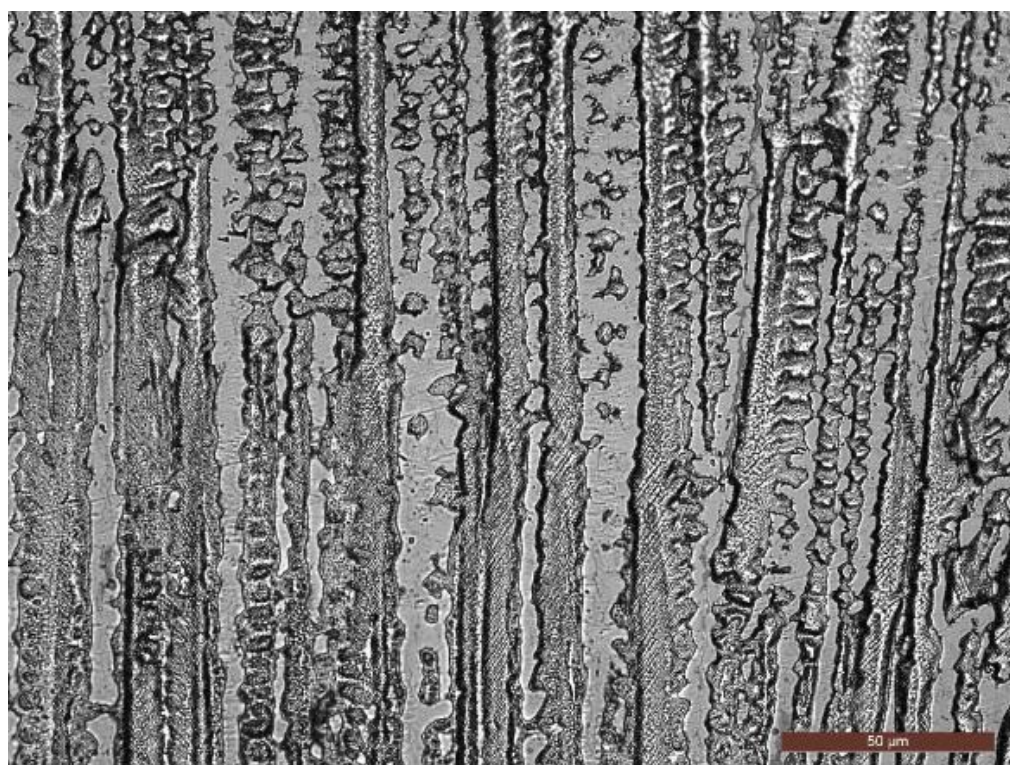


Fig. 2.4 Microstructura zonei exterioare a stratului depus – x 300

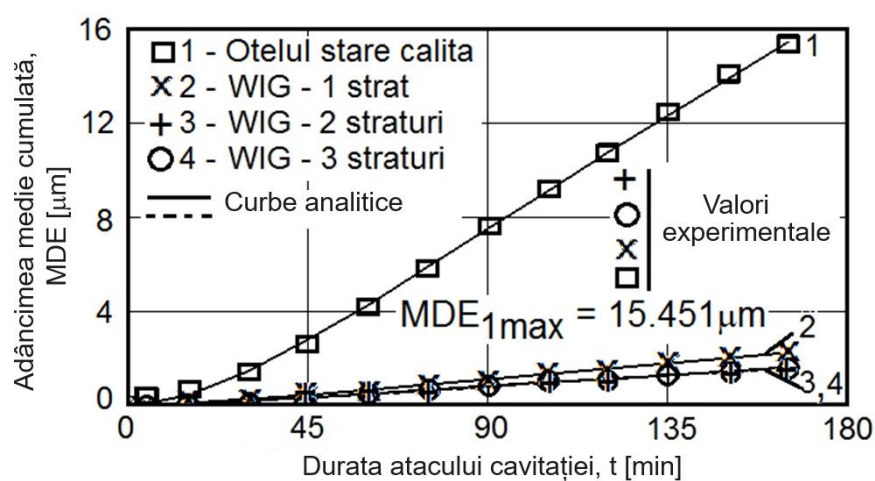


Fig. 2.5 Evoluția adâncimii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației

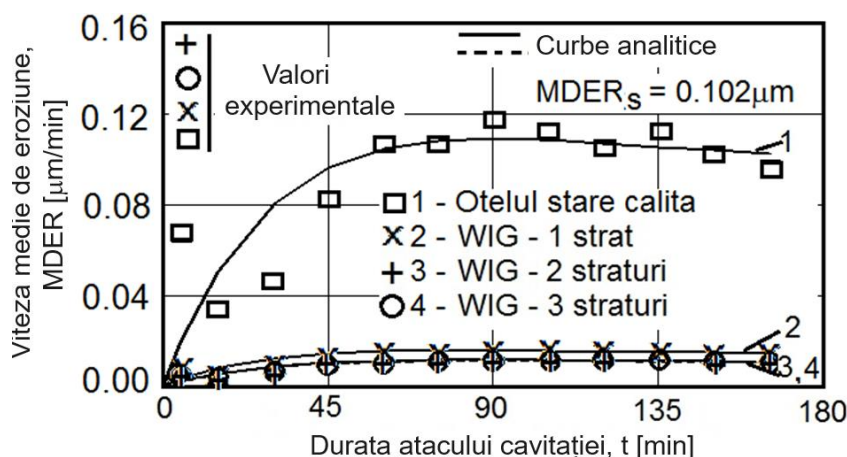


Fig. 2.6 Variația vitezei de eroziune cu durată atacului cavitației

Din analiza datelor din fig. 2.5 și 2.6 se desprind următoarele observații:

- după 165 min. de atac cavitațional, pierderea de masă suferită de oțelul inoxidabil Duplex este de cca. 24 mg, iar viteza de eroziune prin cavitație este de cca. 0,16 mg/min.;
- comparativ cu materialul de bază, straturile depuse prin sudare WIG prezintă o micșorare a pierderilor de masă de (7÷10) ori și a vitezei de eroziune de (7÷11) ori;
- independent de numărul straturilor depuse WIG, rezistența la eroziunea cavitației a aliajului “Stelite 21” este excelentă.

Examinarea la microscopul electronic cu baleiaj a secțiunilor transversale prin suprafețele cavitare timp de 165 min. (fig. 2.7) permite următoarele observații:

- declanșarea atacului cavitațional se inițiază la limitele dintre faze, după care urmează îndepărtarea particulelor de carburi, iar ulterior se produce atacul matricei de soluție solidă cu baza de cobalt;
- valorile reduse ale energiei liniare caracteristice procesului WIG în curent pulsant conduc la o finisare a microstructurii. Cu cât dimensiunile grăunților sunt mai mici, cu atât suprafețele limitelor de separare dintre aceștia sunt mai mari și efectul de blocare a degradării prin cavitație va fi mai accentuat;
- o ecruisare mecanică și fazică a stratului de suprafață, cu o grosime de 280....410 μm, determinată de acțiunea mecanică a imploziei bulelor cavitaționale, respectiv de inducerea unei transformări martensitice.

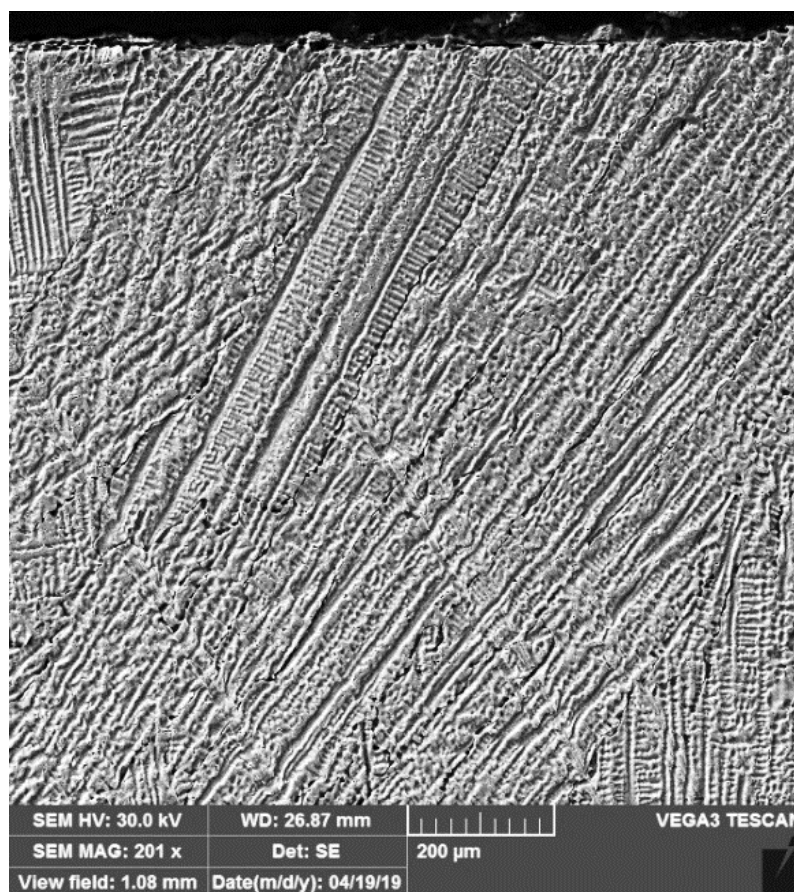


Fig. 2.7 Imaginea SEM a unei secțiuni prin probele testate la cavitație

Cap.3 Rezistența la cavitație a straturilor din aliaje Corodur 65 depuse prin sudare WIG pe oțeluri inoxidabile

În capitolul de față se analizează parametrii procesului de depunere prin sudare WIG a sârmei electrod Corodur 65 (EN 14700 DIN 8555) pe substraturi din oțel inoxidabil Duplex, X2CrNiMoN22-5-3 având aplicații potențiale la remanierea sistemelor mecanice care lucrează în condiții de uzare mecanică și de eroziune prin cavitație. Parametrii optimizați ai procesului sunt prezentați împreună cu o analiză a difuziei elementelor de aliere din metalul de bază în metalul depus, a gradientului de duritate, a macro- și microstructurii sistemului strat – substrat și a performanțelor de rezistență la eroziunea prin cavitație.

Metalul de adaos selectat pentru experimente a fost Corodur 65, (Corthal 65), - DIN EN 14700, care are următoarea compoziție chimică : C = 5.08 %, Si = 0.94 %, Mn = 0.42 %, Cr = 21.1 %, Mo = 6.94 %, Nb = 6.72 %, V = 1.02 %, W = 1.88 %, Fe = Rest.

Acest aliaj a fost ales deoarece are caracteristici speciale în ceea ce privește rezistența ridicată la uzare abrazivă, datorită compoziției sale chimice care combină conținutul ridicat de C cu cel de Cr, Mo, Nb, W și V, menținând un conținut mai scăzut în Fe. Metalul de bază utilizat a fost oțelul inoxidabil X2CrNiMoN22-5-3 (AISI 2205).

Dozarea energiei liniare introdusă în piesă se realizează prin reglarea parametrilor tehnologici I_p , I_b , t_p , t_b , respectiv a frecvenței f . La aceeași valoare a curentului mediu de sudare, pătrunderea cusăturii este mai mare decât la sudarea WIG clasică, iar energia liniară este mai mică, fapt care conduce la micșorarea tensiunilor și deformațiilor la sudare. Ca recomandări generale, curentul de puls are valori de 1,5 – 2 ori mai mari decât curentul constant clasic

$$I_p = 1,8 I_{ref.}$$

$$I_b = I_p/3 \text{ (regula treimii)}$$

$$t_p = 0,2...0,3 \text{ s}$$

$$t_b = 2 \times t_p$$

În acest caz se obține:

$$I_{ref.} = (I_p \times t_p + I_b \times t_b)/(t_p + t_b)$$

Exemplu:

$$\text{pentru: } I_{ref.} = 50 \text{ A,}$$

rezultă:

$$I_p = 90 \text{ A}$$

$$I_b = I_p/3 = 30 \text{ A}$$

$$t_p = 0,3 \text{ s}$$

$$t_b = 2 \times t_p = 0,6 \text{ s}$$

$$I_m = I_{ref.} = (I_p \times t_p + I_b \times t_b) / (t_p + t_b) = (90 \times 0,3 + 30 \times 0,6) / (0,3 + 0,6) = (27 + 18) / 0,9 = 45 / 0,9 = 50 \text{ A}$$

Pentru analize chimice și metalografice s-a procedat la secționarea transversală a probelor urmată de pregătirea acestora prin tehnici metalografice convenționale; astfel, după debitare ele au fost șlefuite cu hârtie abrazivă cu carbură de siliciu și lustruite cu pastă de diamant, iar în final au fost atacate chimic cu reactivul V_2A .

Fenomenul de diluție este cauzat de diferența dintre punctele de topire ale metalului de bază și aliajului de acoperire dură. Procesul de încărcare dură a unui substrat este însoțit de o pătrundere a elementelor componente ale acestuia în metalul depus, afectând într-o anumită măsură proprietățile aliajului de acoperire dură. În consecință, proprietățile aliajului se diluează până la o anumită regiune de la interfață cunoscută sub numele de regiune de diluție. Evaluarea gradului de diluție s-a făcut pe baza compoziției chimice a celor trei zone distincte (metal de bază, metal depus și metal de adaos) folosind analiza de dispersie în energie a razelor X. Relația de calcul este [17]:

$$Gd = (F_{ewm} - F_{efm}) / (F_{ebm} + F_{efm}) \times 100 = (65.02 - 55.90) / (67.27 + 55.90) \times 100 = 7.4 \%$$

în care F_{ewm} , F_{efm} și F_{ebm} reprezintă conținuturile de fier în procente de greutate ale metalului sudat, metalului de adaos și metalului de bază.

Analiza microscopică mijlocește cunoștințe care permit aprecierea calității straturilor depuse. Examinările microstructurale au fost conduse pe un microscop optic Leica DM 2700 M și un microscop electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker, echipat cu un sistem de analize de dispersie în energie a razelor X, (EDX).

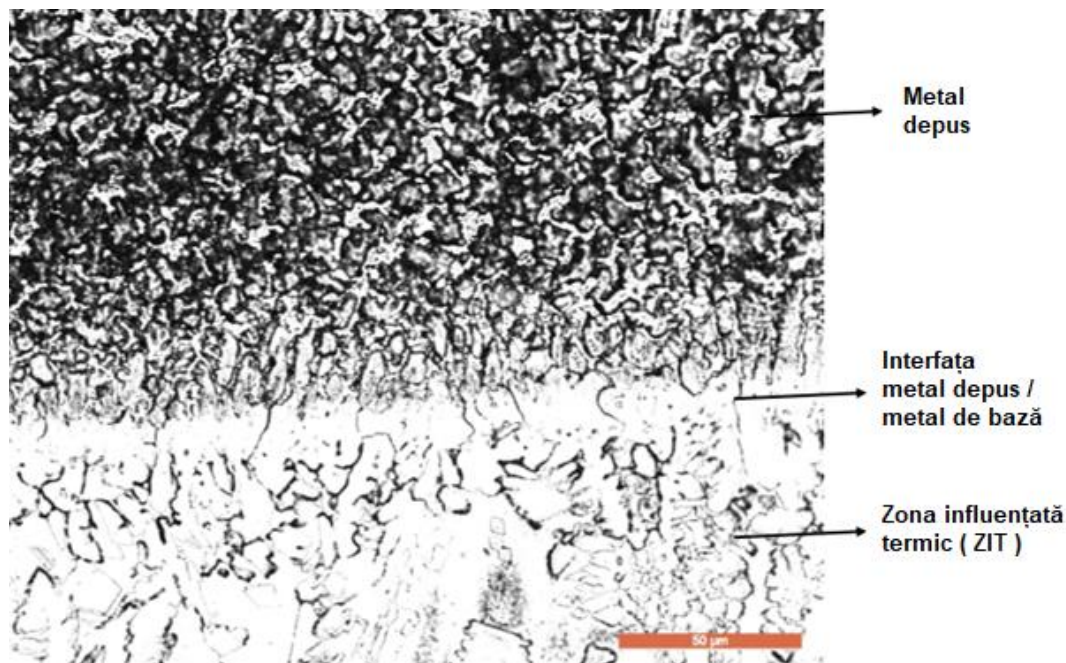


Fig. 3.1 Microscopie optică, x 500 - microstructura interfeței dintre metalul depus și metalul de bază

Investigațiile efectuate la microscopul electronic cu baleiaj reliefează faptul că fazele secundare sunt precipitate atât în regiunile intercelulare cât și în cele interdendritice. Structurile celulare și celular-dendritice sunt situate în partea de jos a zonei de fuziune, imediat după linia interfeței acestora cu metalul de bază

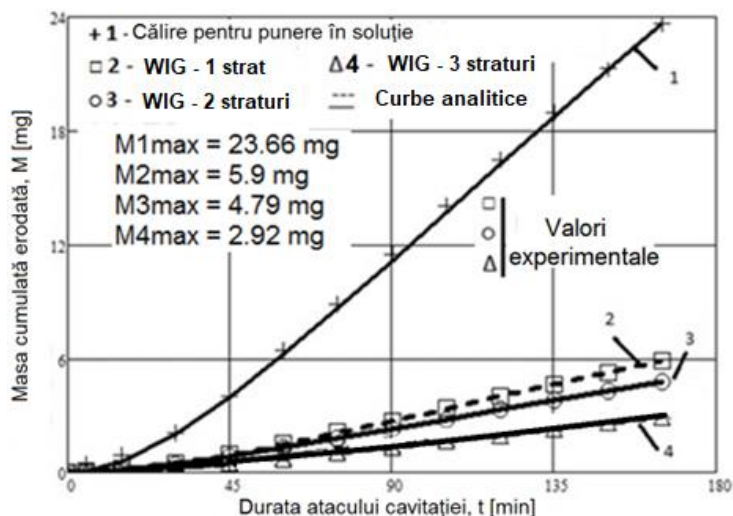


Fig. 3.2 Evoluția pierderilor masice cu durată atacului cavitației

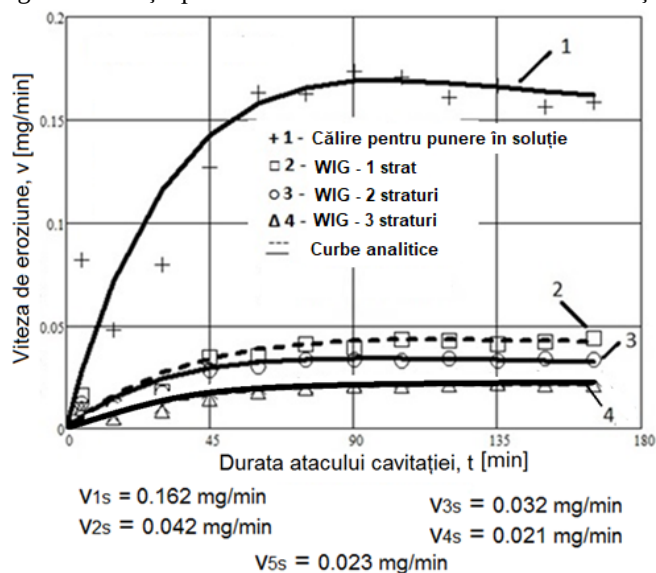


Fig. 3.3 Variația vitezei de eroziune cu durată atacului cavitației

Constatările rezultate din diagramele redată în fig.3.2 și 3.3 sunt:

- 1- evoluțiile curbelor de pierdere de masă (fig.3.2), cu variație liniară începând cu minutul 75, cât și ale vitezelor de eroziune, cu tendință de stabilizare la valoarea maximă, după aceeași durată de expunere, sugerează, conform precizărilor din [13], [19], [26] că rezistența straturilor este una ridicată, specifică suprafețelor cu duritate mare, structură relativ fină și dispersie omogenă a proprietăților mecanice în volumul stratului depus;

- 2- dispersia valorilor experimentale ale vitezelor de eroziune față de curba de mediere (fig.3.3) este expresia unei structuri cu granulație fină [15], care determină o rezistență sporită la eroziunea cavitației;
- 3- comparația cu materialul substratului, curbele marcate cu 1, arată că:
 - a. sporul de rezistență exprimat prin valoarea masei totale ($M_{\max}$, după 165 minute) variază de la 4.01 la 8.1 ori, funcție de numărul de straturi;
 - b. sporul de rezistență, funcție de numărul de straturi depuse prin sudare WIG, exprimat prin valoarea spre care tinde viteza de eroziune să se stabilizeze (v_s) după 165 minute de atac al cavitației, variază de la 3.9 la 7.7 ori;
- 4- creșterea numărului de straturi depuse prin sudare WIG conduce la creșterea rezistenței la cavitație. Suprafețele cu 3 și 4 straturi au comportamente și rezistențe aproximativ identice, mai mari cu (80...100)%, față de suprafața cu un strat depus și mai mare cu (39...50)% față de suprafața cu două straturi.
- 5- Faptul că între suprafețele cu 3 și 4 straturi diferențele de comportare și rezistență la eroziunea cavitației este ne semnificativă arată că orice creștere de număr de straturi peste 3 este neeconomică.

În fig. 3.4 se arată imaginea SEM a suprafeței probei cu 3 straturi depuse, care a fost testat la eroziune prin cavitație timp de 165 min. În această situație, particulele de carburi au fost îndepărtate în mod preferențial ca urmare a deformării inițiale și a generării de fisuri pe interfața particule – matrice austenitică. Ca o consecință, această deformare plastică provoacă inițierea și propagarea microfisurilor de oboseală, care în final conduc la cedarea prin oboseală și la eroziunea materialului.

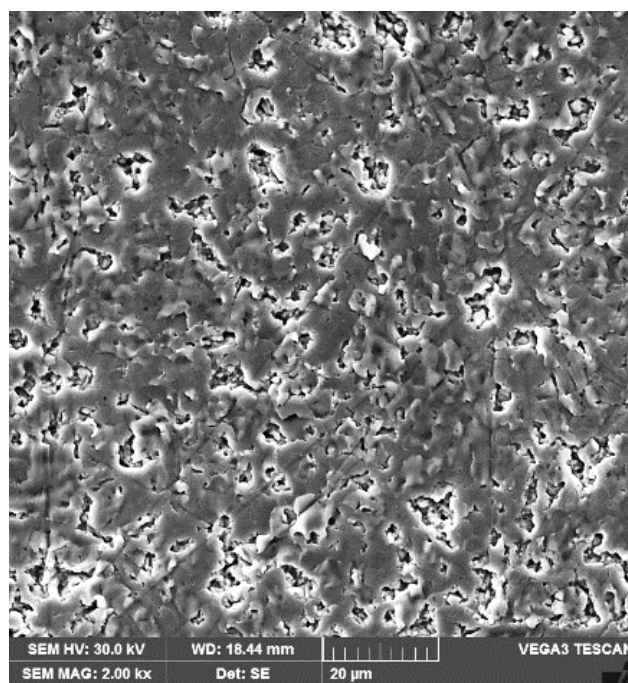


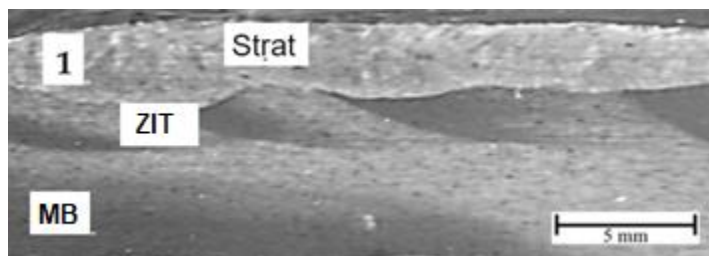
Fig. 3.4 Imagini SEM ale suprafețelor degradate prin cavitație – 3 straturi depuse

Cap.4 Caracteristicile structurale și rezistența la cavitație a straturilor din aliaje austenitice manganoase depuse prin sudare pe oțeluri inoxidabile Duplex

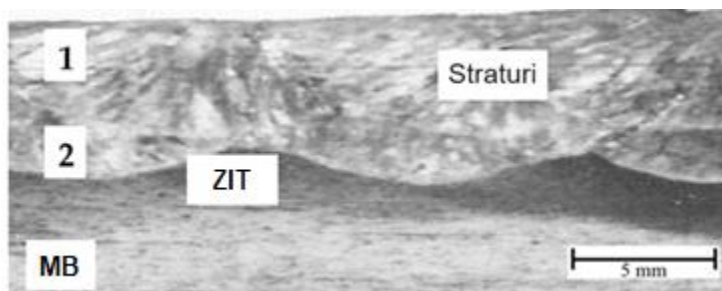
Materialul de bază utilizat ca substrat a fost oțelul inoxidabil Duplex 2205, simbolizat X2CrNiMoN22-5-3 conform normei europene EN 10088 și UNS S31803 după ASTM A276. Înaintea procesului de încărcare dură el a fost supus tratamentului termic de călire pentru punere în soluție de la temperatura de 1060 °C cu răcire bruscă în apă.

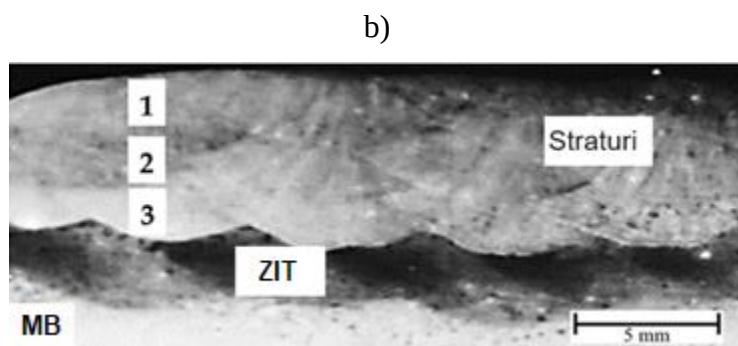
Materialul de adaos selectat a fost electrodul CITOMANGAN cu înveliș bazic din oțel austenitic manganos, simbolizat DIN 8555: ~E 7 - UM - 200 KP, respectiv EN 14700: E Fe 9 care este recomandat pentru depuneri de straturi rezistente la uzare în condiții de impacturi și șocuri puternice. Compoziția chimică garantată a metalului depus este următoarea: 0.60 % C, 15 % Mn, 4.5 % Cr, 4.8 % Ni, rest Fe.

În fig.4.1 sunt exemplificate imaginile macrografice ale unor probe încărcate cu unul, două și trei straturi. Aceste imagini pun în evidență o geometrie corespunzătoare a zonei de metal depus, și lipsa defectelor de continuitate a materialului. Întrucât oțelul austenitic nu prezintă transformări polimorfe, nu este posibilă o finisare a granulației în zona influențată termic (ZIT), iar grăunții mari, rezultați la fiecare trecere, par a se împiedica, în creștere, unii pe alții.



a)





c)

Fig. 4.1 Imagini macrografice ale sistemului strat – substrat: a) – 1 strat depus; b) – 2 straturi depuse; c) – 3 straturi depuse

Pentru urmărirea și analiza comportării aliajelor metalice 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 și variațiile curbelor de mediere $M(t)$ și $v(t)$ ale acestor valori.

- pentru valoarea experimentală a masei erodate cumulate:

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

- pentru curba analitică de mediere a valorilor experimentale ale masei erodate cumulate: [3], [6].

$$M(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \quad (2)$$

- pentru valoarea experimentală a vitezei medii de eroziune, aferentă perioadei intermediare:

$$v_i = \Delta m_i / \Delta t_i \text{ [mg/min]} \quad (3)$$

- pentru curba analitică de mediere a valorilor experimentale obținute pentru vitezele medii de eroziune [3], [6]:

$$v(t) = A \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-B \cdot t} \quad (4)$$

unde:

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

i - reprezintă numărul perioadei intermediare 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, folosite pentru construirea curbei de aproximație / mediere a acestora, cu condiția că abaterile 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 stabilit în programul Matchad, după un model construit în Laboratorul de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație din Timișoara [3], [6].

Relațiile folosite la determinarea abaterii medii standard σ și a granițelor $S(t)$ și $I(t)$, conform literaturii [6], adaptate la datele experimentale din diagrame, au formele:

-pentru abaterea medie standard:

$$\sigma = \left[\frac{\sum_{i=0}^{13} (M_i - M(t)_i)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}}, n = 13 \quad (5)$$

- pentru Intervalul de toleranță 99%:

$$S99(t) = M(t) + 1 \cdot \sigma ; I99(t) = M(t) - 1 \cdot \sigma \quad (6)$$

- pentru Intervalul de toleranță 90%:

$$S90(t) = M(t) + 10 \cdot \sigma ; I90(t) = M(t) - 10 \cdot \sigma \quad (7)$$

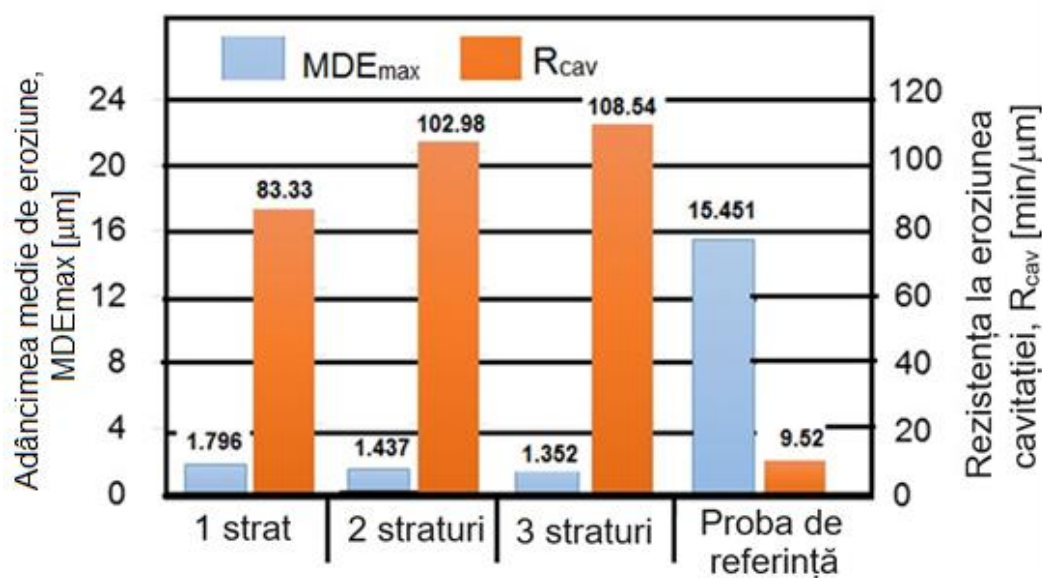


Fig 4.2 Histograma comparării rezistenței la eroziunea cavitației

Se menționează faptul că parametrii MDE_{max} și R_{cav} , indicați de ASTM G32-2016 [28], sunt determinați cu relațiile folosite în cutuma laboratorului nostru [3], [6]:

$$MDE_{max} = \frac{4 \cdot M_{max}}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \quad [\mu m] \quad (8)$$

$$R_{cav} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2}{4 \cdot v_s} \quad [min/ \mu m] \quad (9)$$

unde:

M_{max} - masa cumulată (fig.4.14);

ρ - densitatea oțelului, (7810 kg/m³);

d_p – diametrul suprafeței probei, supusă atacului cavitației (d_p = 15,8 mm);

v_s – valoarea vitezei spre care curba $v(t)$ tinde asimptotic (valoarea finală fig.4.15).

Din histograma prezentată în fig.4.2, rezultă:

- prin depunerea a 2 - 3 straturi din aliaj austenitic manganos, rezistența la eroziunea cavitației este net superioară structurii oțelului inoxidabil Duplex, rezultată prin aplicarea tratamentului termic de călire pentru punere în soluție (proba martor, de referință).
- după valorile celor doi parametri rezistența straturilor depuse, la solicitările microjeturilor cavitaționale crește față de cea a structurii oțelului tratat termic prin călire pentru punere în soluție de la 8.6 ori până la 11.4 ori, indiferent de parametrul la care ne raportăm MDE_{max} sau R_{cav} ;
- dintre cele trei regimuri, cea mai mare rezistență este obținută pentru regimurile 2 (cu două straturi) și 3 (cu trei straturi); diferența dintre rezistențele lor fiind nesemnificativă (de circa 6 % după MDE_{max} și de circa 5.4 % după R_{cav} - practic sunt în marja de eroare acceptată pentru mecanica eroziunii produse prin cavitație [3], [6];
- sporul de rezistență, la cavitație realizat de suprafețele cu două și trei straturi depuse, față de cea a suprafeței cu un singur strat depus, este de (23...30)%.

Procesul de încărcare dură prin sudare este însoțit de o pătrundere a elementelor componente ale materialului substratului în primul strat de metal depus. Așadar, diluția stratului depus se produce în urma amestecării cu substratul topit, și afectează într-o oarecare măsură proprietățile sale funcționale. E bine să se știe că diluția crește odată cu creșterea energiei liniare la sudare. Măsurarea gradului de diluție s-a făcut prin intermediul compoziției chimice, folosind analiza de dispersie în energie a razelor X (EDX) (fig.4.3). Relația de calcul este :

$$Gd = (Fewm - Fefm) / (Febm + Fefm) \times 100 = (81.02 - 75.10) / (65.27 + 75.10) \times 100 = 4.2 \%$$

unde:

Gd este gradul de diluție;

Fewm este conținutul de Fe în stratul depus, % masă;

Fefm este conținutul de Fe în materialul de adaos, % masă;

Febm este conținutul de Fe în materialul de bază, % masă.

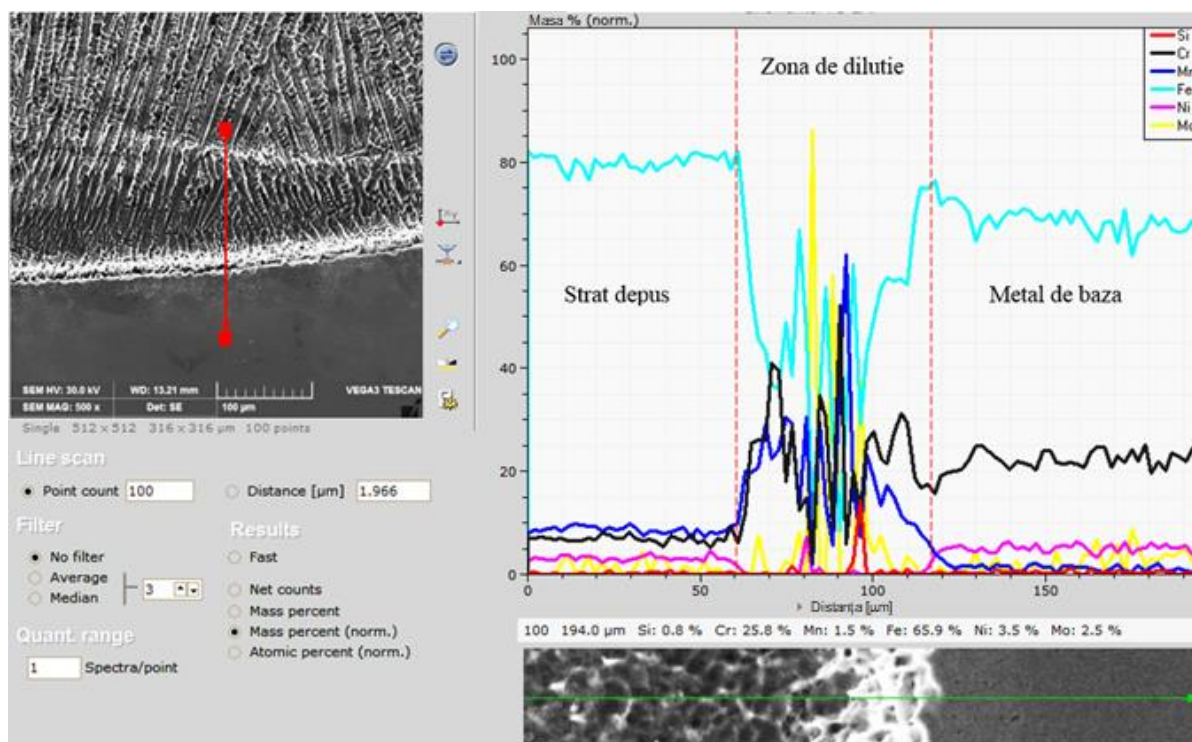


Fig.4.3 Imaginea SEM și profilele concentrației elementelor de aliere de o parte și de alta a interfeței dintre metalul depus și metalul de bază

Cap. 5 Concluzii finale și contribuții originale. Direcții viitoare de cercetare

Lucrarea de doctorat “**Microstructura și rezistența la eroziune prin cavitație a unor straturi depuse prin sudare pe oțeluri inoxidabile Duplex**” se înscrie în tendința actuală a cercetărilor din domeniile Ingineriei materialelor și Inginerie mecanice, de a găsi soluții **eficiente** care să permită **îmbunătățirea acestei proprietăți de suprafață** prin aplicarea unor tehnologii performante de **ingineria suprafețelor** și de a aprofunda mecanismul de degradare a suprafeței acestora în urma imploziei bulelor cavitaționale.

Principalele concluzii și contribuții originale ale lucrării pot fi sintetizate astfel:

1. Investigarea eroziunii prin cavitație constituie o problemă critică determinată de multitudinea factorilor care definesc hidrodinamica curgerii și starea structurală a materialului.
2. Oțelurile inoxidabile Duplex aflate în stare de călire pentru punere în soluție au o slabă rezistență la eroziunea produsă prin cavitație, comparativ cu alte oțeluri inoxidabile, fenomen care este atribuit prezenței feritei în microstructură și a interfețelor α/γ (ferită / austenită).
3. Depunerea prin sudare WIG în curent pulsant a unor straturi cu o grosime de 2 – 5 mm din aliaje Stellite 21” favorizează o creștere a rezistenței la eroziune prin cavitație de 7 – 11 ori, chiar și în primul strat durificat prin acest proces, el dovedindu-și fezabilitatea prin :
 - dozarea precisă a energiei introduse în material, fapt care asigură o bună legătură metalurgică strat – substrat;
 - o diluție scăzută a materialului de adaos cu materialul substratului (cca. 5.9 – 6.1%) care se justifică prin aportul scăzut de căldură;
 - o microstructură a învelișului alcătuită dintr-o matrice cu bază de Co și din carburi de Cr de tipul Cr_3C_2 și Cr_7C_3 și carburi de Mo;
 - o duritate a învelișului de 358 – 401 HV5, sensibil mai ridicată decât cea a substratului selectat, de aproximativ 275 ± 15 HV5.

4. Investigarea caracteristicilor microstructurale și a rezistenței la eroziune prin cavitație a straturilor din aliaj Corodur 65 depuse prin sudare WIG în curent pulsant, pe același material de referință a condus la următoarele observații:

- Parametrul de proces care influențează în cea mai mare măsură energia liniară și topirea materialelor selectate pentru strat și pentru substrat este curentul de sudare.

- Duritatea obținută la suprafața straturilor depuse este extrem de ridicată, atingând valori de cca. 810 HV5.

- Procesul de durificare, stabilit experimental, promovează în stratul de acoperire, reacții de precipitare a unor carburi complexe fin dispersate într-o matrice tenace de austenită.

- Precipitarea fazelor de carburi se produce atât în regiunile intercelulare cât și în cele interdendritice din zona de fuziune situată în imediata apropiere de metalul de bază.

- Profilul compoziției chimice, pe o direcție transversală față de cea de creștere celulară și dendritică, indică o mărire a concentrației în Cr și o scădere a concentrației în Fe în regiunea intercelulară.

- Comparativ cu metalul de bază, straturile din Corodur 65 depuse prin sudare WIG contribuie la o diminuare a pierderilor de masă de 4.01 - 8.1 ori și o reducere a vitezei de eroziune de 3.9 - 7.7 ori.

5. Procesul de încărcare prin sudare manuală cu arcul electric în curent pulsant, folosind aliaje austenitice manganoase cu sensibilitate ridicată la ecrisare mecanică, oferă oportunități de îmbunătățire a rezistenței la eroziune prin cavitație, datorate în principal următorilor factori:

- Parametrii stabiliți pentru procesul de sudare manuală cu arcul electric în curent pulsant asigură o reducere a căldurii introduse în material și o creștere a vitezei de răcire, limitând astfel gradul de diluție și fenomenele de precipitare a fazelor de carburi;

- În urma ecrisării mecanice a suprafeței, duritatea primului strat depus, afectat de diluție, are valori de 355 – 365 HV5, iar a celui de-al doilea și al treilea strat depus, atinge valori de 468 – 492 HV5;

- Microstructura ultimului strat depus este austenitică cu caracter celular – dendritică și cu o proporție mică de carburi întru-cât o mare parte din căldura dezvoltată la sudare este preluată de apa în care a fost plasată cea mai mare masă de material de bază;

- Capacitatea ridicată de ecrisare mecanică a aliajului austenitic manganos, selectat ca material de adaos, justifică îmbunătățirea semnificativă a rezistenței la eroziune prin cavitație a oțelului inoxidabil Duplex, considerat ca material de bază;

6. Investigațiile efectuate la microscopul electronic cu baleiaj au demonstrat că suprafețele durificate prin tehnicile de sudare folosite cu materialele de adaos selectate și testate la eroziune prin cavitație timp de 165 min. suferă o degradare uniformă a materialului și o penetrare mai mică a uzurii, comparativ cu materialul substratului.

7. Evoluțiile exponențiale pe prima parte, cu tendința de liniarizare pe a doua parte 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 solicitat de undele de șoc și de microjeturile cavitaționale, precum și efectul amortizant al șocurilor, creat de aerul / apa pătrunse în caverne în faza de comprimare a sistemului mecanic oscilator.

8. Prelucrarea statistică a datelor obținute la testele de cavitație atestă că în general distribuția punctelor experimentale față de curbele de aproximație este uniformă atât pentru adâncimea de pătrundere cât și pentru viteza de eroziune.

9. Pentru toate condițiile experimentale folosite, acuratețea ridicată a derulării testelor de eroziune prin cavitație vibratoare și a prelucrării rezultatelor este dovedită de valorile reduse ale abaterii medii standard și ridicate ale intervalului de toleranță.

10. Analizele EDX au evidențiat schimbările de compoziție chimică în primul și în ultimul strat depus, comparativ cu materialul de referință, contribuind la explicarea caracteristicilor microstructurale ale straturilor depuse și ale interfeței sistemului strat – substrat.

11. Difractia cu raze X a reliefat natura fazelor microstructurale formate în straturile de metal depus, care sunt responsabile de creșterea durității și implicit a rezistenței la eroziune prin cavitație.

Direcții viitoare de cercetare

1. Oportunități de îmbunătățire a rezistenței la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex prin aplicarea nitrurării în gaz la temperaturi înalte (1050 – 1200°C) urmată de o nitrurare la temperaturi joase (500 – 550 °C) și a tratamentului termochimic de carburare în vid.
2. Studiul corelației dintre mărimile de influență oferite de analiza fractală și datele testelor de eroziune cavitațională.

Bibliografie selectiva

1. Anton I.: Cavitația, vol. I, Editura Academiei RSR București, 1984;
2. Aribó S., Barker R., HU X., Neville A.: Erosion-corrosion behaviour of lean duplex stainless steels in 3,5% NaCl solution. Wear, vol. 302, 2013, pp. 1602 – 1608;
3. Bordeasu I., Pătrășcoiu C., Bădărău R., Sucitu L., Popoviciu M., Bălășoiu V. : New contributions in cavitation erosion curves modeling, FME Transactions Faculty of Mechanical Engineering, New Series, vol. 34, Nr.1/2006, YU ISSN 1451-2092, University of Belgrade, 2006, pp. 39-44;
4. Bordeasu I.: Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Teză de doctorat, Timișoara, 1997;
5. Bordeasu I.: Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2006;
6. Bordeasu, I.: Monografia Laboratorului de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, 1960-2020. Editura Politehnica, Timișoara, Romania, 2020;
7. Cojocaru V.: Cercetări privind creșterea duratei de viață a paletelor turbinelor hidraulice supuse la eroziune cavitațională, Teză de doctorat, Universitatea Eftimie Murgu din Reșița, 2013;

8. Coussement C.: Application industrielle de l'acier inoxydable duplex dans l'industrie pétrochimique - endommagement d'un serpentin de réacteur en duplex. *Revue de la soudure*, vol.2, 1994, pp.52-55;
9. 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, 1960;
10. Hrivnak I.: Duplex stainless steel and their welding, *Zvaranie*, nr. 3-4, 2002, pp.49-54;
11. Jurchela A.D.: Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel, Teza de doctorat, Timișoara, 2012;
12. Karabenciov A.,: Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil de crom, Teza de doctorat, Timișoara, 2013;
13. Koseki S., Inoue K., Morito S., Ohba T., Usuki H.: Comparison of TiN-coated tools using CVD and PVD processes during continuous cutting of Ni-based superalloys. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 283, 2015, pp. 353-363;
14. Lazăr, I.: Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziune prin cavitație a unor aliaje Cu-Zn și Cu-Sn, Teza de doctorat, Timișoara, 2020;
15. Madadi F., Ashrafizadeh F., Shamanian M.: Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 510, 2012, pp. 71 – 77;
16. Mânzână M.E.: Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație-eroziune în diferite materiale metalice, Teza de doctorat, București, 2012;
17. Messler R. W.: Principles of Welding - Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. WILEY- VCH Verlag GmbH Weinheim, 2004, pp. 49 – 154;
18. Micu, L.M.: Comportarea la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile duplex, Teza de doctorat, Timișoara, 2017;
19. Ming Q., Lim L.C, Chen Z.D.: Laser Cladding of nickel-based hardfacing alloys. *Surf Coating Technol*, vol.106, 1998, pp. 174-182;

20. Mitelea I., Budau V.: Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate, Editura de Vest, 1992;
21. Mitelea I., Dimian E., Bordeasu I., Crăciunescu C.M.: Ultrasonic cavitation erosion of gas nitrided Ti-6Al-4V alloys, Journal Ultrasonics Sonochemistry, 21, 2014, pp.1544 – 1548;
22. Mitelea I.: 2009 *Materiale ingineresti*, Editura Politehnica, Timișoara, România;
23. Mitelea I.: Știința materialelor, vol.I, Editura Politehnica, Timișoara, 2009;
24. Popoviciu M., Bordeasu I.: Cavitation resistance evaluation for materials used in ship propellers and hydraulic turbine manufacturing, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice, Timișoara, Vol 39, Nr.53, Fascicula 1-2, 1994;
25. Steller J.K.: International cavitation erosion test – summary of results, ImechE Cavitation Conf., 1992, pp.95-102;
26. Thakur A., Gangopadhyay S.: Influence of tribological properties on the performance of uncoated, CVD and PVD coated tools in machining of Incoloy 825. Tribology International Vol. 102, 2016, pp.198-212;
27. Trușculescu M., Ieremia A.: Oțeluri inoxidabile și refractare, Editura Facla, Timișoara, 1983;
28. *** Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32, 2016;