

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

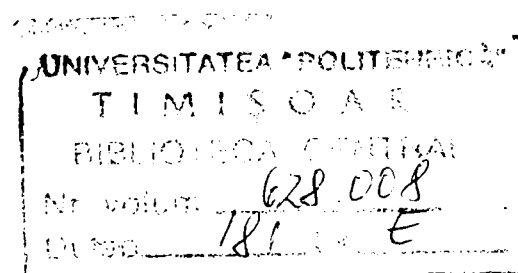
**MORFOLOGIA ȘI PROPRIETĂȚILE
STRATURILOR DIN PULBERI METALICE
DEPUSE PRIN SUDARE ÎN PLASMĂ**

Teză de doctorat

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific:
Prof.dr.ing. Ion Mitelea

Autor
Ing Richard Molnar



Timișoara
2000

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

**MORFOLOGIA ȘI PROPRIETĂȚILE
STRATURILOR DIN PULBERI METALICE
DEPUSE PRIN SUDARE ÎN PLASMĂ**

CAPITOLUL 1. ABORDAREA SISTEMICĂ A TEHNICII STRATURILOR SUBȚIRI

1.1. Introducere

Dezvoltarea tehnologică și industrială a ultimilor 50 de ani a impus dezvoltarea de noi materiale, cu proprietăți de exploatare care să satisfacă condiții de exploatare deosebit de variate - solicitări mecanice statice și dinamice în condiții de coroziune și temperatură ridicată, medii corozive etc. Deoarece nu toate materialele masive (omogene din punct de vedere macro- și microscopic) pot să satisfacă asemenea condiții de solicitare extreme, iar în cazul în care pot au prețuri de cost deosebit de ridicate, s-a impus dezvoltarea unor noi familii de materiale care să asigure prețuri de cost competitive din punct de vedere economic, având mase inerțiale reduse și proprietăți de exploatare similare sau apropiate organelor de mașini realizate din materiale masive. Acestea au o structură compusă, unele dintre ele fiind denumite materiale compozite.

În familia materialelor compozite, cele cu straturi funcționale sunt proiectate pentru a satisface condițiile de solicitare mecanică ale organului de mașină pe care îl alcătuiesc în condițiile satisfacerii solicitărilor cu caracter special ale interfeței lor cu mediul ambiant.

Acesta este motivul pentru care studierea și explicitarea problemelor ridicate de numeroasele familii de compozite în soluție cu straturi funcționale este de un interes cert pentru lumea științifică și inginerescă pe plan mondial.

Pentru eficientizarea studiului sistemelor compozite cu straturi, abordarea sistemică este un element indispensabil, dat fiind numărul deosebit de ridicat de parametri care trebuie luați în considerare într-o analiză clară, ordonată a procedurilor, materialelor, fenomenelor de natură metalurgică și a interdependențelor ce există între acestea.

De aceea, prezentul capitol al tezei de doctorat își propune să prezinte și abordeze principalele procedee de realizare a sistemelor compozite de tip strat - substrat într-o manieră organică, în ideea reflectării principalelor interdependențe ce există între materialul substratului, al stratului și procedeul de realizare al materialului (sistemului) compozit.

1.2. Conceptul de material compozit

Elementele prezente în alcătuirea structurilor și organelor de mașini sunt supuse unor solicitări volumice de tip static sau dinamic de tipul tensiunilor mecanice, respectiv la solicitări de suprafață de natură mecanică sau chimică.

Sistemele mecanice pot suporta - din cauze foarte diferite - solicitări mecanice, termice, sau chimice extreme, care să aibă ca și consecință suprasolicitarea mecanică prin deformări inadmisibile a anumitor componente ale sistemului, dar marea majoritate a defectărilor se datorează efectelor solicitărilor de suprafață de tipul uzării, frecării și coroziunii de diferite feluri. Uzarea, frecarea și coroziunea duc la alterări locale sau generale ale unor elemente funcțional critice de proiectare cum sunt secțiunea eficientă de preluare a sarcinilor de exploatare, inducerea unor concentratori de tensiune sau modificarea unor proprietăți de suprafață care favorizează apariția altor mecanisme de degradare, foarte agresive.

Solicitările exterioare se suprapun acestora foarte des, influențându-se reciproc și ducând în consecință la apariția unor stări de solicitare mecano-termo-chimice deosebit de complexe, ce au ca rezultat apariția simultană a mai multe tipuri de defecte.

În timp ce preluarea solicitărilor mecanice se soluționează prin dimensionarea mecanică folosind materiale cu proprietăți mecanice adecvate dar cu costuri relativ reduse, proprietățile de suprafață se pot asigura în majoritatea cazurilor uneori prin utilizarea unor materiale scumpe, care să satisfacă condițiile de exploatare ale produsului (componentei) în mediul de lucru pe întreaga durată de viață normată, fără scăderea capacității portante sau a funcționalității sale.

Utilizarea materialelor care să permită atât preluarea solicitărilor mecanice cât și a solicitărilor superficiale duce la ridicarea prețurilor de cost. Tehnologia straturilor de suprafață este soluția care permite realizarea în condiții de cost favorabile a unor sisteme compuse sau compozite care utilizează materiale cu costuri relativ reduse - substrat - (rezistență mecanică, tenacitate) acoperite cu materiale valoroase ce satisfac funcțiunile de protecție - strat. Tehnologiile de acoperire admit premise ideale (grosime de strat, compactitate, aderență, funcționalitate) precum și posibilități nelimitate de acoperire a materialelor substrat cu materiale funcționale valoroase.

Combinarea a cel puțin două materiale cu proprietăți diferite realizate în tehnologia straturilor de suprafață duce la formarea materialelor compuse. Spre deosebire de acestea, materialele compozite sunt amestecuri de două sau mai multe componente ale căror proprietăți acționează sinergic și se completează reciproc rezultând materiale cu proprietăți superioare celor specifice fiecărei componente în parte.

În această familie intră materiale cu proprietăți bine definite, care satisfac diferite familii de proprietăți funcționale bine definite, formând un sistem încheiat. Figura 1.1 prezintă elementele care alcătuiesc sistemul material compozit.

Forma acestora (particule, fibre, plăci) este - alături de natura materialelor matricei și armăturii - definitorie pentru proprietățile de exploatare. Ele determină

- izotropia sau anizotropia proprietăților mecanice
- izotropia sau anizotropia proprietăților termice
- izotropia sau anizotropia proprietăților electrice ale materialului
- rezistența la șocuri termice și mecanice

- alte proprietăți fizice care determină proprietățile de exploatare [2].

Cu toate că există multe tipuri de materiale compozite, ele se bazează pe un număr redus de soluții de principiu. Figura 1.2 indică principalele soluții tehnice de realizare a materialelor compozite (familii de materiale compozite) funcție de modul de fabricație al materialului precum și unele aplicații industriale tipice ale acestora.

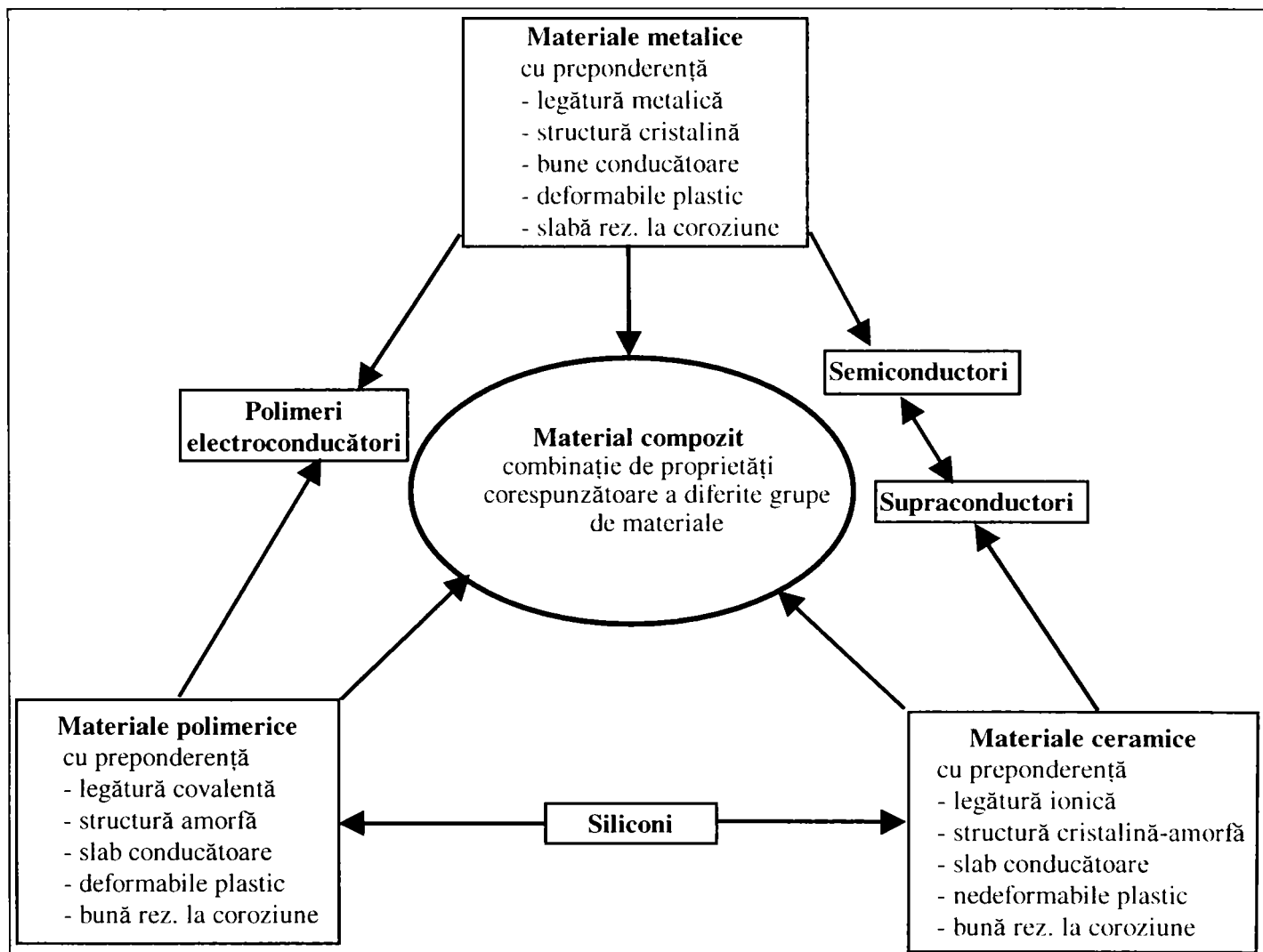


Figura 1.1. Elemente, legături și determinări în sistemele compozite

Pe lângă aspectul structural (macroscopic), în conceperea, dezvoltarea și exploatarea unui material compozit trebuie luați în considerare și alți factori, de natură chimică (metalurgică).

Din familia materialelor compozite, cele realizate în tehnica straturilor de suprafață cu strat compus formează un caz aparte. Tehnologiile de acoperire își au, în cadrul familiilor de tehnologii de acoperire, propriul loc bine determinat.

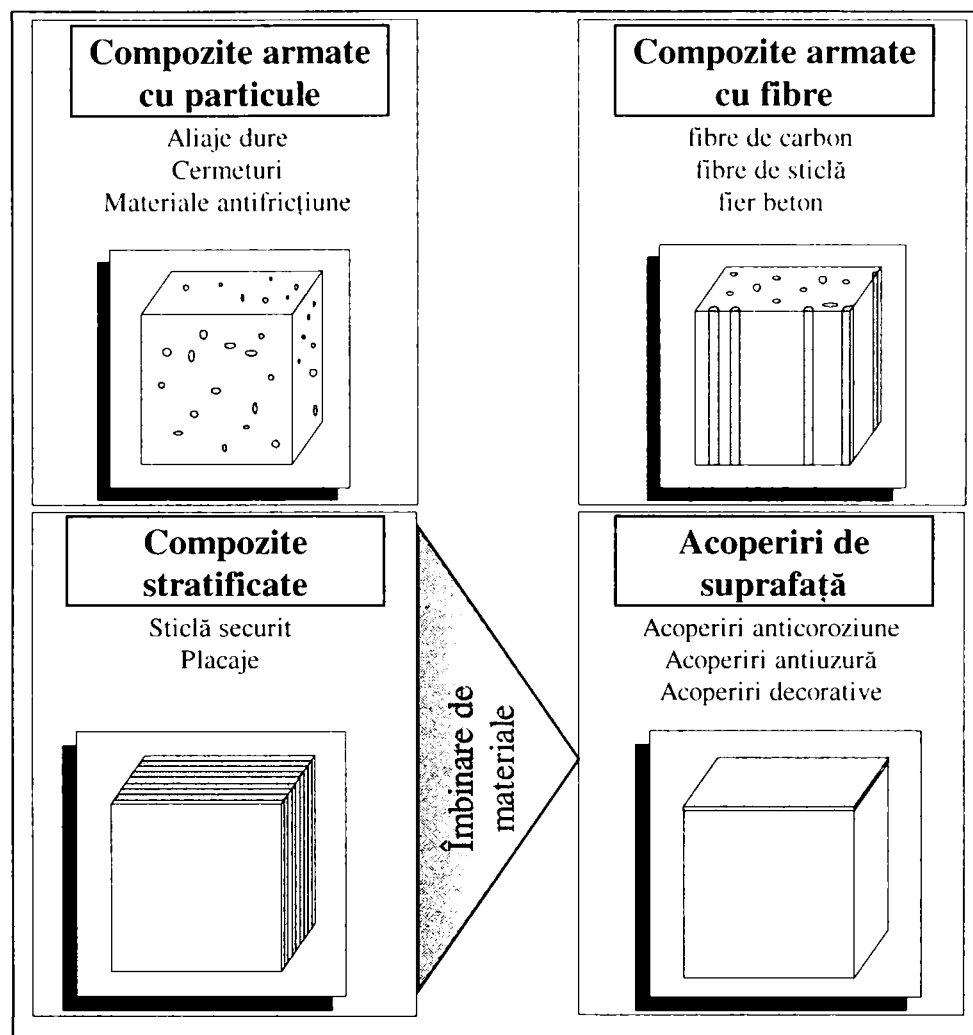


Figura 1.2. Structura sistemelor compozite

Elementul determinant al modului în care sistemul compozit matrice - armătură preia solicitările de tip mecanic ale mediului de lucru este determinat și de natura, dimensiunile și diluția elementelor de ranforsare. Limitele superioare ale solicitărilor de suprafață sunt determinate atât de proprietățile mecanice ale matricei și ranforsării, de gradul de dispersie al ranforsării în matrice și calitatea interfeței matrice - ranforsare, cât și de eventualele fenomene metalurgice ce au loc pe interfață.

1.2.1. Materialele compozite armate cu fibre și particule

Materiale compozite armate cu fibre. Principii de calcul.

Compozitele armate cu fibre se caracterizează prin preluarea tensiunilor mecanice prin tensiunile de pe interfața matrice armătură și au ca fundament ideea că atât deformarea matricei cât și a fibrelor este egală cu cea a materialului compozit (indice m - matrice, indice f - fibre):

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad (1.1)$$

motiv pentru care sarcina se poate considera a fi distribuită proporțional cu fracția volumică a matricei, respectiv a armăturii:

$$\sigma_c = \sigma_m * V_m + \sigma_f * V_f \quad (1.2)$$

Deformarea compozitelor se desfășoară după una din următoarele modele:

- Matricea și fibrele se deformează elastic
- Matricea se deformează plastic iar fibrele se deformează elastic
- Matricea și fibrele se deformează plastic

Cazul deformării fibrelor în domeniul plastic iar al matricei în domeniul elastic nu se regăsește în practica industrială curentă. În cazul deformării elastice a fibrelor și a matricei efectul de durificare este dependent de fracțiunea fazelor dure și se manifestă la o proporție minimă a acestora:

$$V_{\min} = \frac{\sigma_{Bm} - \sigma_m}{\sigma_{Bf} - \sigma_m} \quad (1.3)$$

căreia îi corespunde o modificare a modulului de elasticitate (relația (4)) și a rezistenței mecanice (relația (5))

$$E_c = E_f * V_f + E_m * V_m \quad (1.4)$$

$$\sigma_B = \sigma_{Bf} * V_f + \sigma_m * V_m \quad (1.5)$$

Materialele de formare a matricei sunt în marea majoritate a cazurilor de natură metalică iar armătura de tip ceramic (fibre lungi, whiskers sau particule de diferite dimensiuni). După cum este de remarcat din punctul de vedere al preluării solicitărilor mecanice, sistemele folosind straturi superficiale nu sunt materiale compozite propriuzise în ceea ce privește modul de preluare al solicitărilor mecanice din exploatare.

Se recurge în general la acoperirea substratului cu un al doilea material care aderă puternic la acesta și îi oferă proprietățile de suprafață dorite. Există un mare număr de procedee și metode pentru realizarea acoperirilor, care se pot clasifica după diferite criterii. Cele mai uzuale sunt:

- depunerea din fază gazoasă (condensare, reacție),
- depunerea din fază lichidă (imersare, pulverizare, depunere electrolică, sudare)
- depunerea din stare solidă (laminare, placare prin explozie).

În practica industrială se utilizează trei metode de modificare a suprafeței materialului substratului:

- aplicarea unui strat pe suprafața substratului;

- modificarea compoziției chimice a suprafeței substratului pe o adâncime convenabilă
- modificarea structurii suprafeței fără schimbarea compoziției chimice.

Modul de aplicare al stratului funcțional determină în mod radical proprietățile sale de exploatare. Metoda utilizată condiționează:

- structura și porozitatea stratului - care limitează utilizarea compozitului în medii corozive și
- aderența stratului - care condiționează comportarea compozitului la solicitări de muchie, oboseală de contact și termică, respectiv forfecare a interfeței strat - substrat.

Prezența unor mecanisme difuzionale între matrice și armătură accentuează sau atenuează principalele caracteristici funcționale ale straturilor. Mecanismele difuzionale accentuează proprietăți funcționale ca aderența și rezistența la șoc termic, pe când formarea compușilor chimici (în general faze dure) pe interfața matrice - elemente de ranforsare duce la scăderea proprietăților de exploatare urmărite.

Straturile superficiale reprezintă trecerea de la compozite la corpurile masive; cu toate acestea, pe baza definiției acceptate, conform căreia un material compozit este un sistem unitar format din cel puțin două materiale cu proprietăți diferite, nu sunt materiale compozite din punctul de vedere al preluării solicitărilor mecanice volumice din exploatare, au o comportare tipică compozitelor în ceea ce privește preluarea solicitărilor superficiale.

Sistemele strat funcțional - substrat nu sunt materiale compozite în adevăratul sens al cuvântului. Ele preiau din conceptul de material compozit ideea transferului unei solicitări a sistemului (în general mecanică) către substrat, în timp ce solicitările superficiale (rezistența la oxidare, uzare, coroziune etc.) revin stratului funcțional. Stratul funcțional din sistemele "compozite" de tip strat - substrat are capacitatea de a satisface cele mai variate condiții de exploatare:

- protecție anticorozivă
- protecție antiuzură în tot spectrul de temperaturi
- proprietăți speciale (optice, biologice sau supraconductoare)

Varietatea mare a aplicațiilor industriale face ca natura materialelor și a procedeelelor de realizare a straturilor funcționale să fie foarte mare.

Spre deosebire de sistemele compozite cu straturi superficiale, care au ca funcționalitate accentuarea unei proprietăți de suprafață, celelalte trei sisteme (figura 1.2) sunt utilizate pentru preluarea tensiunilor mecanice în condiții specifice sau extreme de exploatare. Materialele compozite clasice (ranforsate cu particule, cu fibre și compozitele stratificate) sunt destinate ridicării proprietăților mecanice în mod anizotrop sau izotrop.

Compozitele ranforsate cu particule permit prin diferitele sisteme de ranforsare - particule foarte mici sau particule mari - obținerea unor proprietăți de rezistență mecanică deosebit de ridicate. Mecanismul de accentuare a rezistenței mecanice diferă în funcție de dimensiunile fazei dure:

- ranforsare cu particule mici: limitarea drumului liber mediu al dislocațiilor în material și creșterea densității de dislocații pe limitele fazelor durificatoare.
- ranforsare cu particule mari: solicitările mecanice sunt preluate în majoritatea cazurilor de către materialele de ranforsare (faze dure - carburi metalice, oxizi ceramici) iar matricea metalică asigură coerența, stabilitatea și integritatea sistemului compozit.

Compozitele de tip strat funcțional care realizează structura de material compozit cu matrice metalică armat cu faze dure în strat sunt un caz foarte frecvent în practica industrială. Aceasta este soluția ideală în realizarea straturilor antiuzură prin sudare, atât cu scop de fabricație cât și cu scop de reparații în aplicațiile cu solicitări ce au și componente de tipul uzării abrazive.

1.3. Elementele componente ale sistemului

Complexitatea fenomenelor ce au loc la realizarea (sinteza) structurilor compuse cu straturi, precum și complexitatea comportamentului lor în condiții de solicitare complexe (solicitări de natură mecanică, chimică sau termică) impune abordarea materialelor de acest tip de o manieră sistemică. Această abordare trebuie să aibă în vedere toate elementele ce alcătuiesc structurile compuse, legăturile dintre ele, precum și modul în care procedeul de realizare (fabricare) al stratului afectează proprietățile funcționale ale acestuia.

Stratul subțire abordat într-o manieră sistemică este constituit din elementele definatorii ale sistemului:

- strat;
- substrat;
- procedeu de acoperire;
- proprietățile materialului stratului;
- interdependențele ce leagă elementele de mai sus și care definesc proprietățile de exploatare (funcționale) ale stratului.

Figura 1.3 descrie structura de sistem a structurilor compuse realizate cu straturi subțiri și legăturile dintre ele, care definesc proprietățile sistemului compus [1].

Elementele sale "material substrat" și "material strat" sunt definite de proprietățile mecanice și termofizice, în timp ce pentru definirea proprietăților funcționale ale stratului va trebui avut în vedere procedeul de acoperire și fenomenele metalurgice ce au loc între materialul stratului și substratului.

Materialul de bază (substratul) determină proprietățile de strat prin două familii de elemente: proprietățile termofizice fundamentale ale materialului și geometria corpului (produsului) cărui îi este destinat stratul funcțional.

Proprietățile mecanice ale substratului sunt definatorii pentru alegerea sau respingerea unui procedeu de realizare a straturilor funcționale. Procedeurile de acoperire utilizate nu trebuie ca prin aportul lor termic să ducă la o scădere periculoasă a proprietăților

mecanice (limita de curgere $R_{p0,2}$) ale substratului, reducere determinată de modificările stării de tratament termomecanic în care se regăsește acesta.

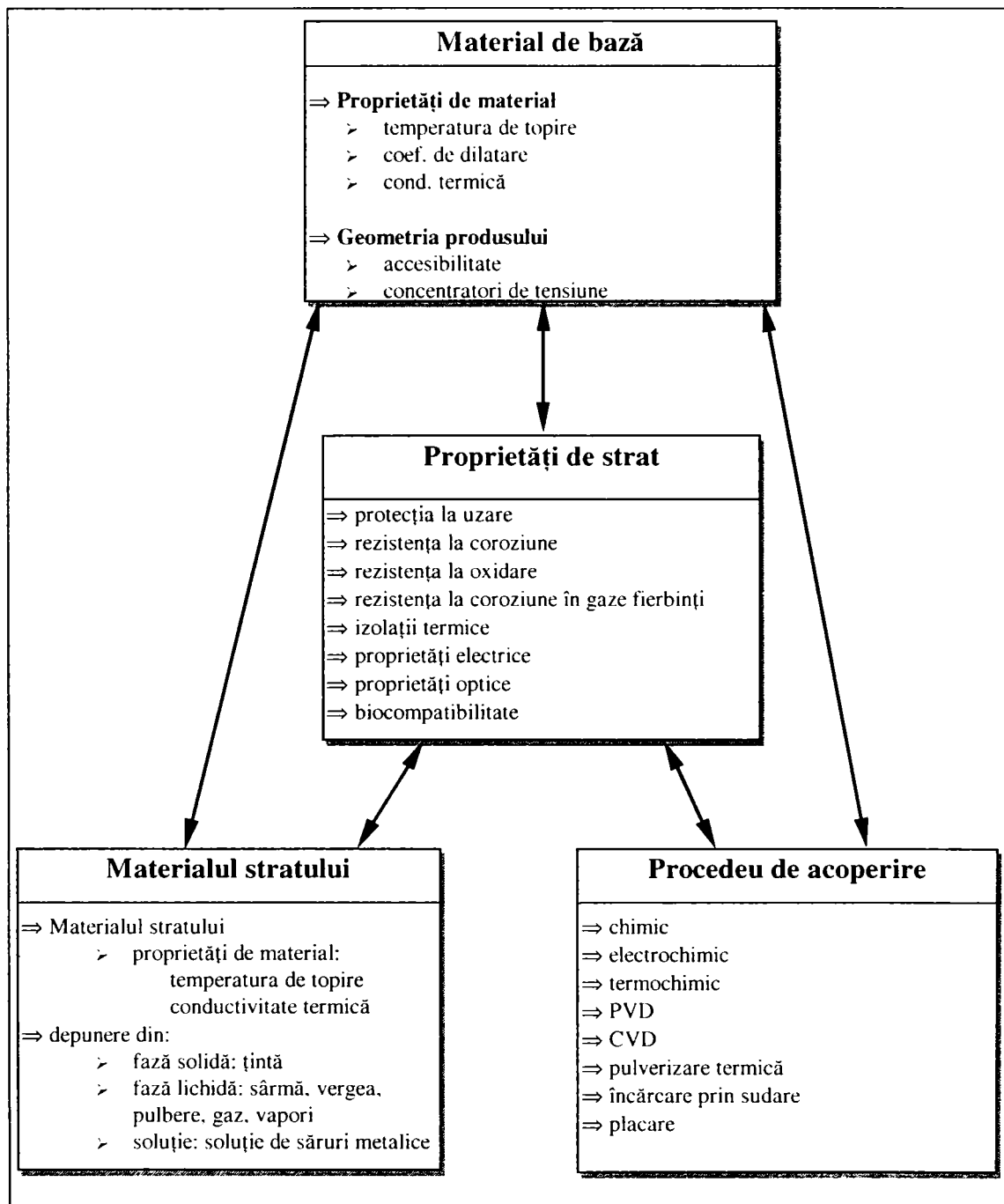


Figura 1.3. Structura de sistem a straturilor subțiri

Depunerea unor materiale cu temperatură de topire foarte ridicată (carburi, oxizi ceramici) pe un substrat cu temperatură de topire moderată în condițiile unei incompatibilități metalurgice avansate creează probleme deosebite la procedeele cu formare de topituri. Soluția ideală pentru aceste aplicații sunt procedeele care evită topirea substratului, cum sunt pulverizarea termică, procedeele CVD, PVD sau galvanice.

Asemănător modificării (scăderii) unor proprietăților mecanice ale sistemului cu structură compusă datorate solicitării termice a substratului (tratamente termochimice,

CVD, PVD, sudare, pulverizare termică), alte procedee de acoperire pot duce la fragilizări ale substratului datorate absorbției de hidrogen.

1.3.1. Proprietăți termofizice ale materialului substratului:

a. Temperatura de topire:

Temperatura de topire a substratului afectează procedeul și parametrii depunerii. Cum majoritatea procedeele de acoperire utilizează metode termice, proprietățile termice ale substratului (conductivitatea/difuzivitatea termică, temperatura de topire) sunt elementele ce permit sau nu utilizarea unui sau altui procedeu de încărcare.

Temperatura de topire a substratului trebuie asociată conductivității termice acestuia, iar cei doi parametri vor determina gradul de topire și nivelul diluției (amestecului) și implicit proprietățile stratului la procedeele cu topirea substratului. Procedeele utilizate vor trebui să limiteze prin aportul energetic (diluție) gradul de modificare al proprietăților funcționale ale stratului funcțional. Conductivitatea termică, electrică și coeficientul de dilatare al materialului substratului limitează utilizarea unor materiale și procedee de acoperire.

Coeficientul de dilatare, atât al materialului de bază cât și al celui funcțional, este elementul care - alături de temperatura de depunere a stratului funcțional - determină starea de tensiuni în depunere. Tensiunile termice reziduale de pe interfața strat-substrat sunt, alături de fisuri, cele care determină capacitatea de preluare a sarcinilor din exploatare. Ele sunt proporționale atât cu intervalul de temperaturi pe care stratul și substratul îl parcurg la răcire, cât și cu diferența coeficienților de dilatare dintre cele două materiale. Tensiunile de interfață sunt de forfecare, iar valorile pot ajunge la limita de forfecare a acesteia. Reducerea tensiunilor termice de interfață se face prin:

- preîncălzirea substratului
- modificarea unor parametri tehnologici de regim
- asigurarea răcirii lente

b. Conductivitatea termică:

La procedeele de acoperire care nu impun preîncălzirea substratului la temperatura de regim a procedeeului de acoperire, conductivitatea termică a substratului controlează viteza de răcire a stratului. Modificările vitezei de răcire a stratului în timpul și după acoperire afectează drastic microstructura acestuia, cu efecte imediate asupra unor proprietăți de exploatare ale acestora.

c. Conductivitatea electrică:

Conductivitatea electrică este proprietatea de material care permite sau nu utilizarea unor procedee de acoperire care necesită conductivitatea electrică a substratului (sudare, variante ale PVD). Depunerea pe materiale izolatoare electric este posibilă doar prin procedee de tipul CVD, variante ale PVD și pulverizare termică. Conductivitatea electrică echivalentă determinată pe baza conductivităților electrice ale componentelor

ce alcătuiesc sistemul cu structură compusă poate caracteriza sistemul din punct de vedere compozițional.

1.3.2. Geometria componentei de acoperit

Geometria componentei de acoperit completează în sens pozitiv sau negativ efectul coeficienților de dilatare, al conductivității termice al materialului de bază și stratului. Elemente geometrice ca muchii, racorduri și orificii sunt determinante pentru capacitatea unui sistem compozit de tip strat-substrat de a prelua solicitările mediului în care sistemul este exploatat.

1.4. Materiale pentru substrat și strat

Orice material, metalic sau nemetalic cu caracteristici funcționale utile este potențial adecvat realizării funcțiunilor stratului, respectiv substratului. Acestea se aleg dependent de condițiile mecanice (substratul) de exploatare ale sistemului (strat - substrat) și derivă din dimensionare prin calcule de rezistență, respectiv din condițiile de expunere a interfeței sistem - mediu la agenții agresivi ai mediului de lucru - chimici, mecanici etc. - stratul.

Natura materialului stratului sau substratului este aleasă de proiectant și are în vedere caietul de sarcini al produsului care se execută. Materialul substratului are rolul asigurării proprietăților mecanice ale sistemului strat-substrat în exploatarea produsului.

1.4.1. Materiale pentru formarea substratului

Cu toate că aparent alegerea substratului este facilă (un număr ridicat de materiale poate satisface un set bine definit de condiții de exploatare specifice), selecția materialului se face dependent de condițiile volumice de exploatare ale produsului: temperatură de lucru, condiții mecanice de solicitare (oboseală, fluaj, șocuri etc.).

Elementul de pornire în proiectarea unui organ de mașină cu straturi funcționale este alegerea materialului de substrat care - în condițiile utilizării procedeelor de realizare a straturilor funcționale disponibile compatibile cu acesta - asigură prețuri de cost minime de materiale și manoperă, suplimentar satisfacerii condițiilor de proiectare respectiv a neafectării sale de către procedeul de acoperire.

De aceea, independent de condițiile de exploatare, substratul este în marea majoritate a cazurilor un oțel carbon sau slab aliat, cu sensibilitate redusă la fenomene generate de factorii ce afectează sistemul în ansamblu (solicitări mecanice, degradare termică, fluaj, oboseală etc.).

Familia materialelor substrat este foarte vastă, incluzând practic toate materialele ingineresti. Alegerea materialului de bază este limitată de principiul procedeului de

realizare a stratului funcțional, conductivitatea electrică, stabilitatea termică, rezistența la oxidare sau coroziune în mediul în care se exploatează stratul funcțional etc.

Un alt element de mare importanță care trebuie avut în vedere la alegerea substratului este compatibilitatea sa chimică și/sau metalurgică cu substratul în condițiile de exploatare ale produsului, care simplifică tehnologia de realizare a stratului funcțional.

Materialele utilizate efectiv la asigurarea funcțiilor substratului se aleg dependent de celelalte condiții de exploatare ale compozitului, grosimea stratului precum și solicitările complementare celei principale.

Principalele familii de materiale de formare a straturilor funcționale utilizate în practica curentă pe familii de aplicații sunt:

- mase plastice, caracterizate de:
 - vâscozitate foarte ridicată
 - componente exploatare la temperatura ambiantă (componente reflectorizante pentru radiație în domeniul vizual sau RF);
 - elemente puțin solicitate;
 - stabilitatea termică redusă → număr redus de procedee de acoperire
 - procedee fără solicitări termice semnificative.
 - stratul funcțional este depus prin procedee chimice (precipitare) sau termice (pulverizare termică, implantare ionică).

Principala aplicație se regăsește în designul industrial, asigurarea unor proprietăți optice speciale, și este în continuă creștere datorită numărului mare de avantaje pe care masele plastice și compozitele plastice le au: masă specifică redusă, proprietăți mecanice ușor de controlat prin procesul tehnologic de fabricație, rezistență la un număr ridicat de agenți corozivi, proprietăți de tenacitate excelente la temperaturi reduse.

- materiale metalice - formează substratul în marea masă de aplicații industriale a straturilor funcționale.
 - aliaje cu baza fier (oțeluri);
 - straturi funcționale aparținând tuturor familiilor de materiale;
 - Proprietățile de exploatare ale substraturilor acoperă o plajă deosebit de largă de proprietăți fizico-chimice,
 - temperaturi din domeniul criogenic ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) până la temperaturi apropiate de temperatura de topire a aliajelor ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)
 - medii agresive de la oxidante la acide și bazice, mai mult sau mai puțin corozive.

Principalele aliaje metalice au baza Fe, Ni, Cu și Co, celelalte materiale metalice de importanță industrială fiind utilizate numai sub formă de aliaje, cum sunt Ti, Co, Ta etc. Materialele substrat sunt în general aliaje caracterizate prin aptitudinea denumită *sudabilitate* (capacitatea de a prelua șocuri termice și suporta modificări microstructurale locale fără degradarea ireversibilă a proprietăților de exploatare).

Aliajele fierului:

Reprezintă principala clasă de materiale ingineresti de formare a substraturilor în practica industrială. Între acestea, cu toate că se pot regăsi toate familiile de aliaje, oțelurile carbon și slab aliate reprezintă - prin preponderența evidentă în comparație cu celelalte aliaje - categoriile predominante. Prin proprietățile lor mecanice și de suprafață relativ scăzute oțelurile carbon reprezintă substratul a peste 95% din materialele acoperite cu straturi funcționale prin procedee termice.

Oțelurile carbon sunt principalele materiale ingineresti utilizate în practica industrială fiind caracterizate de următoarele elemente:

- elementul principal de aliere este carbonul
- elemente tehnologice siliciu și mangan.
- - proprietățile mecanice au valori reduse și medii, dependente de proporția masică de carbon:

$$R_m = 700 * C + 260 \quad (1.6)$$

- se utilizează în aplicații în care nu se impun alte proprietăți speciale (stabilitatea termică și mecanică la cald (peste 500 °C), asigurarea tenacității la temperaturi reduse etc.)

Oțelurile slab aliate au ca elemente de aliere Mn, Si, Cr, Ni, V, W, Nb, Ti (suma proporției elementelor de aliere sub 5%). Adăosul de elemente de aliere urmărește accentuarea unor efecte specifice pe care elementele de aliere menționate îl au asupra anumitor proprietăți de exploatare:

- stabilitatea la temperaturi ridicate (Cr, Mo, V, W, Ti);
- tenacitatea la temperaturi reduse (Ni);
- rezistența la uzare (Cr, W, V, Ti, Nb)
- rezistența la coroziune atmosferică (Cu) etc.

Efectul elementelor de aliere este complex și este determinat de modificarea punctelor de transformare alotropică, schimbarea vitezelor critice de călire și modificarea mecanismelor de transformare în stare solidă.

Fazele dure prezente în aceste oțeluri care le conferă caracteristici de exploatare distincte sunt soluții solide cu precipitări de carburi din cele două categorii:

- tipul I - M_3C , $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C ;
- tipul II - MC și M_2C .

În timp ce carburile din grupa I au o rețea cristalină complexă și sunt relativ ușor solubile în austenită, carburile din grupa II au o stabilitate termică ridicată determinată de rețeaua cristalină simplă. Principalele oțeluri slab aliate utilizate ca substrat în realizarea sistemelor cu straturi funcționale sunt oțelurile de granulație fină de înaltă rezistență și oțelurile termorezistente

Oțelurile înalt aliate au ca principale elemente de aliere Cr și Ni, mai rar V. Structura lor microcristalină, proprietățile mecanice și funcționale sunt afectate în principal de conținutul de crom și nichel, care deplasează puternic punctele de transformare polimorfă ale oțelurilor, care devin monofazice sau bifazice și suferă sau nu

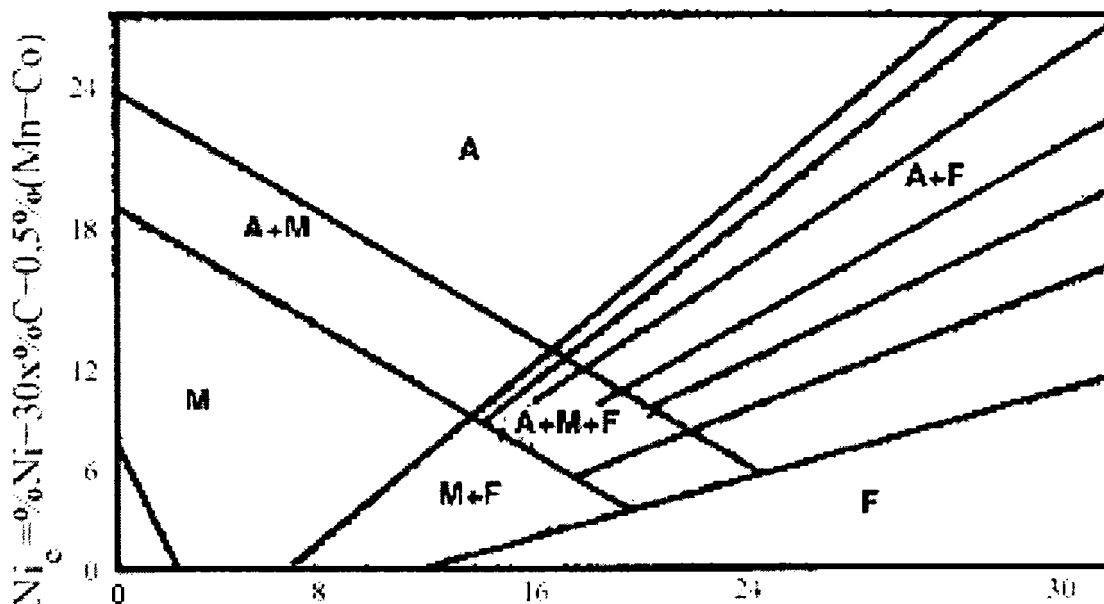
transformări în stare solidă. De aceea, studiul acestor oțeluri se face în baza diagramelor Schäffler și DeLong - figura 1.4 și figura 1.5.

Valorile cromului echivalent Cr_e și nichelului echivalent Ni_e iau în considerare efectele austenitizante, respectiv feritizante ale elementelor de aliere prezente în compoziția chimică a acestor aliaje după cum urmează:

$$Cr_e = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb \tag{1.7}$$

$$Ni_e = Ni + 0,5 Mn + 30 C + 0,5 Co + (30-X) N \tag{1.8}$$

În care X ia valori diferite în funcție de conținutul de crom



$$Cr_e = \%Cr + 1,5\%Si + \%Mo + 0,5\%(Ta+Nb) + 2\%Ti + \%W + \%V + \%Al$$

Figura 1.4 - Diagrama Schäffler

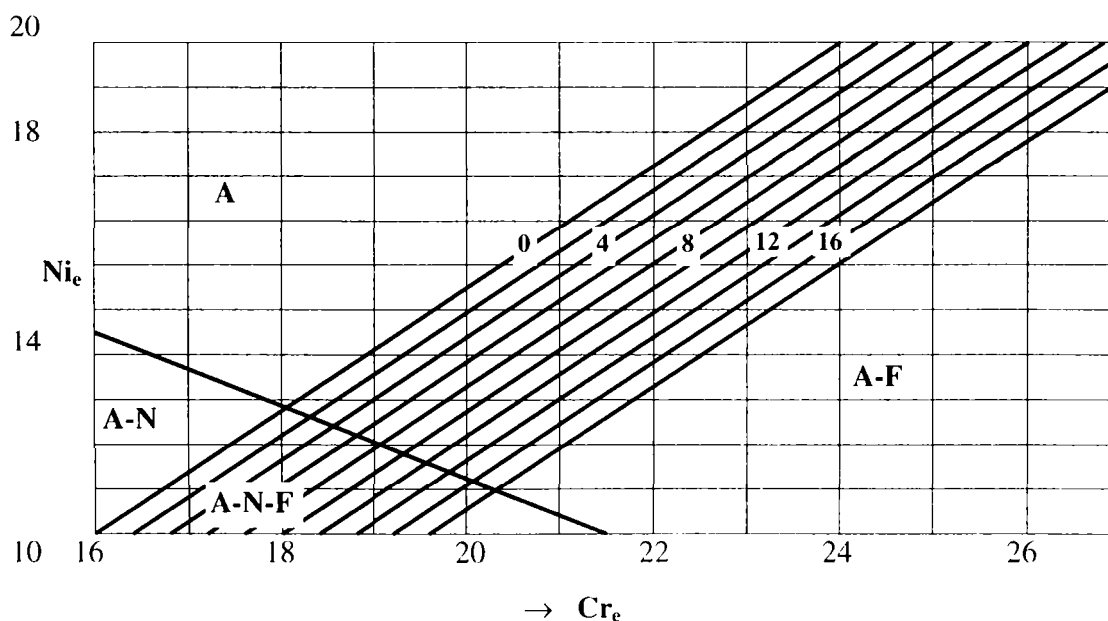


Figura 1.5 - Diagrama DeLong

Proprietățile oțelurilor înalt aliate variază într-o plajă largă, acoperind domeniul de temperaturi de la $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ până la $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, în medii acide și bazice de la temperatura de ambiantă până la cea de fierbere și până la rezistență la solicitări mecanice deosebite de tipul uzării și fluajului, a oxidării la cald.

Aliajele nichelului:

sunt aliaje din sistemul NiCr (Inconel, Incolloy: $\sim 14\%$ Cr), NiCu (Monel: 27 - 32% Cu) și NiMo (Hastelloy: 16 - 32% Mo), cunoscute îndeosebi prin denumirile lor comerciale. Principalele mărci de aliaje cu baza Ni sunt prezentate în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Principalele aliaje de nichel de utilizare industrială

| Aliaj | Simbolizare | Compoziția chimică, % | | | | | | | |
|-------------|------------------|-----------------------|-----------|------|---------|----|-----------|-----------|-------|
| | | Ni | Cr | Fe | Mo | Nb | Al | Ti | Cu |
| Ni 99,8 | | >99,8 | | | | | | | |
| Inconel 600 | Ni Cr15 Fe | >72,0 | 14-17 | 6-10 | | | | | |
| Inconel 625 | Ni Cr22 Mo9 Nb | 61 | 22 | | 9 | 4 | | | |
| Incoloy 800 | X10 NiCrFe 32 20 | 30-35 | 19-23 | rest | | | 0.15-0.60 | 0.15-0.60 | |
| Monel 1400 | Ni 3Cu 30Fe | >63 | | | | | | | 28-34 |
| Nimonic 75 | Ni Cr20 Ti | rest | 18-21 | | | | 0.2 | | |
| Incoloy 825 | Ni Cr21 Mo | 38-40 | 19.5-23.5 | rest | 2.5-3.5 | | 0.6-1.2 | | 1.5-3 |
| Hastelloy B | Ni Mo30 | >62 | | 4-7 | 26-30 | | | | |
| Hastelloy C | Ni Mo16 Cr | >52 | 21-18 | 4-7 | 15-18 | | W 3-5 | | |

Aliajele de tipul Inconel au o stabilitate termică deosebit de ridicată la temperaturi ridicate, determinate de precipitățile fine de faze intermetalice cu stabilitate ridicată, cum sunt θ (NiAl) și β (NiAl₂) și Ni₃(Al, Ti). Proprietățile de rezistență la coroziune ale tuturor acestor aliaje sunt deosebit de bune la temperaturi din domeniul ambiant până la $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Cu toate că proprietățile acestor materiale le-ar face adecvate utilizării ca straturi funcționale, principalele aplicații ca substrat vizează realizarea paletelor turbinelor de gaze (palete stator și rotor) acoperite cu straturi funcționale de tip ceramic.

Cuprul și aliajele sale:

Cuprul și aliajele sale sunt mai puțin utilizate ca materiale substrat. Singurele aplicații vizează lucrările de reparații (compensarea uzurii) ale componentelor din aliaje ale Cu (alame, bronzuri) utilizate la realizarea lagărelor. Principalele materiale utilizate sunt identice cu cele ce satisfac proprietățile funcționale ale stratului: bronzuri și alame.

Materialele ceramice:

Materialele ceramice sunt rar utilizate pentru substraturi în tehnica straturilor subțiri la dimensiuni macroscopice. Rezervele în utilizare sunt legate de lipsa de conductivitate

electrică și capacitatea redusă de a suporta un șoc termic de tipul celui ce apare la procedeele "clasice" de acoperire. Principalele aplicații "macro" ale straturilor funcționale pe substrat ceramic sunt fie de tip optic, fie straturi conducătoare electric. Ceramicele de tipul SiO_2 , TiO_2 , ZnS , CaF_2 , MgF_2 , Sb_2S_3 , Al_2O_3 , BeO precum și amestecuri ale lor sunt utilizate pentru confecționarea de substraturi în tehnica circuitelor integrate (semiconductoare).

1.4.2. Materialele de formare a stratului

Materialele de formare a stratului au un rol primordial în obținerea proprietăților acestuia prin realizarea unor acoperiri de grosime minimă (criteriu economic).

Se pot defini 3 familii de criterii în alegerea unui material funcțional:

- Criterii economice: materialul funcțional trebuie să aibă un cost minim în condițiile satisfacerii minime a tuturor condițiilor funcționale;
- Criterii tehnice și tehnologice: firma care execută stratul funcțional trebuie să dispună de posibilitățile tehnice de realizare a stratului funcțional la parametri optimi iar personalul operator să aibă calificarea minimă necesară;
- Criterii de material: fenomenele ce au loc pe interfața material substrat - strat nu trebuie să ducă la formarea unor compuși care să altereze capacitatea de exploatare a sistemului compus (capacitate portantă a substratului, proprietăți funcționale strat).

Accentul pe transferarea proprietăților materialului stratului pe substrat este cu atât mai ridicat cu cât proprietățile obținabile sunt mai ridicate, indiferent de compatibilitatea chimică sau metalurgică a materialului compus strat - substrat.

Familia materialelor de formare a straturilor este foarte vastă și alegerea acestora este determinată de condițiile concrete de exploatare a sistemului și economice și mai puțin de aspecte de compatibilitate chimică sau metalurgică cu substratul, care trebuie soluționate prin metode tehnologice specifice procedurii de realizare al stratului funcțional.

Alegerea materialului stratului va trebui să aibă în vedere toate condițiile concrete de funcționare ale sistemului compozit, inclusiv cele care au servit la alegerea materialului substratului. O atenție deosebită trebuie acordată acelor factori de mediu (solicitări) excepționali pe care substratul are capacitatea de a-i prelua dar care pot afecta funcționalitatea stratului. Sub aspect metalurgic, adecvanța unui procedeu pentru realizarea unui strat funcțional este foarte discutabilă, fiind determinată și de factorii economici. Principalele elemente care se vor avea în vedere sunt:

- modificarea proprietăților de exploatare ale substratului sub efectul tehnologiei de acoperire;
- posibilitatea formării de faze nedorite (dure, fragile etc) pe interfața strat-substrat
- posibilitatea apariției unor defecte de legătură pe interfața strat-substrat respectiv în strat

Figura 1.6. prezintă unele familii de materiale utilizate frecvent la realizarea straturilor funcționale.

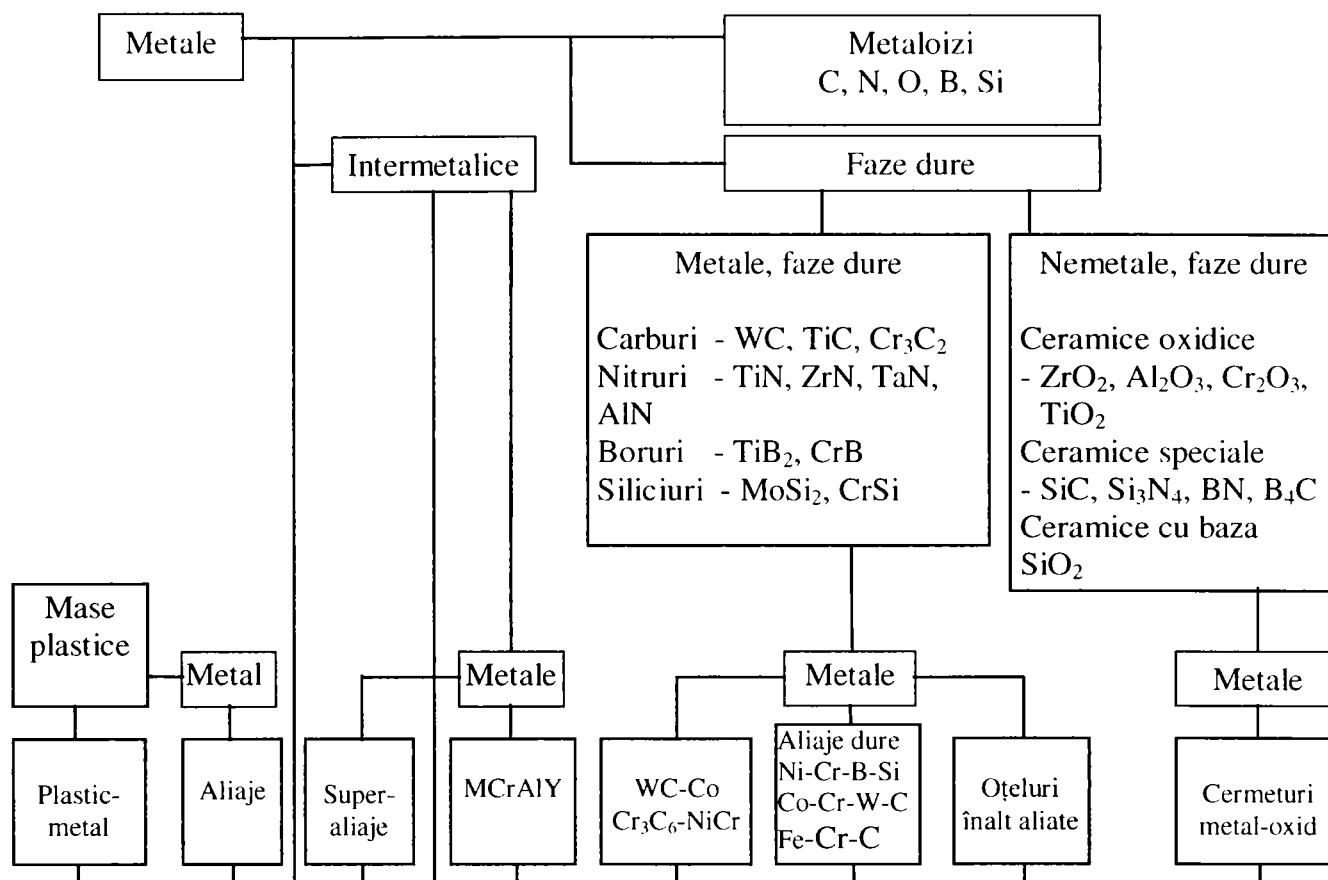


Figura 1.6. Clase de materiale utilizate la realizarea straturilor funcționale

Materiale metalice.

Materialele metalice sunt clasa de materiale cu cea mai largă reprezentare în realizarea straturilor funcționale satisfăcând cele mai variate condiții funcționale de exploatare, din care cele mai importante sunt creșterea rezistenței la coroziune, creșterea rezistenței la uzare respectiv la oxidare la cald, până la proprietăți optice și biologice speciale:

a. Creșterea rezistenței la coroziune.

Alegerea materialului destinat creșterii rezistenței la coroziune este dependentă de următoarele condiții suplimentare de exploatare:

- natura mediului de lucru în care este exploatat sistemul;
- temperatura de lucru precum și modul și intervalul de variație al ei;
- fenomene de uzare suplimentare condițiilor de bază;
- șocuri mecanice și termice;

b. Creșterea rezistenței la uzare

Alegerea materialului destinat reducerii uzării va trebui să aibă în vedere în primul rând tipul solicitării dominante de tip uzură (fretaj, abrazivă la viteze reduse, abrazivă la viteze ridicate în fluide, cavitație etc.) care determină într-o primă aproximație clasa materialului funcțional ce se va utiliza în realizarea funcției protectoare.

Suplimentar tipului mecanismului de uzură, la alegerea materialului funcțional vor fi avute în vedere celelalte condiții de exploatare cu caracter agravant cum sunt:

- natura (agresivitatea chimică) mediului de lucru;
- viteza de aplicare a solicitărilor mecanice și prezența șocurilor termice;
- temperatura și intervalul de variație a temperaturii de lucru;

Alegerea materialelor funcționale metalice utilizate în aplicațiile industriale curente se face:

- folosind materialele și procedeele disponibile
- care asigură prețuri de cost minime
- în condițiile încadrării stricte în termenele de livrare.
- într-o aplicație specifică, prețul de cost al materialului și garanțiile care trebuie oferite produsului sunt cele care determină materialul și procedeul de realizare a stratului funcțional
- se vor avea în vedere condițiile dominante de solicitare ale interfeței componentă - mediu de lucru (decelarea factorilor agresivi de mediu dominanți și secundari)

Deoarece solicitările determinate de condițiile de utilizare se suprapun foarte frecvent, este dificilă realizarea unei clasificări a principalelor familii de materiale metalice utilizate în scopuri funcționale în clase de materiale funcționale ca rezistente la coroziune, la oxidare sau uzură. Uzual, materialele cu proprietăți anticoroziune satisfac unele solicitări de tipul uzurii, în timp ce afirmația își pierde valabilitatea în sens invers. Principalele materiale metalice utilizate în realizarea straturilor funcționale fac parte din trei familii de aliaje, având ca principale elemente (formatoare ale aliajului) fierul, nichelul și cobaltul.

Aliaje cu bază de fier.

Aliajele cu bază de fier sunt utilizate atât în aplicații anticoroziune, cât și în aplicații antiuzură. Principalele aliaje cu baza de fier utilizate în practica industrială sunt:

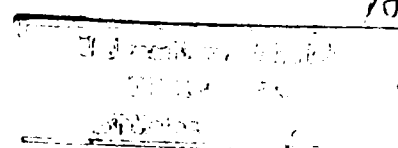
a. Aliaje anticoroziune cu baza fier

- **Aliajele martensitice** sunt aliaje FeCr - cu un conținut de Cr în intervalul 12 ÷ 18% și un conținut de C variabil în intervalul 0,06 ÷ 0,6%. Aliajele din această familie sunt denumite generic "martensitice" sau "ferito-martensitice" datorită aspectului lor microstructural de tip martensitic. Alți constituenți microstructurali sunt bainita, respectiv ferită în proporții reduse, dependente de proporția de crom și carbon. Creșterea proporției de C la peste 0,2% duce la solidificarea primară cu formare de carburi complexe de tipul (FeCr)C și precipitarea suplimentară de carburi la răcirea în stare solidă.

Principalele caracteristici ale acestor aliaje sunt:

- rezistență ridicată la coroziune atmosferică, în apă dulce și marină;

628.008
18/1E



- rezistență ridicată la coroziune în baze diluate până la temperatura de fierbere;
 - rezistență ridicată la coroziune în acizi organici și anorganici diluați și în diferite alimente;
 - revenirea în intervalul 400-600 °C duce la precipitarea fină de carburi, care se reflectă în sărăcirea în crom a matricei metalice și implicit, duce la scăderea rezistenței la coroziune a aliajelor;
 - aliajele martensitice nu sunt sensibile la coroziune intercristalină;
 - creșterea proporției de Cr până la 30% în condițiile menținerii unei proporții reduse de carbon are ca efect stabilizarea unei microstructuri de tip parțial sau integral feritic în tot domeniul de temperaturi
- aliajele FeCr și FeCrNi - denumite uzual "inoxidabile" (uzual Cr > 18%)- au excelente proprietăți de rezistență la coroziune într-o varietate mare de medii agresive. Deoarece efectul protector anticoroziv al acestor materiale este datorat formării unei pelicule compacte și aderente de oxid de crom, rezistența este asigurată doar în medii ce conțin oxigen liber (aerate, acizi oxidanți etc.). Suplimentar aliajelor martensitice, această categorie de aliaje cuprinde 3 familii distincte în ceea ce privește aspectul microstructural: aliaje austenitice (soluție aliată în Fe_γ), feritice (soluție solidă aliată în Fe_α) respectiv ferito-austenitice. Fiecare din aceste aliaje are caracteristici distincte de prelucrabilitate și de exploatare, care le delimitează domeniul de utilizare.

Aliajele austenitice: reprezintă categoria aliajelor de vârf ale fierului în ceea ce privește proprietățile de exploatare. Ele se caracterizează printr-o plasticitate și tenacitate deosebită la temperaturi din domeniul criogenic (peste 1 K) până la temperaturi deosebit de ridicate (1373 K), o rezistență deosebită la coroziune, o comportare bună la sudare, determinate de structura austenitică (γ).

Compoziția chimică uzuală a acestor familii de materiale relevă:

- conținut redus de carbon (sub 0,1%)
- conținut 12 ÷ 25% Cr
- conținut 8 ÷ 30% Ni
- adaosul de molibden mărește rezistența la coroziune a aliajelor în acid sulfuric, cloruri și acizi organici.

Principalele caracteristici de exploatare ale aliajelor FeCrNi sunt:

- rezistență la coroziune ridicată în numeroase medii corozive industriale:
 - soluții acide ale acizilor halogenați și organici
 - rezistență ridicată la coroziune în baze
 - rezistență ridicată la coroziune în săruri
- rezistența la coroziune este deosebit de scăzută în soluțiile care conțin sulf, datorită formării cu Ni din soluția solidă a compusului Ni₃S, care reduce semnificativ tenacitatea materialului și duce la coroziunea accelerată a aliajului.

Aliajele feritice au ca principal element de aliere cromul, iar Ni este un element adițional, care mărește tenacitatea aliajului. Caracteristic, oțelurile feritice au o fragilitate ridicată în starea de livrare, motiv care limitează utilizările lor la procedee de acoperire prin placare sub strat de flux cu electrod bandă, mai rar sub formă de sârmă în mediu de gaze protectoare.

Rezistența la coroziune a acestora este relativ bună în medii cum sunt:

- acidul azotic concentrat (90%) la rece până la 10% la temperatura de fierbere;
- soluții alcaline;
- acizi organici diluați și reci;
- produse alimentare.

Alierea suplimentară cu molibden mărește rezistența la coroziune a acestor oțeluri.

Aliajele "duplex" și "superduplex" au o proporție γ/δ subunitară ce tinde la unitate. Aliajele de bază, inițiale, au avut o compoziție de tip 28% Cr și 6% Ni, cu proporția exactă de ferită δ reglată prin adaosul de elemente alfa-gene și gamma-gene. Elementul caracteristic al acestor familii de aliaje este conținutul ridicat de N, care completează efectul gamma-gene al nichelului și echilibrează proprietățile de exploatare ale materialului.

Cu toate că aceste aliaje au o prelucrabilitate relativ scăzută la cald, rezistența lor la coroziune, în special cea intercrystalină, a făcut ca utilizarea acestor aliaje să cunoască o răspândire crescândă, cu toate că există anumite probleme la sudarea lor.

Aliaje antiuzură cu bază de fier.

Creșterea proporției de C în aliajele FeCr cu un conținut de Cr de peste 5% (dar de maximum 18% în general) duce inevitabil la formarea unei structuri bainitice sau martensitice, cu precipitări intense de carburi de Cr ce conferă aliajelor o duritate ridicată și o rezistență sporită la abraziune. Aceste aliaje formează palierul inferior al aliajelor fierului utilizate frecvent în protecția antiuzură a organelor de mașină expuse uzurii fără șocuri.

Aliajele cu un conținut de peste 0,2% C au o rezistență medie și ridicată la uzare abrazivă, în condițiile unei rezistențe medii/scăzute la șocuri mecanice până la temperaturi de ordinul a 600 °C, respectiv proprietăți de rezistență mecanică ridicate asociate unei plasticități și tenacități medii și reduse. Limita superioară a conținutului de C poate depăși în cazuri particulare valoare de 2,5%, dar creșterea proporției de C scade rezistența la coroziune a aliajelor din această familie. Aliajele dure din familia FeCrC au o rezistență la uzare abrazivă la viteze reduse care crește cu proporția de C și Cr, dar diminuează rezistența la coroziune.

Principalele faze prezente în aceste aliaje sunt carburile complexe de tipul M_3C , M_7C_3 și $M_{23}C_7$, cu un raport Fe/Cr/W dependent de compoziția chimică a aliajului.

Figura 1.5 prezintă principalele faze formate în sistemele FeCrC, în timp ce figura 1.6 indică fazele prezente în sistemele FeCrWC.

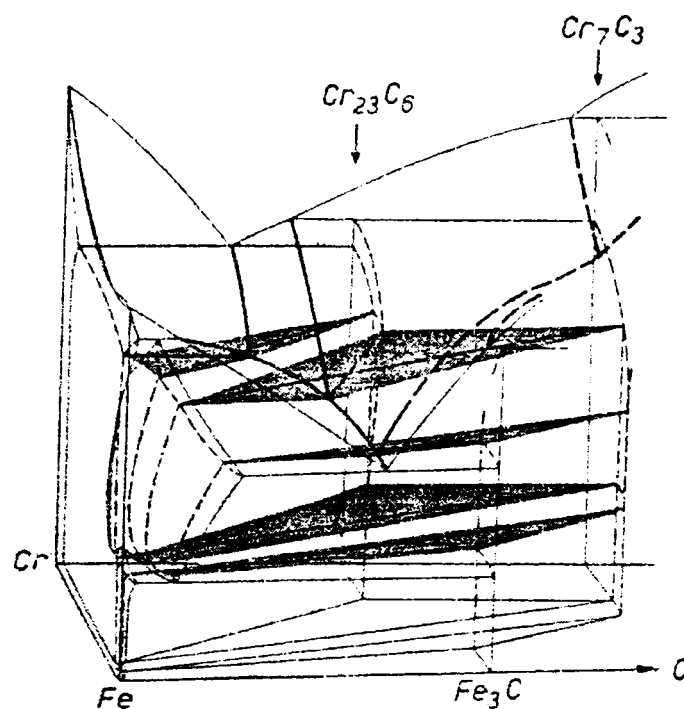


Figura 1.5. Structura la temperatura ambiantă a aliajelor Fe-Cr-C

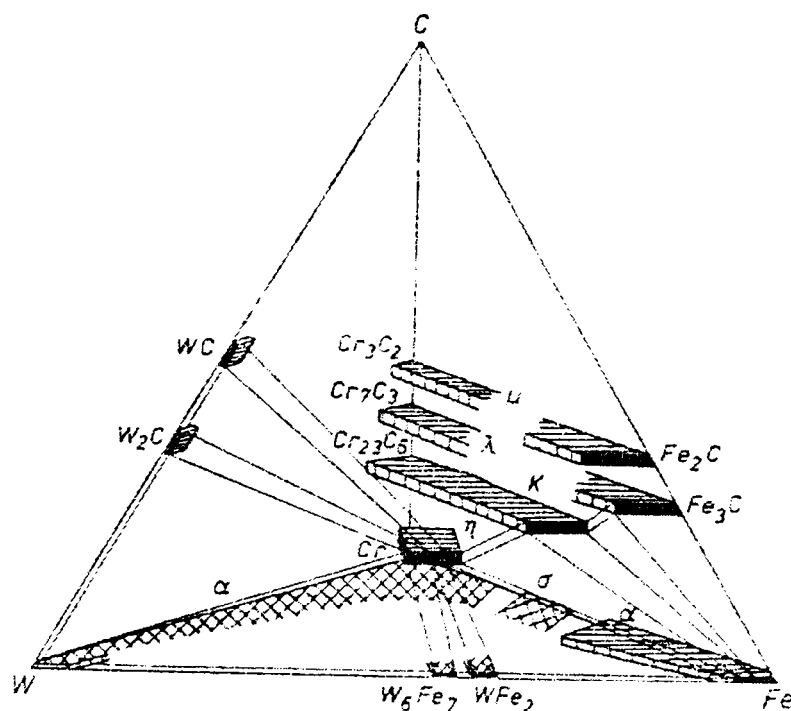


Figura 1.6. Structura la temperatura ambiantă a aliajelor Fe-Cr-W-C

Elementele suplimentare de aliere Ni, Mo, Cu, V, W, Nb sunt destinate potențării unor caracteristici particulare de exploatare. Dintre acestea, cea mai importantă este rezistența la uzare la temperaturi ridicate, reglată prin adaosul de elemente de aliere ca W, Mo, V, Nb, care au ca efect formarea de carburi fine, termostabile, făcând ca materialul să se comporte foarte bine în condiții de abraziune la temperaturi ridicate, în timp ce adaosul de Ni mărește tenacitatea materialelor antiuzură realizate.

De aceea, aliajele dure cu bază de Fe sunt utilizate în mod uzual până la temperaturi ce nu depășesc 400 °C. Pierderea de duritate se accentuează la temperaturi de peste 300 °C,

fiind cauzată de începutul coalescenței carburilor și mai apoi a trecerii acestora în soluție (la temperaturi peste 650 °C).

Aliaje cu bază de nichel

Există două clase importante de aliaje ale nichelului, caracterizate de domeniul de solicitări superficiale cărui i se adresează: aliaje anticoroziune și aliaje antiuzură. Date fiind unele particularități ale aliajelor de nichel, aliajele antiuzură cu baza Ni au în unele cazuri și excelente proprietăți de rezistență la coroziune și oxidare, la temperaturi de la cea a mediului ambiant până la peste 600 °C.

Aliajele cu baza nichel anticoroziune fac parte din două familii de aliaje, ce poartă frecvent nume generice provenind din denumirea comercială a acestora:

- **INCONEL** - aliaje din familia Ni + 33% Cu și cele derivate din acestea.
- **MONEL** - aliaje din familia Ni Cu Cr

În ciuda prețului ridicat, aceste familii de materiale sunt utilizate relativ frecvent și se depun pe substrat prin metode termice de tipul sudării sau pulverizării termice. Procedeele de acoperire care se utilizează la depunerea straturilor funcționale din materiale cu baza nichel vor trebui să asigure evitarea sau limitarea modificării compoziției chimice a materialului funcțional, pentru evitarea oricărei alterări a proprietăților funcționale ale acestora.

O familie aparte de aliaje cu baza nichel este aceea destinată turbinelor de gaze, care sunt aliaje complexe din familia MCrAlY, în care M este de regulă nichelul (M=Ni, Co, Fe). Cu toate că M poate fi oricare din elementele Ni, Co sau Fe, datorită proprietăților deosebite, cele mai frecvent utilizate aliaje din această clasă sunt NiCrAlY.

Asemănător aliajelor de tip NiAl, aliajele NiCrAlY au o aderență deosebită la depunerea prin pulverizare termică pe orice tip de substrat, care este completată de o excelentă rezistență la oxidare la temperatură ridicată, determinată de formarea unei pelicule extrem de compacte și stabile de oxid de crom și aluminiu, a căror proporție variază cu temperatura; adaosul de yttriu are un efect complex, în care predomină creșterea aderenței stratului protector de Cr₂O₃ și Al₂O₃ printr-un mecanism complex:

- formarea unui strat subțire de Y₂O₃ sau YAlO₃ pe interfața strat de oxid - substrat;
- creșterea plasticității interfeței oxid - substrat, ancorarea mai bună a stratului protector de oxid prin creșterea înspre substrat a grăunților de oxid de Yttriu;
- asigurarea protecției substratului în cazurile în care stratul protector cedează și expune materialul substratului agenților corozivi din mediul de lucru.

Domeniul de utilizare al acestei familii de aliaje acoperă protecția la oxidare la temperaturi ridicate (max. 1200 °C) în medii conținând gaze de ardere, compuși ai sulfului și particule fine cu efect abraziv, în domeniul motoarelor termice de aviație.

Aliajele antiuzură cu bază de nichel fac parte din familia NiCrB, având ca elemente suplimentare de aliere Si și W, pentru accentuarea anumitor proprietăți de exploatare.

Proporția de Cr variază uzual în intervalul $5 \div 17\%$ iar cea de bor în intervalul $2 \div 4\%$, având, împreună cu siliciul, un efect pronunțat în reducerea temperaturii de topire. Siliciul formează o soluție solidă de substituție în rețeaua nichelului la concentrații de până la $7,5\%$ - figura 1.7 și 1.8.

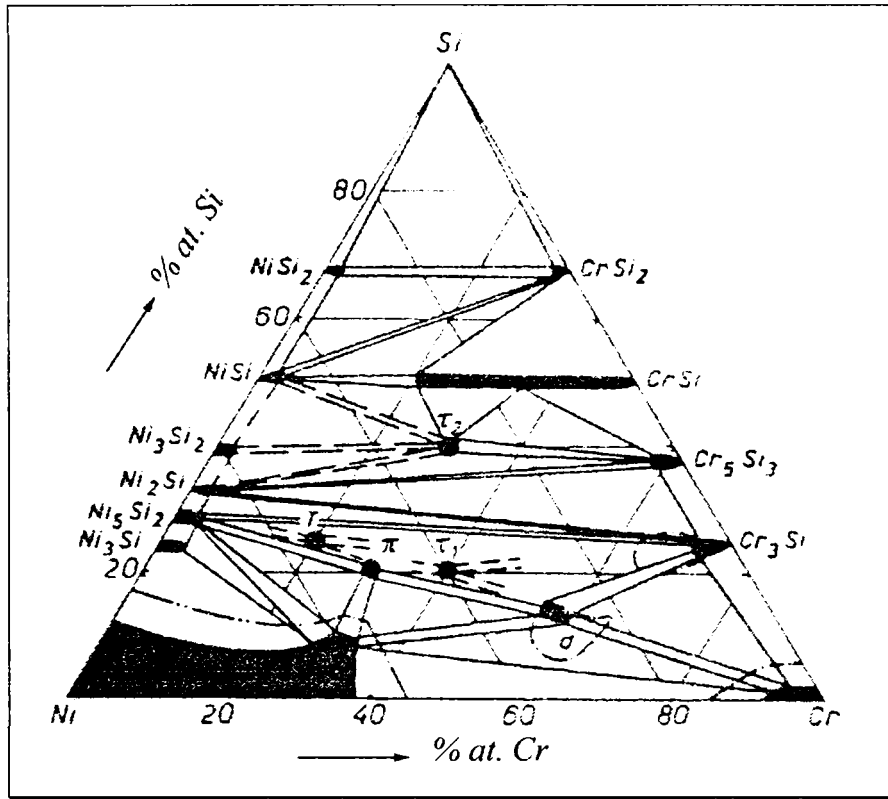


Figura 1.7. Sistemul ternar NiCrB

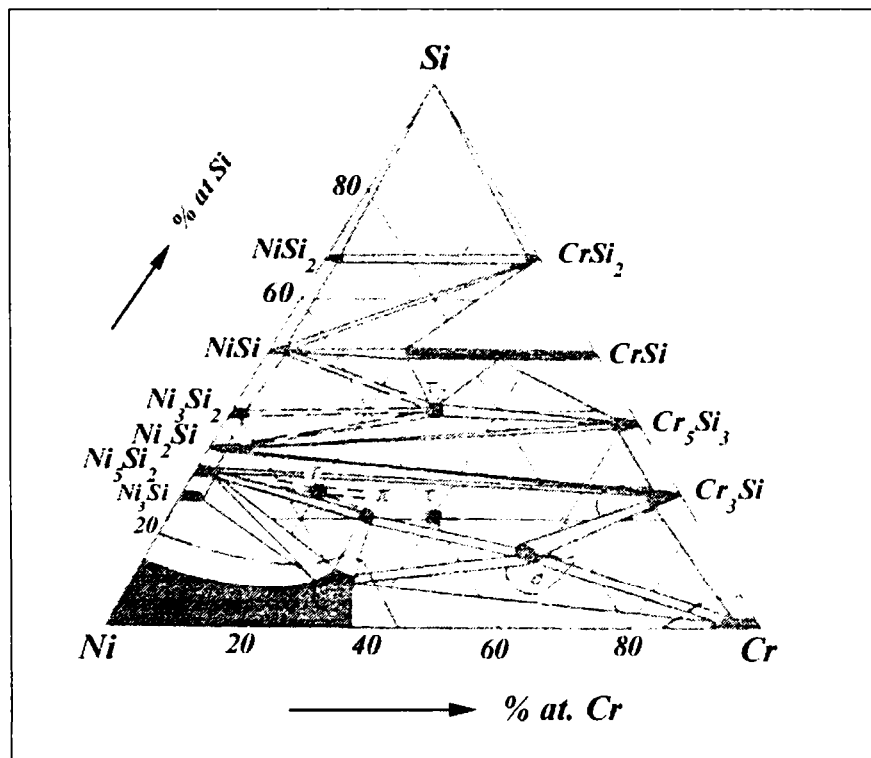


Figura 1.8. Sistemul ternar NiCrSi

Aliajele NiCrB și NiCrBSi au o structură de echilibru formată din boruri primare NiB ale nichelului și un eutectic metastabil Ni₃B - Ni(EA), cu temperatura de solidificare de aproximativ 100 °C sub cea a eutecticului Ni₃B - Ni. Principalele faze identificate de literatura consultată sunt:

- Ni₂B
- Ni₃B
- Ni₃Si
- Ni₅Si₂
- borura ternară Ni₆Si₂B (hexagonală)

Ca o consecință a solidificării eutectice, temperatura de topire a aliajelor NiCrBSi este foarte redusă, în mod uzual în intervalul 960 °C ÷ 1200 °C.

Datorită dispersiei fine a borurilor primare (NiB) și a celor precipitate în stare solidă (Ni₃B, Cr₅B₃, Cr₂B, CrB), stabilitatea termică a durității aliajelor este în general ridicată, și este determinată în special de prezența Ni₃B și Cr₅B₃. Duritatea acestei familii de aliaje se situează în intervalul 15 ÷ 65 HRC, iar stabilitatea termică este ridicată. Uzual, duritatea aliajelor scade nesemnificativ până la temperatura de 400 °C, permițând exploatarea majorității depunerilor NiCrB și NiCrBSi până la temperaturi de peste 600 °C.

Aliajele NiCrBSi permit prelucrarea sub formă de pulberi și procesarea prin procedee de pulverizare termică, care permit adaosul facil de alte faze dure de dimensiuni mari, ce pot accentua unele aspecte ale rezistenței la uzare.

Aliajele cu bază de cobalt

Aliajele cu baza cobalt fac parte din aliajele Co-Cr-C, și își au originea în aliajele cunoscute sub numele comercial de STELLITE® (firma DELORO STELLITE).

Ceea ce este caracteristic acestei familii de aliaje este conținutul de elemente de aliere Cr, W și C. După cum se poate remarca din analiza suprafeței de topire din sistemul Co-Cr-W (figura 1.9), numai aliajele care au în structură o proporție ridicată de fază θ au un potențial de utilizare în procedee de tip sudare datorită temperaturii relativ reduse de solidificare.

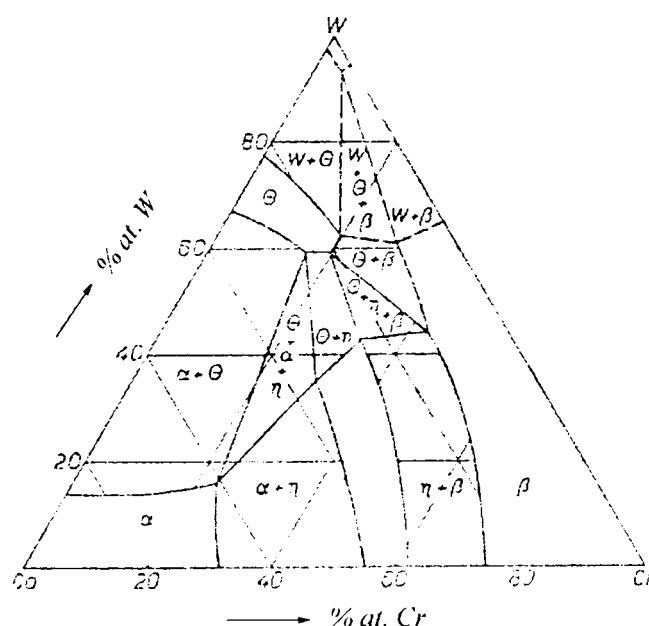


Figura 1.9. Sistemul ternar Co - Cr - W

Similar aliajelor fierului, principalele elemente formatoare de faze dure sunt, alături de carbon, cromul și wolframul.

În timp ce proporția uzuală a Cr în aliaje se situează în jurul a 30% iar a C în intervalul $1 \div 2\%$, proporția de W este dependentă de utilizarea aliajului și variază într-un interval relativ larg. Alte elemente formatoare de carburi (în cazuri excepționale) sunt Mo și V, iar Si, Ni, Mn și Fe se găsesc sub formă de atomi de substituție în matricea aliajelor.

Structura metalografică a acestor aliaje este alcătuită dintr-o soluție solidă cu bază cobalt și din carburi complexe de tipul WC, M_7C_3 , $M_{23}C_6$, M_6C și faza χ (Chi), cu compoziția aproximativă $Cr_{25}Co_{25}W_8C_2$. - figura 1.10.

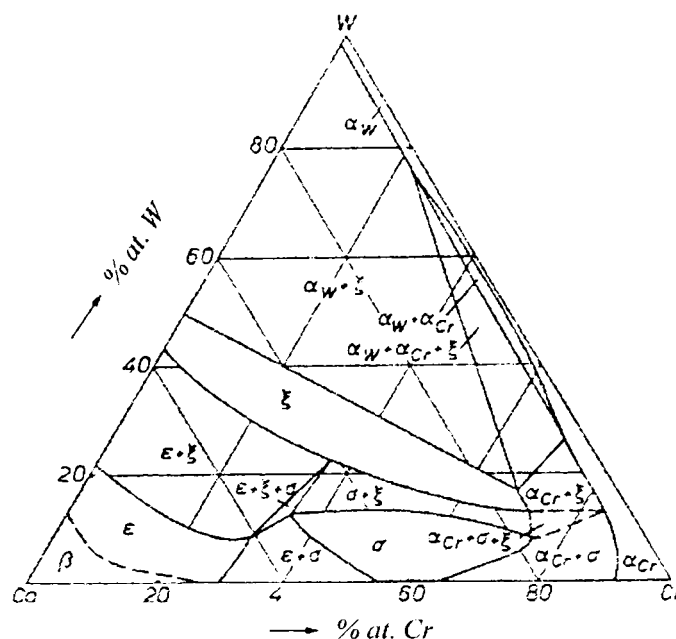


Figura 1.10. Structura aliajelor CoCrW la 600 °C, 1%C

Suplimentar proprietăților deosebite de rezistență la coroziune, aliajele STELLITE[®] și TRIBALLOY[®] se remarcă printr-o duritate și stabilitate termică ridicată a acesteia. Adăosul de Cr stabilizează faza ϵ a Co, în timp ce creșterea conținutului de W crește stabilitatea fazei α . Deoarece microstructura este determinantă în ceea ce privește valorile durității, procedeul de elaborare respectiv aplicare al aliajului afectează puternic (± 8 HRC) duritatea depunerilor. În mod uzual, duritatea statică a depunerilor se situează în intervalul 38 - 66 HRC.

În ceea ce privește rezistența la coroziune, aliajele cu baza Co au o rezistență la coroziune în numeroase medii considerată ca excelentă:

- rezistența la temperatura ambiantă în acizii oxidanți (azotic, acetic, fosforic, cromic) este deosebit de bună și este determinată de formarea unui strat pasivizat, al cărui efect este accentuat de creșterea concentrației acidului;
- comportarea în acid clorhidric este asemănătoare oțelurilor inoxidabile;
- rezistența în acidul sulfuric concentrat este în general ridicată, dar unele aliaje suferă un fenomen de coroziune în lamă de cuțit;
- aliajele cobaltului nu sunt practic afectate de soluțiile de baze și săruri;

- rezistența la oxidare la cald este excelentă, fiind îmbunătățită de adaosul de Cr, W și C. Temperatura de exploatare a aliajelor de Co în condiții de temperatură ridicată poate ajunge la 900 °C, în cazuri particulare la 1000 °C

1.5. Fenomene metalurgice la procesele de acoperire.

Fenomenele metalurgice ce au loc la la procedeele de sudare fac ca proprietățile de exploatare ale stratului să fie afectate. Ele sunt determinate de procesele de diluție în stare topită și de transformările de fază în stare solidă care pot sau nu să fie bazate pe mecanisme difuzionale, fiind controlate ca ampoare de caracteristicile tehnologice ale procedeeului de realizare a stratului funcțional în discuție. Aceste fenomene duc la formarea de compuși chimici și intermetalici, la modificări alotropice sau de granulație care pot afecta uneori radical proprietățile de exploatare ale sistemului compozit format. Principalul fenomen care trebuie avut în vedere la realizarea straturilor funcționale prin procedee de tip topire și solidificare este cel al diluției. Diluția se definește conform figurii 1.11 ca raportul dintre proporția de material de bază topit și volumul total al metalului topit:

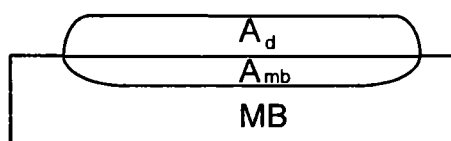


Figura 1.11. Elemente de calcul a diluției

Diluția este unul din elementele care determină parametrii economici ai unui procedeu de realizare a straturilor funcționale prin procedee de tip sudare prin modificarea numărului de straturi necesar proprietăților funcționale ale materialului stratului în ultimul strat depus (sudat):

$$D = \frac{A_{mb}}{A_{mb} + A_d} \quad (1.9)$$

Pe lângă scăderea concentrației unor elemente sub valoarea critică minimă caracteristică aplicației căreia îi este destinat stratul, diluția poate aduce un aport de elemente detrimentale în strat (ex. C în depunerile austenitice anticoroziune). Formula diluției permite calcularea numărului minim de straturi care asigură concentrația minimă din fiecare element de aliere:

$$n = \left(\frac{C_{MD}^0}{C_{MD}^0 - C_{MB}^0} \right) \quad (1.10)$$

Alături de diluție, principalul fenomen metalurgic care afectează funcționalitatea straturilor este formarea de constituenți fragili pe interfața strat-substrat. Principalul efect al acestui fenomen este scăderea tenacității interfeței precum și formarea unor constituenți și faze care accentuează tendințe de tipul coroziunii intercristaline în depunere. Tendința de formare a acestora se poate evalua pe baza analizei diagramelor de echilibru fazic, iar prevenirea formării lor se face prin aplicarea unor straturi intermediare (straturi tampon) care nu formează compuși duri cu nici unul din materialele sistemului și blochează difuzia elementelor fragilizante. În cazul în care asemenea materiale nu există, se recurge la formarea unor sisteme compuse multistrat care să evite formarea compușilor fragili pe interfețele sale.

CAPITOLUL 2. SELECȚIA MATERIALELOR ȘI A PROCEDEELOR DE ACOPERIRE

2.1. Analiza comparativă a procedeelor de realizare a straturilor funcționale

Mecanismul de selecție al procedeelor de realizare al straturilor funcționale este complex și are în vedere atât caracteristicile funcționale de obținut, cât și natura materialelor funcționale care se utilizează. Există mai multe seturi de criterii în selecția materialului adecvat. Ele sunt bazate pe proprietăți caracteristice și includ proprietăți fizice, mecanice, de prelucrabilitate, costuri și disponibilitate.

Principalele caracteristici de material avute în vedere la selecția unui material sunt:

- caracteristicile de rezistență la uzare și coroziune
- disponibilitate
- sudabilitate
- prelucrabilitate
- capacitate de durificare

Dintre toate caracteristicile tehnico-funcționale, proprietățile mecanice sunt cele care au preponderanța cea mai redusă, cele mai importante fiind caracteristicile funcționale (rezistență la coroziune, la diferite forme de uzare), caracteristicile de prelucrabilitate (sudabilitate, prelucrabilitate prin așchiere, călibilitate) și disponibilitatea.

Rolul proprietăților mecanice și termofizice este determinant în selecția procedurii de acoperire și a parametrilor săi de lucru. Selecția unui proces sau a unui material pentru asigurarea rezistenței la uzare este o problemă complexă, probabil cea mai puțin studiată. Deoarece uzarea nu este o proprietate de material ci rezultatul efectului activității unui tribosistem, alegerea materialelor și/sau procedeelor pentru un tribosistem nou de către un tribolog este dificilă și se poate soluționa cu rezultate discutabile fără experiențe preliminare.

Tabelul 2.1 prezintă unele caracteristici ale principalelor procedee de acoperire prin procedee termice utilizate în tehnica realizării straturilor antiuzură.

Analiza are la bază chestionarea a aproximativ 100 întreprinderi românești cu activități în domeniul construcțiilor de mașini și construcții metalice și are la bază frecvența utilizării procedeelor de sudare în vederea realizării de straturi funcționale respectiv frecvenței utilizării pulverizării termice.

Tabelul 2.1 Caracteristici ale principalelor procedee de acoperire prin procedee termice

| Procedeu | Principalele limitări | Adecvate pentru | Disponibilitate |
|-----------------------------------|--|---|-----------------|
| Procedee prin fuziune | | | |
| SE | Rată redusă de depunere | Lucrări de mică amploare, în poziții dificile, varietate mare de consumabile | 5 |
| MIG/MAG, sârmă plină sau tubulară | Nu toate materialele metalice sunt disponibile, numărul aliajelor disponibile este limitat | Procedeu flexibil, în continuă extindere | 4 |
| WIG | Productivitate foarte redusă | Lucrări mici, reparații de scule, materiale speciale | 2 |
| SF | Număr limitat de aliaje, poziție orizontală, piese simple | Depuneri groase | 2 |
| SP | Număr redus de aliaje (pulberi sau sârme), echipamente scumpe | Lucrări de acoperire mecanizate | 1 |
| Oxi-gaz | Rată redusă de depunere | Lucrări de mică amploare cu aliaje ale cobaltului și nichelului, lucrări pe teren | 4 |
| Laser | Echipament scump, procedeu în dezvoltare | Lucrări cu caracter special | 0 |
| Fascicol electroni | Disponibilitate redusă a echipamentului, procedeu în dezvoltare | Lucrări cu caracter special | 1 |
| Baie zgură | Disponibilitate redusă a echipamentului, numai pentru M.A. sub formă de sârme | Depuneri groase | 1 |
| Brazare în cuptor | Disponibilitate a echipamentului, adecvat pentru un număr redus de consumabile | Montarea plăcuțelor de carburi | 1 |
| Procedee fără fuziune | | | |
| Pulverizare cu flacăra | Porozitate semnificativă | Depuneri de peste 1 mm grosime cu aliaje metalice | 4 |
| Pulverizare cu arc | Numai pentru materiale sub formă de sârme | Depuneri de peste 1 mm grosime cu aliaje metalice | 5 |
| Pulverizarea cu jet de plasmă | echipament scump, depuneri subțiri, sub 1 mm grosime | Ceramice, cermeturi, depuneri subțiri cu aliaje metalice | 2 |
| D-Gun | Un singur furnizor de echipament | Depuneri subțiri (sub 0,5 mm) ale materialelor ceramice, carburilor și aliajelor metalice | 0 |
| Jet Kote | Consumuri relativ ridicate de gaze | Depuneri de grosimi mai ridicate (0,25 ÷ 0,5 mm) din carburi metalice și pulberi înalt aliați | 0 |

Criteriul disponibilității are la bază studiul pieței românești menționat anterior (efectuat în perioada octombrie 1996 – martie 1999) și care a cuprins și informații privind echipamentele în stare de funcționare în firmele în activitate. Procedeele de acoperire prin topire (sudare) clasice sunt disponibile în practic toate firmele care derulează lucrări de sudare. Consumabilele și echipamentele pentru aceste procedee sunt disponibile într-o varietate mare pe piața românească pentru majoritatea procedeelelor cu arc electric.

Placarea prin procedee cu topire în vederea creșterii rezistenței la uzare poate fi realizată în aproape toate atelierelor de sudură, deoarece trecerea de la sudare la încărcare constă în simpla înlocuire a materialelor consumabile.

Pulverizarea termică este un procedeu în continuă extindere și este disponibilă în România în peste 70 de întreprinderi (la nivelul anului 1998), iar echipamentele disponibile au o mobilitate ridicată, fiind adecvate în marea majoritate a cazurilor lucrărilor pe teren. Consumabilele sunt și ele disponibile de la mai mulți furnizori. Tabelul 2.2 prezintă principalele materiale antiuzură disponibile pe piața românească pe tipuri de aplicații antiuzură.

Numeroase procedee pot garanta asigurarea unor rezultate comparabile folosind materiale asemănătoare. Alegerea procedeeului adecvat este dependentă de disponibilitatea procedeeului și gradul de pregătire al firmei ce execută lucrările de recondiționare. Legătura proces de uzare - material antiuzură - procedeu de acoperire este prezentată de tabelul 2.2. Imaginea se bazează pe experiența sursei [1].

Tabelul 2.2 Legătura proces de uzare – material antiuzură

| Procedeu acoperire | Acoperiri | | Ni/Cr/B | Oțeluri scule | Oțeluri manganoase | Aliajele cobaltului | Aliajele cuprului | Compozite | Ceramide |
|----------------------|-----------|---|---------|---------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------|----------|
| | Fe/Cr | | | | | | | | |
| SE | x | x | x | | x | x | x | x | |
| WIG | | | x | x | | x | x | | |
| MIG/MAG | x | x | | | x | x | x | | |
| Oxigaz | | | x | | x | x | x | x | |
| APS | | | x | | | x | x | | |
| D-Gun | | | x | | | x | x | | x |
| Pulv. flacără | x | | x | | | x | x | | x |

| Mecanism uzare | Acoperiri cu: | | | | | | | | |
|----------------|------------------|-------|---------|---------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------|----------|
| | | Fe/Cr | Ni/Cr/B | Oțeluri scule | Oțeluri manganoase | Aliajele cobaltului | Aliajele cuprului | Compozite | Ceramice |
| Abraziune | Tens. reduse | x | x | x | | x | | x | x |
| | Tens. ridicate | x | | | | | | x | |
| | Perforare | x | | | x | | | x | |
| | Lustruire | x | x | x | | x | | x | x |
| Eroziune | Particule solide | x | | x | | | | | |
| | Cavitație | | | | | x | x | | |
| | Eroziune paste | | | | | x | | | |
| | Eroziune lichide | | | | | x | | | |
| Adeziune | Adeziune | x | x | x | | x | | | x |
| | Fretaj | | | | | x | | | x |
| | Oxidativă | x | x | x | | x | | | x |
| Oboseală | Pitting | | x | x | | x | | | |
| | Impact | x | | x | | x | | | |
| | Punctiformă | x | | x | | | | | |

Cu toate că în majoritatea problemelor de uzură nu există o legătură strictă între duritatea materialului antiuzură și rezistența sa, duritatea este unul din elementele definitorii în alegerea materialelor antiuzură și a procedeele de depunere.

Toate materialele și procedeele asigură durități mai ridicate decât materialele industriale uzuale cum sunt oțelurile carbon, de construcție sau slab aliate. Toate materialele care au la bază transformarea martensitică au durități comparabile, în timp ce dintre procedeele difuzionale, straturile cele mai dure sunt oferite de procedee termochimice ca nitrurarea și carbonitrurarea. Cele mai dure depuneri sunt realizate prin procedeele de cromare electrochimică. Principalele ceramice antiuzură utilizate în practica industrială sunt oxizii, nitrurile, carburile, borurile și compușii lor.

Carburile metalice utilizate pentru realizarea straturilor rezistente la uzare pentru scule așchietoare au o duritate de peste 2000 N/mm², de cel puțin două ori mai ridicată decât materialele metalice prelucrabile prin așchiere. Excepție sunt carburile depuse în vid, care au durități mai ridicate decât media. Procedeele prin care carburile metalice sunt aplicate pe suportii lor sunt lipirea tare (brazarea).

Suplimentar caracteristicilor tehnice generale ale diferite procedee de realizare a straturilor funcționale, depuneri realizate cu o clasă bine definită de materiale folosind diferite procedee au proprietăți de exploatare diferite. În acest sens, depunerile antiuzură din bronzuri realizate folosind pulverizarea termică (jet de plasmă, D-Gun) au - datorită porozității inerente procedeeului de depunere - caracteristici antiuzură superioare materialelor masive turnate sau laminate. De asemenea, unele din materialele antiuzură au în stare călită superficial rezistențe la uzare superioare aceluiași materiale călite volumic.

2.1.1. Grosimea stratului

Grosimea stratului depus este primul din elementele care se iau în considerare la alegerea unui procedeu de acoperire. Este practic criteriul care stă la baza alegerii clasei de procedee de acoperire, și din care se vor selecta procedeele adecvate din punct de vedere tehnic și tehnologic. Figura 2.1 prezintă principalele procedee de realizare a straturilor funcționale prin adaos de material pe domenii de grosime realizate.

| Grosimi de strat specifice procedeelelor de acoperire | | |
|---|------------------------------------|--------------------------------|
| $s < 50 \mu\text{m}$ | $50 \mu\text{m} < s < 1 \text{mm}$ | $s > 1 \text{mm}$ |
| Straturi PVD | Straturi pulverizate | Straturi încărcate prin sudare |
| Straturi CVD | Straturi emailate | Straturi placate |
| Straturi de difuzie | Straturi de imersie | Straturi brazate |
| Straturi de implantare ionică | | Pulverizate din topitură |
| Depuneri electrolitice/chimice | | |

Figura 2.1. Grosimi de strat specifice la procedeele cu adaos de material

Cele mai mari grosimi de strat sunt realizate de procedeele de acoperire prin sudare. În cadrul procedeelelor de sudare prin topire, încărcarea cu plasmă se încadrează în cele de grosime medie, cu o plajă relativ redusă de reglaj a grosimii de strat, comparabilă însă cu celelalte tipuri de procedee prin topire.

2.1.2. Costul procedeelelor de acoperire

Costul procedeelelor este elementul determinant în selectarea unui procedeu oarecare. Cel mai important element este seria produselor pe care se execută acoperirea cu stratul dur. Cu toate că orice procedeu este adecvat realizării atât a seriilor mari, cât și a unicatelor, elementele legate de costurile de pregătire-încheiere și a dispozitivărilor speciale modifică drastic datele economice care stau la baza alegerii procedeelelor. În cazul realizării unui singur produs, se poate apela la orice procedeu. Excepție fac produsele de dimensiuni ridicate, pentru care asigurarea condițiilor tehnologice optime impune uneori investiții nejustificate.

Realizarea acoperirilor de protecție devine deosebit de scumpă de la anumite gabarite în sus. Fiecare procedeu de acoperire are o dimensiune minimă de la care costurile acoperirii devin foarte ridicate. Tabelul 2.3 prezintă unele dimensiuni critice de la care economicitatea procedeelelor menționate scade în mod critic.

În selecția procedeelelor adecvat trebuie avute în vedere pe lângă disponibilitățile tehnologice și elemente inerente dotării tehnice a executantului stratului de protecție. Instalațiile de tratament termic cu fascicul de electroni, al sistemelor CVD și PVD, duc la creșterea costului investiției și implicit al amortizărilor exponențial cu volumul camerei de lucru.

Procedee ca sudarea cu arc electric sau cu flacără, placarea selectivă și pulverizarea termică permit - în condiții tehnologice bine definite - realizarea de depuneri pe părți ale componentelor, independent de natura, gabaritul, geometria și masa lor.

Indicațiile prezentate în tabelul 2.3 ajută la evaluarea posibilității de realizare în condiții de eficiență economică a stratului funcțional dorit. Datele economice sunt schimbate radical în cazul în care este necesară tratarea (acoperirea) a mai multe componente simultan.

Unele procedee de acoperire permit acoperirea mai multor componente la un preț cvasi-egal cu costul pentru o componentă. De aceea, dintre procedeele ce admit lucrul în șarje, cele difuzionale de tipul tratamentelor termochimice realizează prețuri de cost mai reduse deoarece realizarea stratului funcțional nu este dependentă de orientarea suprafeței de acoperit față de sursa de material funcțional (PVD, unele variante CVD).

Tabelul 2.3. Considerații dimensionale pentru diferite procedee

| Procedeu | Limitări dimensionale | Limitări de procedeu |
|--|---|---------------------------------------|
| Sudarea cu arc | Nu | Se tratează o singură componentă |
| Sudarea oxigaz | Nu | Se tratează o singură componentă |
| Tratament cu fascicol de electroni | Camera de vid trebuie să depășească în gabarit componenta de tratat | Se tratează o singură componentă |
| Tratament cu laseri | Suprafețele de lucru depășesc rar 1 m^2 | Una sau mai multe componente simultan |
| Pulverizare cu arc, cu flacăra | Nu | Se tratează o singură componentă |
| Pulverizare în jet de plasmă, D-Gun | Mișcarea componentei sau a pistolului trebuie mecanizată | Se tratează o singură componentă |
| Călire de suprafață cu flacăra | Nu | Se tratează o singură componentă |
| Călire de suprafață prin inducție | Necesită aprox $1,25 \text{ kW/cm}^2$ suprafață precum și un conductor profilat | Se tratează o singură componentă |
| Tratamente difuzionale Straturi subțiri | Dimensiunea cuptorului Componentele trebuie să încapă în camera de vid a instalației sau reactor | Procedeu cu șarje Șarje |
| Placare | Dimensiunile băii | O singură componentă sau șarje |
| Placare selectivă | Nu | Se tratează o singură componentă |
| Plăci antiuzură | Nu | |
| Cimenturi de reparare | Nu | |

Toate celelalte procedee menționate în tabelul 2.3 realizează acoperirea unei singure componente pe ciclul de lucru. motiv pentru care costurile de manipulare vor fi mai ridicate, reprezentând o componentă importantă în structura costurilor depunerii.

Tabelul 2.4 prezintă comentarii privind elementele esențiale în structura costurilor care iau în considerare dimensiunea și volumul componentei.

Tabelul 2.4. Costurile diferitelor procedee de realizare a straturilor superficiale

| Procedeu | Observații privind costurile |
|------------------------------|---|
| Încărcare prin sudare | SE: max. 2,5 kg/h WIG: max. 1 kg/h MIG/MAG: 4 ÷ 10 kg/h SF: max. 10 kg/h SP: max. 4 kg/h Oxigaz: max. 0,9 kg/h + costuri de prelucrare mecanică |
| Pulverizare cu flacără | max. 1 kg/h + costuri prelucrare |
| Pulverizare cu arc | max. 2 kg/h + costuri prelucrare |
| Pulverizare cu jet de plasmă | 3 ÷ 18 \$/cm ² /mm gros. |
| Durificarea selectivă | Costul dispozitivărilor + costul oțelului de scule + manopera/componentă. Călirea prin inducție este mai rapidă decât cea cu flacără |
| Tratamente difuzionale | Funcție de cantitate, prețuri între 0,5 ÷ 4,5 \$/kg |
| PVD, placare ionică | Depunerile TiN sunt relativ ieftine, dar depuneri cu alte materiale pot avea costuri ridicate |
| Placare | Costurile depind de manopera pentru mascare, aranjarea în baie, suprafața de placat |

Costurile la pulverizarea termică se calculează asemănător celor de la procedeele prin sudare. În acest sens, figura 2.2 prezintă costuri estimative pentru diferite procedee de acoperire, respectiv figura 2.3 prezintă costuri aproximative ale principalelor materiale pentru acoperiri dure.

Placarea nu are aproape niciodată costuri la fel de reduse ca și procedeele difuzionale, iar componenta dominantă a costurilor este manopera pentru dispozitivări, protejare și examinare. Costurile cu energia electrică pot fi adăugate costurilor manoperei ca și costuri suplimentare, mărind tarifele orare la valori superioare atelierelor de prelucrare mecanică.

Placarea selectivă impune costuri mult mai ridicate decât placarea electrolitică a întregilor componente, impuse de protejarea suprafețelor care nu vor fi acoperite.

O mare importanță în structura costurilor o are gradul de automatizare al procedeeului de realizare al stratului funcțional. Cu toate că un grad de automatizare ridicat al procedeeului indică o productivitate ridicată, utilizarea acestor procedee este justificată fie de execuția unor serii mari sau producții de masă, fie de realizarea unor serii scurte de depuneri de o calitate deosebită, care justifică costurile ridicate ale amortizării instalațiilor.

Acesta este și cazul procedeeului PTA, care face obiectul prezentei teze de doctorat, al cărui grad ridicat de mecanizare impune fie realizarea unor serii mari de produse, fie realizarea unor depuneri utilizând materiale de calitate excepțională în condiții de

control extrem de precis a diluției și caracteristicilor stratului funcțional

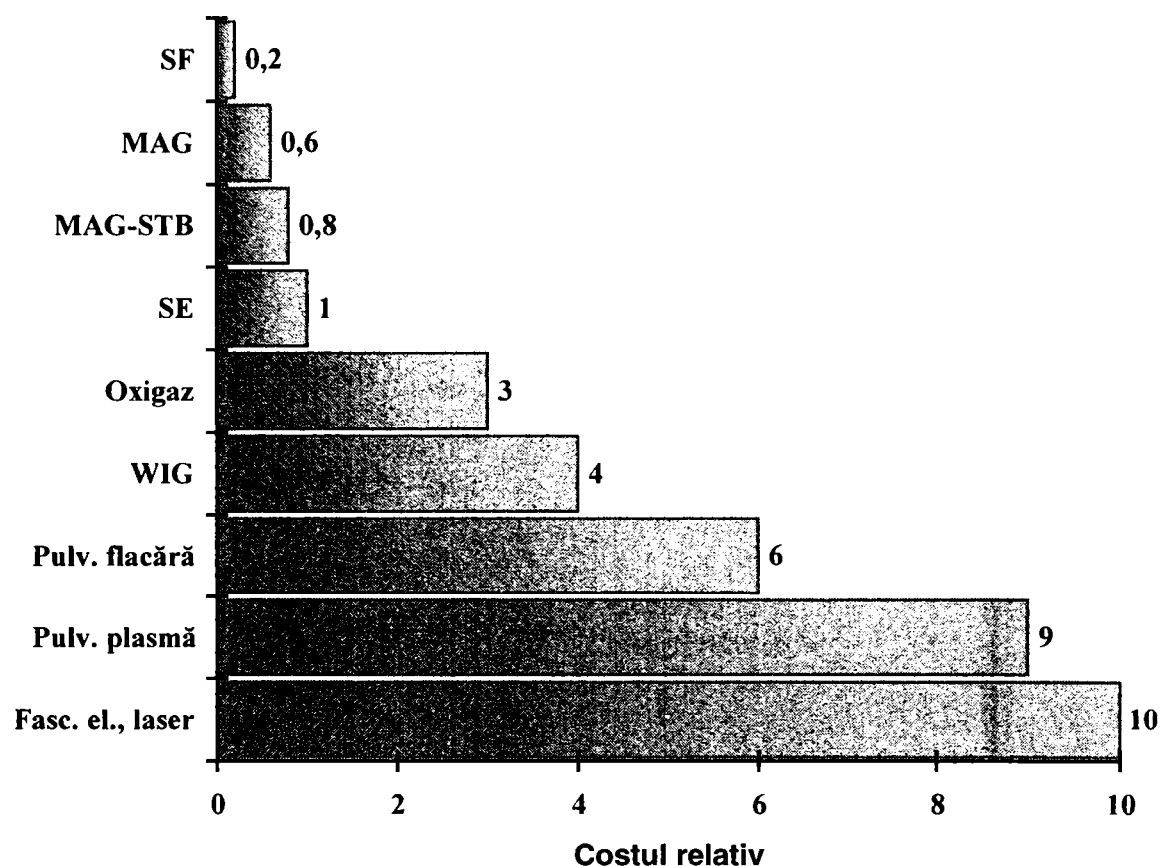


Figura 2.2 Costul relativ al procedeeului de acoperire, bazat pe rata de depunere

Procedeele ce realizează prețuri de cost ridicate sunt cele ce utilizează surse concentrate de energie (fascicul de electroni, laser, pulverizare cu jet de plasmă), care necesită sisteme speciale de manipulare sau incinte ce asigură atmosfere controlate sau vacuum.

Procedeele industriale uzuale (sudarea sub strat de flux, sudarea manuală cu electrozi înveliți, sudarea MAG și oxi-gaz) a căror destinație este sudarea pot realiza prețuri de cost foarte reduse în comparație cu procedeele destinate realizării straturilor funcționale. Cu toate că prețurile de cost realizate sunt aparent reduse, valoarea ridicată a diluției majorității acestor procedee respectiv productivitatea redusă fac ca costul final al operației de realizare a stratului funcțional (inclusiv eventualele prelucrări ulterioare) să fie comparabil, dacă nu apropiat de cel realizat cu procedee specializate.

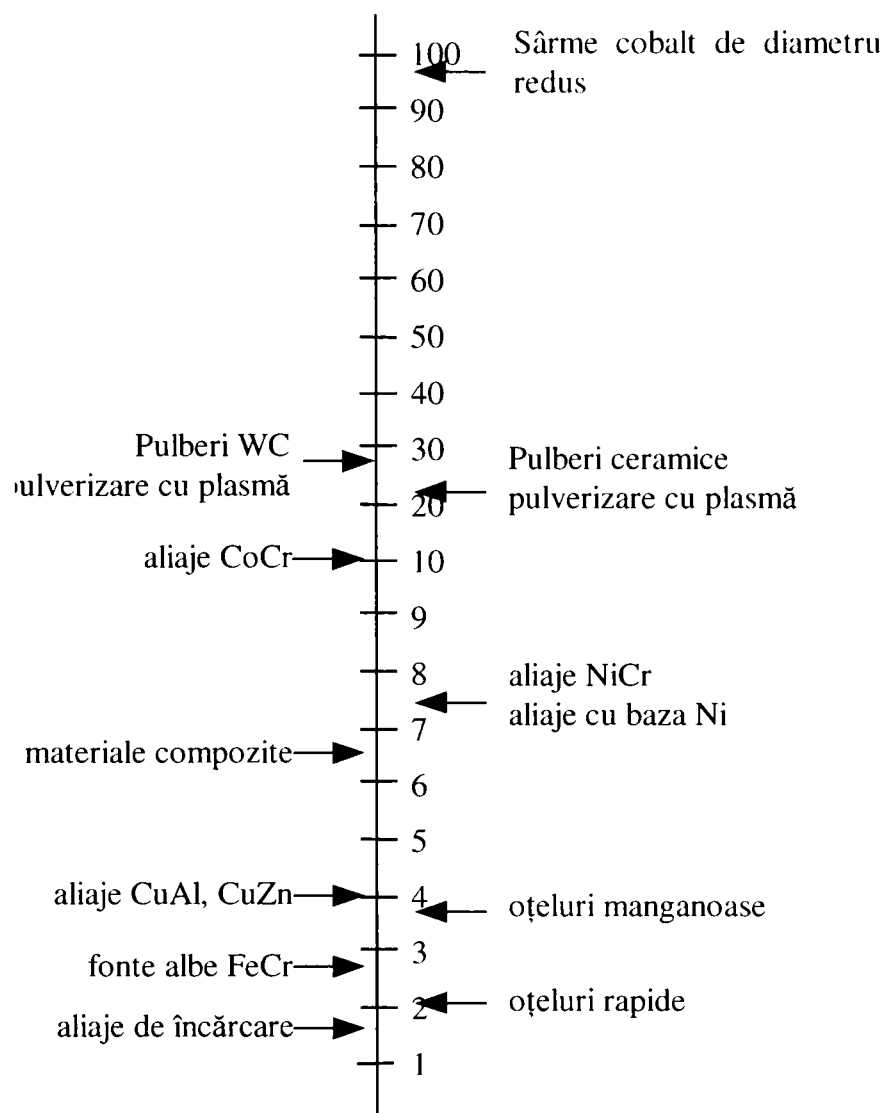


Figura 2.3. Costul relativ al diferitelor materiale

Este evident faptul că materialele uzuale, care realizează marea majoritate a lucrărilor de fabricație sau reparații cu straturi funcționale în construcția de mașini fac parte din categoria materialelor cu prețuri de cost relativ reduse, spre deosebire de materialele ce se adresează domeniilor sensibile în ceea ce privește stabilitatea termică și structurală a materialului stratului funcțional.

2.1.3. Tendința spre generare de distorsiuni

Unul din motivele care face ca sudarea să fie frecvent înlocuită de procedee alternative, mai scumpe, este tendința de deformare a corpurilor a căror suprafață a suportat depunerea unui strat de sudură.

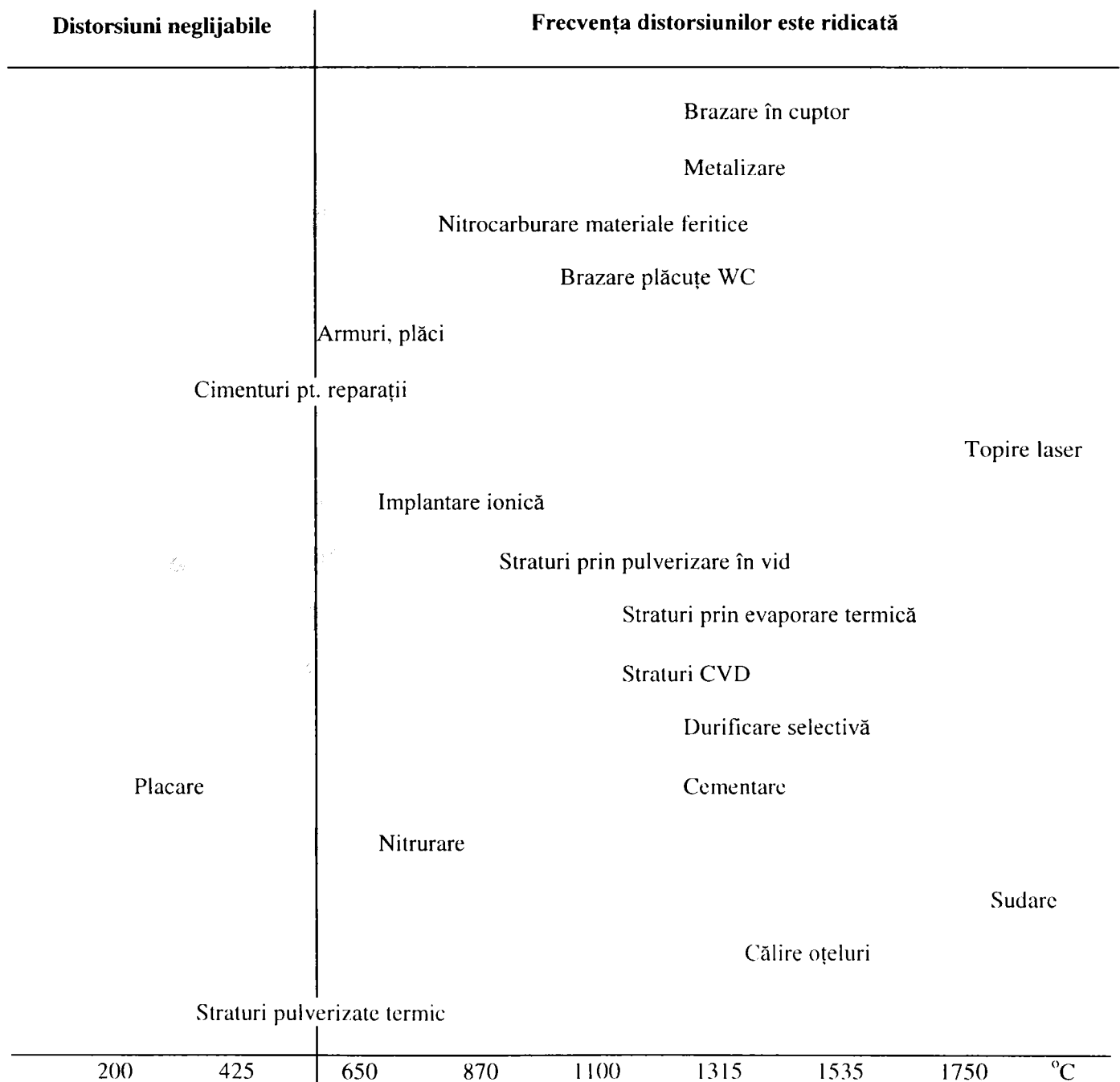
Nu toate procedeele alternative oferă posibilitatea evitării distorsiunilor termice. O concepție eronată a potențialilor utilizatori este aceea că orice procedeu termic de realizare a unui strat funcțional duce la apariția distorsiunilor. Deformațiile apar la încălzirea componentelor, dar nu apar datorită dilatării volumice a materialului ci tensiunilor termice reziduale determinate de încălzire, deformațiilor plastice datorate

încălzirii și răcirii neuniforme, susținerii neuniforme și/sau blocării deformării libere la încălzire și modificărilor de volum induse de transformările alotropice ce au loc în material pe durata tratamentului termic. Deoarece realizarea ciclurilor de încălzire - răcire în condiții ideale este imposibilă, în practica industrială se recurge la minimizarea deformațiilor prin măsuri tehnologice.

O măsură elementară este minimizarea încălzirii volumice sau a încălzirii minime a porțiunii componente care nu trebuie încălzite.

Figura 2.4 prezintă temperaturile maxime ale suprafeței și efectele de deformare care apar la diferite tipuri de tratament termic. Indicarea zonelor cu și fără deformații este adecvată descrierii aliajelor fierului. Temperatura de lucru în procedeul de acoperire va trebui comparată cu temperatura de relaxare a tensiunilor. În măsura în care temperatura de lucru este situată sub această temperatură, probabilitatea apariției deformațiilor este redusă. Un alt element de importanță este cel al inducerii unor modificări volumice în materialul suprafeței.

Figura 2.4. Solicitări termice și distorsiuni la procedeele de acoperire



Cementarea și procedeele derivate induc creșteri ale volumului specific al suprafeței de

ordinul procentelor, Modificări similare au loc la călirea de suprafață, indiferent de varianta tehnologică adoptată. Procedeele de depunere prin sudare produc distorsiuni mai ridicate datorită contracției ridicate a materialului depunerii.

Prima etapă în alegerea unui strat funcțional sau a unui tratament termic superficial, inclusiv placare prin sudare, este luarea deciziei privind beneficiile pe care le poate aduce realizarea organului de mașină prin durificarea suprafeței sau a execuției componentei dintr-un corp masiv cu proprietăți bune antiuzură.

Alegerea soluției are la bază mai multe opțiuni. Pornind de la ideea că organul de mașină trebuie protejat de una sau mai multe forme de uzare, materialele utilizate pot aparține uneia din următoarele grupe:

- Materiale care pot rezista unor forme de uzare în starea rezultată în urma prelucrării
- Materiale care trebuie tratate termic pentru îmbunătățirea rezistenței la uzare
- Materiale care trebuie tratate superficial în vederea accentuării proprietăților de rezistență la uzare.

Figura 2.5 prezintă unele familii de materiale care sunt cuprinse în primele două categorii, în timp ce figura 2.6 cuprinde principalele procedee de creștere a rezistenței la uzare. Încadrarea materialului în categoria corectă (alegerea materialului) este opțiunea proiectantului, pe baza profilului trasat pentru materialul destinat organului de mașină.

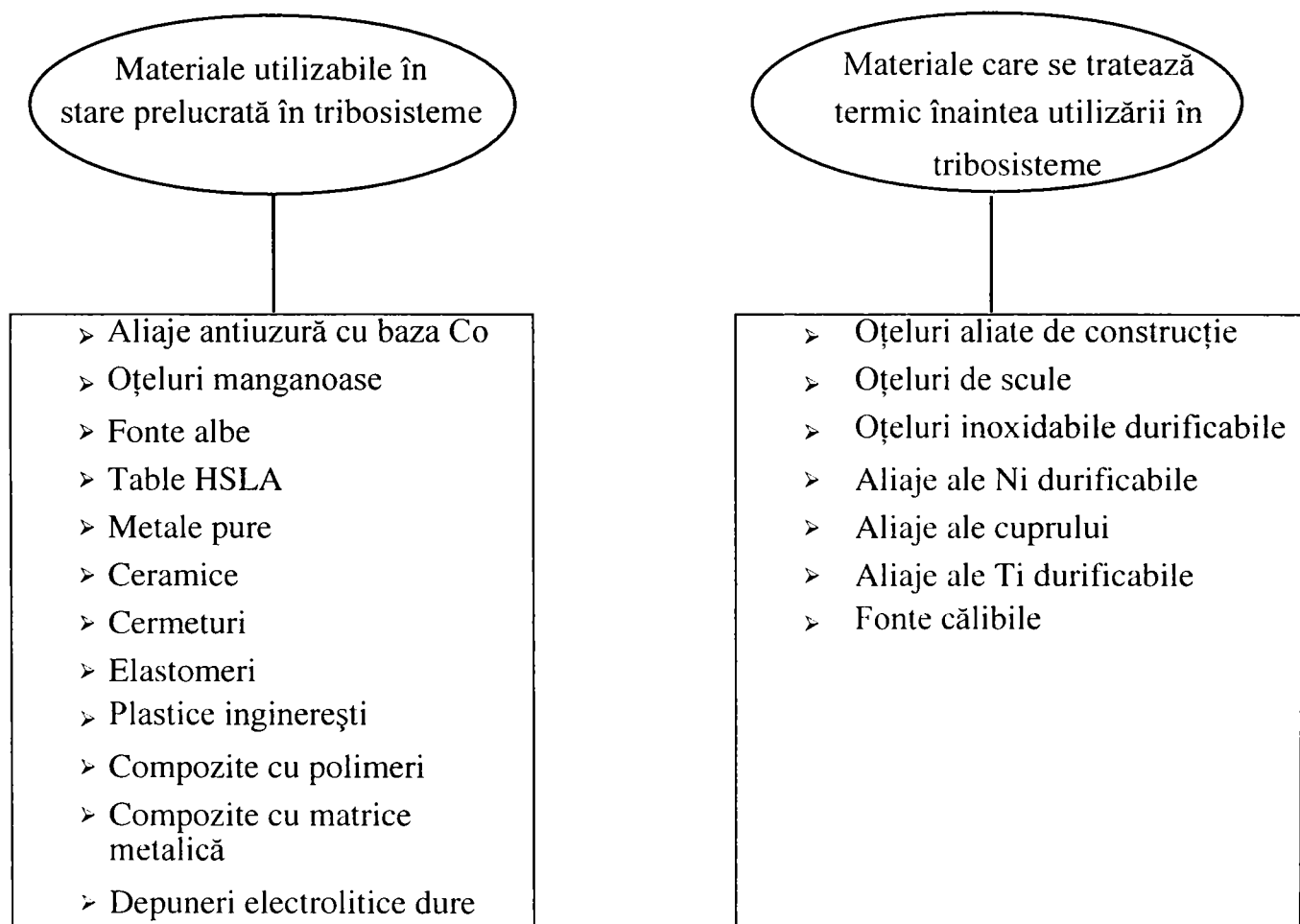


Figura 2.5. Spectrul materialelor rezistente la uzare

Pentru facilitarea alegerii soluției optime, se poate recurge la utilizarea unui set de întrebări care ghidează proiectantul spre alegerea unui anumit material sau procedeu:

- Componenta este alcătuită dintr-un aliaj feros sau neferos?
- Componenta este de înaltă rezistență?
- Poate componenta tolera procese termice de sudare sau tratamente termice la temperatură ridicată?
- Care este uzura admisibilă în exploatare

Răspunsul la prima întrebare elucidează familiile de materiale care pot face subiectul unui tratament termic de durificare superficială. Unele procedee de suprafață nu se pretează la durificarea anumitor familii de materiale. Se pot cita ca exemple aluminiul, magneziul titanul și aliajele zincului, care nu se pretează la procedee de durificare superficială prin topire. Durificarea volumică a acestor aliaje nu este o soluție convenabilă pentru cazul solicitărilor de uzură. Unele aliaje ale titanului, nichelului și cuprului pot fi durificate prin precipitare până la durități de ordinul a 40 HRC, dar această duritate nu este încă relevantă în ceea ce privește creșterea rezistenței la majoritatea formelor de uzare. De aceea, singura metodă convenabilă tehnologic pentru creșterea rezistenței la uzare a acestor aliaje este tratamentul termic și/sau termochimic de suprafață.

În ceea ce privește rezistența mecanică impusă, este necesară o cuantificare cât mai exactă a acesteia, în sensul: 60 sau 600 MPa?

Dacă rezistența mecanică, tenacitatea și rigiditatea impun un material feros, durificarea volumică devine o soluție potențială în creșterea rezistenței la uzare a materialului. Oțelurile călibile și fontele pot deveni materiale antiuzură excelente prin durificare volumică, dar sculele se pot confecționa numai din oțeluri de scule sau carburi metalice.

Dacă condițiile de rezistență mecanică nu dictează utilizarea de materiale durificate în volum, se poate opta pentru placare și variantele sale.

În alegerea unei variante oarecare de durificare superficială prin procese de tipul acoperirii, trebuie avută în vedere compatibilitatea metalurgică a materialului stratului și a substratului. Tabelul 2.5 prezintă unele aspecte privind compatibilitatea materialelor cu principalele procedee de durificare superficială.

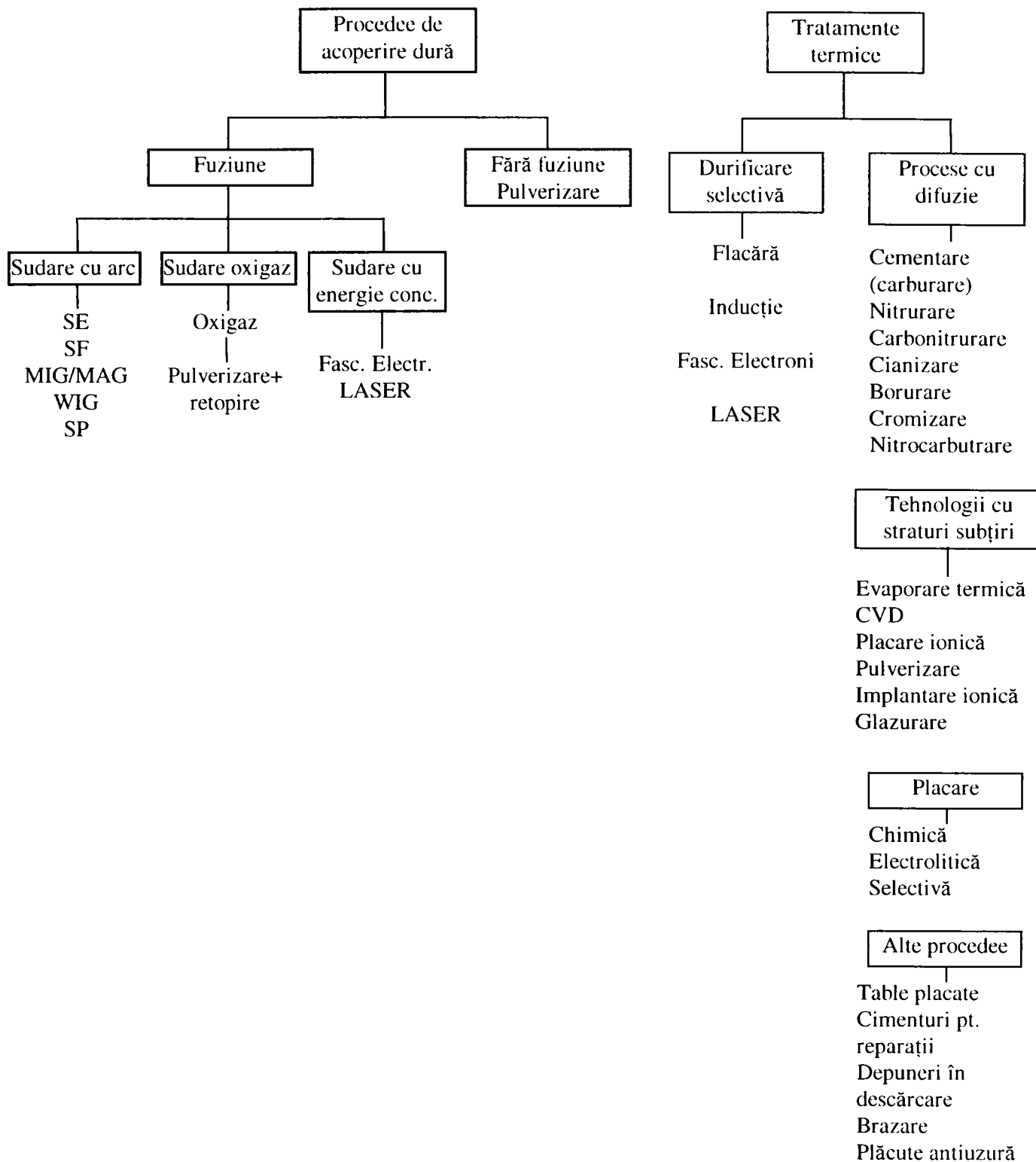


Figura 2.6. Spectru de procedee ce pot fi utilizate la îmbunătățirea rezistenței la uzare

Tabelul 2.5. Compatibilitatea diferitelor procedee de durificare superficială cu unele familii importante de aliaje

| Substrat | Procedee de durificare prin topire aplicabile | Alte procedee aplicabile |
|----------------------------------|--|---|
| Aliajele Al. | Nu există ¹ | Anodizare, placare electrolitică Straturi PVD, pulverizare termică |
| Aliajele Cu | Sudare cu arc și oxi-gaz. | Placare, PVD, CVD, placare ionică, pulverizare termică |
| Oțeluri cu % C redus | Toate procedeele | Procese prin difuzie, acoperiri cu straturi subțiri, placări, pulverizare termică |
| Oțeluri aliate (durificabile) | Toate, dar cu probleme de sudabilitate | Durificare selectivă, placare, acoperiri cu straturi subțiri, nitrurare, durificări cu energie ridicată |
| Fonte | Sudabilitate redusă cu arc. Sudare oxi-gaz: cu vergele | Durificare selectivă, placare, pulverizare termică |
| Oțeluri inoxidabile martensitice | Sudabilitate redusă cu arc. Sudare oxi-gaz: cu vergele | Durificare selectivă, placare, straturi subțiri, nitrurare, pulverizare termică |
| Oțeluri inoxidabile austenitice | Toate | Nitrurare, straturi subțiri, placare, pulverizare termică |
| Aliajele magneziului | Nu există | Anodizare, PVD, pulverizare termică |
| Aliajele nichelului | Toate | Straturi subțiri, placare, pulverizare termică |
| Aliajele titanului | Nu există | Anodizare, straturi subțiri, pulverizare termică |
| Aliajele zincului | Nu există | Placare, pulverizare termică |
| Oțeluri de scule | Nu există | Straturi subțiri, placare, pulverizare termică |

A treia întrebare în alegerea soluției optime, dacă componenta poate tolera tratamente termice la temperaturi ridicate sau sudura are ca scop determinarea susceptibilității la distorsiuni. La multe componente industriale, problema distorsiunilor induse de solicitările termice care sunt consecința tratamentului căruia i-a fost supusă piesa este motivul major pentru care se evită procedeele de acoperire dură. Încărcarea prin sudare are un potențial ridicat de a induce deformații la aproape orice grosime a secțiunii dacă

¹ Încercări recente (1998) au confirmat posibilitatea încărcării prin sudare cu aliaje antiuzură cu baza Al ranforsate cu faze dure (carburi) a componentelor din Al, folosind procedeul PTA în curent alternativ cu formă de undă dreptunghiulară și frecvența de aprox. 200 Hz

lungimea cordonului sudat, grosimea depunerii sau suprafața acoperită sunt comparabile cu gabaritul componentei pe care se aplică.

Geometriile susceptibile a suferi deformații în urma proceselor de sudare sunt cele cu secțiuni subțiri, respectiv cele cu lungime mare. Aceste componente sunt similare - în principiu cu cele ce ridică probleme de deformații la călirea volumică.

Procedeele de încărcare dură și tratamentele termice volumice sau de suprafață sunt o alternativă care va fi avută în vedere doar în măsura în care deformațiile induse nu afectează comportarea în exploatare a organului de mașină cărui i se adresează.

De asemenea, straturile funcționale care admit uzuri de ordinul μm vor fi realizate din materiale cu proprietăți spectaculoase antiuzură, în timp ce materiale (organele de mașină) ce suportă uzuri ridicate (de ordinul mm) pot fi realizate din aliaje de înaltă rezistență sau prin aplicarea de straturi prin procedee de încărcare prin sudare.

Concluzie: Înainte de a porni la selecția unui procedeu de tratament al suprafeței este necesară justificarea avantajelor pe care o modificare superficială le poate avea vis-a-vis de tratamentele termice volumice sau alternativa utilizării materialului în stare prelucrată.

2.2. Depuneri electrolitice

Caracteristicile principale ale straturilor depuse electrolitic sunt acelea că se pot depune pe o varietate mare de substraturi iar temperatura substratului rămâne redusă. Majoritatea depunerilor electrolitice se realizează la temperatura ambiantă, iar în unele cazuri particulare la temperaturi sub cea de fierbere a apei.

Depunerile se pot realiza atât pe oțeluri de scule, numeroase materiale neferoase, cât și pe unele mase plastice, indiferent de considerente de ordinul solubilității în stare solidă, așa cum există în numeroase cazuri la încărcarea prin sudare. Principalele materiale acoperite prin depunere electrolitică sunt:

- oțelurile de scule
- oțelurile carbon
- aliaje cu baza nichel
- fonte
- oțelurile slab și mediu aliate
- oțelurile inoxidabile
- aliaje cu baza cupru
- aliaje ale zincului

Anodizarea este procedeul care permite realizarea straturilor antiuzură pe materiale de tipul aluminiului, magneziului și titanului. Cele mai uzual depuse materiale metalice sunt cromul, nichelul, precum și metalele cu efecte lubrifiante ca argintul și aur. Nu există limite tehnice în ceea ce privește grosimea stratului, dar grosimile uzuale se situează în intervalul $2 \div 250 \mu\text{m}$.

Avantajul temperaturii reduse de lucru face ca aceste procedee să fie în numeroase cazuri singurele variante în realizarea straturilor antiuzură pe produse prelucrate la cotele finale și care nu admit deformații mecanice de amploarea celor induse de procedeele prin topire a suprafeței sau difuzionale la temperatură ridicată.

Straturile placate se utilizează des la recondiționarea locală a componentelor uzate, în

primul rând datorită lipsei deformațiilor. Componentele supuse recondiționării se prelucreează la dimensiunile finale, deoarece nu există rezerve de prelucrare pentru preluarea distorsiunilor. Straturile placate produc foarte rar deformații și se pot depune exclusiv pe suprafețele (zonele) uzate. Suplimentar celorlalte procedee, depunerea electrolitică are avantaje certe în sensul realizării de depuneri în interiorul orificiilor și deschiderilor mici, care sunt dificil a fi realizate prin alte procedee de acoperire. Orice suprafață ce vine în contact cu electroliții va fi acoperită cu materialul depus. Soluțiile (electroliții) pot fi pompate prin orificii pentru a plasa suprafețe cum sunt cele interioare ale schimbătoarelor de căldură. Placarea selectivă se poate utiliza pentru acoperirea locală a componentelor de dimensiuni prea mari pentru a fi introduse în cuvele de electroliză sau care impun o mascare prea complexă, pentru placarea in situ. În concluzie, placarea poate fi utilizată pentru realizarea straturilor protectoare la uzare de grosime medie a componentelor cu geometrie problematică pentru alte procedee. Acestea pot fi suprafețele mari, componentele sensibile la distorsiuni precum și golurile ce nu pot fi acoperite cu procedeele clasice.

Principalul material anti-abraziune utilizat este cromul, fiind mai dur decât multe alte materiale clasice cum sunt cele cu baza nichel. De asemenea, prezintă o rezistență ridicată la coroziune și poate prelua solicitări de eroziune în medii oxidante. Cu toate acestea, aceste depuneri au rezistența redusă la coroziune datorită prezenței inevitabile a fisurilor care pot penetra stratul protector până la substrat. De asemenea, straturile electrolitice nu se vor putea utiliza în condițiile prezenței unor fenomene tip oboseală superficială cum sunt contactul punctiform.

2.3. Tratamente difuzionale

Cele mai populare procedee difuzionale de mărire a rezistenței la uzare a materialelor metalice sunt carburarea, nitrocarburarea și niturarea. Borurarea este o alternativă ideală în numeroase cazuri care poate duce la obținerea de proprietăți unice de exploatare, dar disponibilitatea redusă a procedeeului limitează extinderea sa. De aceea, procedeele difuzionale utilizate pe scară industrială sunt cele care difuzează carbonul, azotul sau ambele. Cementarea și călirea este una din cele mai economice căi de obținere a unor suprafețe rezistente la uzare pe oțeluri carbon. Îmbogățirea se poate face pe mai multe căi: împachetare, în gaze, în vid sau altele). Straturile cementate pot ajunge la durități de peste 60 HRC cu grosimi de 1,5 mm.

Procedeele au două limitări:

- Călirea cu fluide (apă, ulei) poate duce la deformări ale componentelor
- Există limitări determinate de natura substratului.

Deformările sunt generate de fenomenele de transformare de fază tipice oțelurilor încălzite la temperaturi peste cea de austenizare. Carbonitrurarea are un domeniu asemănător de aplicabilitate și de limitări. Cu toate acestea, deoarece unele tratamente de carbonitrurare se pot efectua la temperaturi mai reduse, deformațiile induse de tratamentul termic de călire sunt mai reduse.

Niturarea impune utilizarea unor substraturi speciale. Se poate aplica numai pe oțeluri aliate, iar în condiții speciale și pe oțeluri înalt aliate. Marele avantaj al niturării este

temperatura redusă a tratamentului termic (480 - 590 °C), nefiind necesară o călire în apă. Al doilea avantaj al nitrurării este acela al obținerii unor durități de ordinul a 60 - 70 HRC, cu o pătrundere a stratului durificat de până la 0,60 mm. Dezavantajul major al nitrurării este legat de limitările dimensionale. Nitrurarea trebuie efectuată în cuptoare etanșe sau în vid.

Suprafețele nitrurate sunt deosebit de rezistente la uzarea metal pe metal și au o rezistență bună la uzare abrazivă.

2.4. Durificarea selectivă

Călirea cu flacără și prin inducție se limitează la o anumită categorie de aliaje cum sunt oțelurile carbon și slab aliate cu conținut mediu de carbon, unele fonte și oțeluri de scule slab aliate.

Nu există limitări dimensionale, dat fiind faptul că numai partea de durificat este expusă sistemului de încălzire. Localizarea zonei încălzite este principalul avantaj care face ca deformațiile să fie reduse.

Duritatea stratului este comparabilă cu cea a materialului substratului în stare durificată, dar se situează în domeniul inferior al durităților obținabile.

Suprafețele durificate prin călire cu flacără sau prin inducție sunt utilizate pentru un mare număr de tribosisteme de tipul contactului metal-metal ca roțile dințate, came, role, știfturi, bolțuri etc.

Călirea cu flacără este utilizată atunci când este necesară obținerea unor grosimi ridicate de strat. Echipamentul necesar este deosebit de simplu, fiind accesibil majorității întreprinderilor. Controlul procesului este relativ delicat, motiv pentru care lucrările delicate sunt derulate numai de către firme specializate. Cu toate că procedeul poate fi adaptat la producția de serie, el este utilizat în general pentru serii scurte sau unicate.

Călirea prin inducție este mai adecvată realizării produselor de serie, permițând controlul mult mai exact al grosimii și geometriei suprafeței călite.

Suprafețele călite cu flacără sunt adecvate cazurilor dificile cum sunt roțile dințate, camele, echipamentul de manipulare al minereurilor, în general unde este necesar un miez moale acoperit de o suprafață rezistentă la uzare. Călire prin inducție este utilizată pentru componentele de dimensiuni reduse, cu grosime redusă a stratului călit în condițiile producției de masă.

2.5. Straturi subțiri depuse prin procedeele CVD, PVD

Primele materiale disponibile pentru realizarea straturilor dure subțiri au fost TiN, TiC și Al₂O₃, produse de firme specializate în fabricația sculelor

Aplicarea unui strat de TiN pe un substrat din oțel rapid sau carburi metalice mărește semnificativ durata de viață și disponibilitatea sculei.

Duritatea stratului este variabilă în intervalul 1000 ÷ 1000 HV. Depunerile provin fie dintr-o țintă de TiN, fie se obțin în urma reacției Ti pe parcursul zborului liber cu mediul

de lucru.

Proprietățile stratului depind în mod evident de modul de obținere al stratului; trebuie ținut seama de faptul că temperatura de încălzire a substratului variază în intervalul $300^{\circ}\text{C} \div 800^{\circ}\text{C}$, iar procedeul are în vedere evitarea modificării proprietăților de exploatare ale substratului în urma tratamentului de acoperire. Va trebui avută în vedere (acoperirile cu straturi tip TiN) modificarea rugozității substratului în urma tratamentului de acoperire. În cazul grosimilor de strat mai mari de $1\ \mu\text{m}$, rugozitatea suprafeței se poate mări de la $0,1\ \mu\text{m}$ (luciu oglindă) la valori de peste $5\ \mu\text{m}$ și duce la apariția de noduli pe suprafață, care au un comportament deosebit de abraziv față de suprafețele conjugate moi.

Grosimea uzuală a straturilor dure se situează în intervalul $2 \div 3\ \mu\text{m}$. Efectele benefice se regăsesc în domeniul uzării abrazive și al frecării metal pe metal. Eficiența utilizării straturilor de TiN este documentată în cazul sculelor așchietoare, ducând la mărirea de mai multe ori a duratei de viață. Cu toate că stratul protector se elimină rapid de pe muchia așchietoare, suprafețele de așezare și de degajare rămân protejate de stratul antiuzură. Efectul aparent este cel al evitării formării punctelor de microsudură dintre așchiile de metal și suprafețele așchietoare.

În general, straturile subțiri sunt competitive cu cele metalice depuse prin metode electrolitice de tipul cromărilor sau nichelărilor dure. Deoarece TiN este mai dură decât cromul dur depus prin metode electrochimice, în aplicațiile în care duritatea este determinantă va depăși straturile depuse prin procedee clasice.

2.6. Tratamente de suprafață cu energie concentrată

Prin tratamente superficiale cu surse concentrate de energie se înțeleg toate acele tratamente la care densitatea de energie a sursei termice depășește $5\ \text{kJ}/\text{cm}^2$. Procedelee principale din această categorie sunt călirea laser și cu fascicol de electroni, respectiv implantarea ionică. Cu toate că efectul este identic din punctul de vedere al mecanismului cu călirea cu flacără sau prin inducție, grosimea de strat este mai redusă, uzual în intervalul $50\ \mu\text{m} \div 0,75\ \text{mm}$. Suprafața se "acoperă" prin baleierea sursei de energie concentrată sau prin deplasarea piesei.

Materialele cărora li se adresează aceste procedee sunt similare celor utilizate la călirea cu flacără. Deformațiile sunt mai reduse decât la procedeul cu flacără datorită aportului energetic mai redus, iar geometria suprafeței durificate și adâncimea ei sunt mai precis controlabile.

Placarea cu laser sau cu fascicol de electroni sunt procedee dezvoltate pe baza soluțiilor încărcării WIG sau PTA. Pulberile sunt aduse printr-o tubulatură de transport pulberi în fascicolul laser unde se topesc și sunt transferate - în general gravitațional - pe suprafața de încărcat.

Straturile metalice pulverizate termic pot fi retopite folosind un laser, dar utilizarea industrială a acestui procedeu este încă în dezvoltare

Topirea suprafeței în vederea obținerii unor suprafețe amorfe și implantarea ionică au o aplicabilitate similară straturilor subțiri. Ele se utilizează cu succes în unele tribosisteme, dar aceste procese nu au ajuns la nivelul la care să fie recomandate de către proiectanți. Grosimile de strat se situează în mod normal în intervalul $0,1 \div 1\ \mu\text{m}$, fiind

recomandate sistemelor tribologice care admit uzură zero.

2.7. Utilizarea placării

Placarea (încărcarea) se utilizează la protejarea suprafețelor care admit modificări geometrice semnificative prin uzare. Procedeele de încărcare produc acoperiri pe suprafața substraturilor, efectul neacționând în profunzimea materialului acestuia în maniera tratamentelor termice superficiale. Procedeele de acoperire precum pulverizarea în jet de plasmă sau celelalte procedee de pulverizare termică permit obținerea celor mai subțiri straturi dure, având grosimi de peste 8 μm . Cu toate că există posibilitatea obținerii de straturi subțiri, grosimea minimă utilizată în practica industrială este de peste 75 μm . Încărcarea nu are limitări superioare, unele procedee prin topire admițând grosimi de strat de până la 75 - mm (șnecuri generate prin sudare). De aceea, încărcarea este procedeul care permite realizarea în cele mai bune condiții a straturilor de grosime ridicată. Adecvanța procedeelelor este deosebită la recondiționarea componentelor uzate prin procese abrazive deoarece poate obține aproape orice tip de acoperire pe aproape orice substrat.

Procedeele prin fuziune se pot utiliza numai pe substraturi sudabile (capacitate de umectare, solubilitate în stare solidă, structură cristalină apropiată), iar pulverizarea termică se poate aplica pentru aproape orice material de strat pe aproape toate substraturile metalice, și nemetalice.

Datorită varietății deosebit de mari de materiale consumabile disponibile, este posibilă combaterea oricărui tip de uzare întâlnit în practica industrială. Se va găsi întotdeauna un aliaj care să satisfacă condițiile de exploatare dintr-un anumit tribosistem.

Fontele albe cu conținut ridicat de crom și carbon sunt materiale cu proprietăți bine documentate de rezistență la abraziune; aliajele cu baza cobalt sunt excelente în uzarea metal pe metal de tipul alunecării și au o rezistență ridicată în procesele erozive care includ și mecanisme corosive. Oțelurile austenitice manganoase sunt larg utilizate pentru aplicații care conțin mecanisme de tipul oboselii superficiale.

Lista aplicațiilor este extrem de lungă, și pentru fiecare problemă există o soluție în varianta încărcării dure. De asemenea, orice atelier de sudură are dotarea minimală derulării activităților de încărcare dură. Pulverizarea termică este și ea suficient de răspândită, iar procedeele sofisticate (pulverizarea în jet de plasmă, D-Gun, Jet-Knote) sunt disponibile în firme specializate.

Există mai mulți factori care limitează aplicabilitatea încărcării prin sudare:

- nu este adecvată încărcării prin sudare la produse în serie;
- produsele necesită prelucrări mecanice după depunere;
- încărcarea poate să provoace distorsiuni semnificative.

Acoperirile dure se pot efectua și pe serii mai mari de produse, de ordinul sutelor sau miilor de bucăți, dacă sunt suficient de mici pentru a fi prelucrate mai multe într-o singură "șarjă", simultan. Pulverizarea termică este un exemplu în acest sens, putându-se acoperi un număr relativ ridicat de componente dintr-o singură prindere în sistemul de manipulare. Componentele unicate sunt prelucrate uzual în sisteme automate de manipulare și acoperite unul câte unul, măbind costurile acoperirii.

Cea mai mare problemă ridicată de procedeele de acoperire termică sunt cele legate de deformațiile induse de contracția cusăturii sudate (depunerii). Contracția nu poate fi

evitată, dar poate fi redusă prin metode tehnologice și eliminată prin prelucrare mecanică.

Straturile pulverizate termic sunt adesea utilizate în stare depusă, fără prelucrări mecanice. Un exemplu în acest sens este cel al depunerilor cu destinația protecție la uzare, a căror rugozitate nu are nici o consecință asupra funcționalității sistemului. Pentru tribosistemele în care calitatea suprafeței afectează durata de viață a sistemului tribologic, suprafețele vor trebui prelucrate mecanic.

În mod uzual, pulverizarea termică nu încălzește substratul la temperaturi de peste 150 °C. Această temperatură nu induce în mod uzual deformații, dar va trebui avut în vedere efectul potențial deformant al operației de sablare premergătoare pulverizării prin inducerea de tensiuni de compresiune în straturile de suprafață. În măsura în care evitarea deformațiilor este impusă, sablarea trebuie să fie mai "moale" sau se va recurge la utilizarea unor straturi de aderență în locul unei sablări agresive.

Încărcarea dură este de aceea adecvată numai acelor tribocomponente care pot admite modificări semnificative ale geometriei suprafeței. Procedeele se adresează majorității materialelor de acoperire, existând câteva sute de materiale potențial utilizabile. Procedeele sunt adecvate componentelor care nu necesită serii lungi și pentru elemente care se pot utiliza în stare sudată. În acest caz, elementul determinant este scăderea costurilor de fabricație prin evitarea prelucrărilor finale.

2.8. Metodologia selecției materialelor

Pe piața mondială există peste 60.000 de materiale metalice disponibile cu o varietate mare de proprietăți, sute de familii de polimeri precum și peste 20 de familii de materiale ceramice ingineresti. Numărul compozitelor este practic nelimitat, iar numărul de procedee de realizare a straturilor funcționale este de asemenea mare. Multe din acestea se pot utiliza la realizarea straturilor funcționale cu proprietăți antiuzură bine controlate. Problema alegerii materialului și procedeelelor de acoperire revine inginerului proiectant, și are la bază experiența și cunoștințele tehnice pe care acesta le stăpânește.

Fiecare proiectant are propriul repertoriu de materiale "bune" și "necorespunzătoare" din punct de vedere funcțional pentru fiecare aplicație. Puși în situația alegerii unui material funcțional, proiectantul alege pe baza experienței unul din materialele considerate "bune". Cu toate că materialul selectat poate da rezultate bune, alte materiale selectate de către proiectanți specializați în materiale funcționale pot da rezultate cu un ordin de mărime mai ridicate. De aceea, selecția unui material impune o abordare sistematică care să traseze profilul materialului funcțional necesar pentru aplicația dată și care să aibă în vedere proprietățile, costul și disponibilitatea materialului.

Cel mai adecvat material este acela ale cărui proprietăți, costuri și disponibilitate satisfac profilul impus de proiectant.

2.8.1. Stabilirea profilului materialului

Stabilirea profilului materialului este prima etapă și cea determinantă în mecanismul alegerii procedeelelor de realizare a stratului funcțional.

Principalele etape în alegerea profilului materialului sunt prezentate în figura 2.7. Algoritmul trebuie să răspundă la unele întrebări cum sunt:

- care este rolul funcțional al componentei de acoperit?;
- trebuie să transmită un moment de torsiune?
- trebuie să susțină o altă componentă?
- este componentă a unui tribosistem?
- care este durabilitatea impusă?
- care sunt localizările și consecințele uzurii?
- cât de importantă este stabilitatea de durată?

Răspunsurile la aceste întrebări, bazate pe algoritmul prezentat în figura 2.8 permit schițarea profilului materialului care poate să confirme adecvanța sau inadecvanța unui material pentru satisfacerea profilului de solicitări al organului de mașină supus acoperirii cu straturi funcționale.

Toți factorii determinați pe baza diagramei 1 reprezintă "cerințe". Următoarea etapă este aceea a "convertirii" acestor "cerințe" în proprietăți cuantificabile de material

Figura 2.7 poate fi utilizată ca o listă pentru verificarea proprietăților care pot fi de importanță pentru o anumită aplicație. Proprietățile fizice, chimice și mecanice sunt evidente, însă, pentru unele aplicații compoziția poate fi determinantă în alegerea materialului. Un exemplu reprezentativ este cel al cobaltului: deoarece poate deveni radioactiv sub efectul bombardamentului neutronic, materialele utilizate în tehnica nucleară nu trebuie să conțină cobalt, datorită formării de izotopi radioactivi

Majoritatea organelor de mașină necesită satisfacerea unor proprietăți mecanice bine definite, iar determinarea proprietăților mecanice relevante ale materialelor în exploatarea elementului și a limitelor minime și maxime ale lor este responsabilitatea inginerului proiectant.

Ultima clasă de proprietăți listate în figura 2.8 nu conține proprietățile determinante în majoritatea cazurilor. Scopul introducerii acestei clasificări este menținerea în vedere a faptului că unele caracteristici ca precizia geometrică a execuției componentei trebuie avută în vedere. Modificările de geometrie induse de tratamentele suprafețelor funcționale pot fi foarte diferite, funcție de procedeu. Dacă un organ de mașină poate tolera (de exemplu) o creștere a unei cote cu $1 \mu\text{m}$, nu va fi posibilă aplicarea unui număr ridicat de straturi funcționale. Majoritatea variantelor de durificare superficială se autoelimină dacă nu se admit modificări geometrice ale suprafețelor.

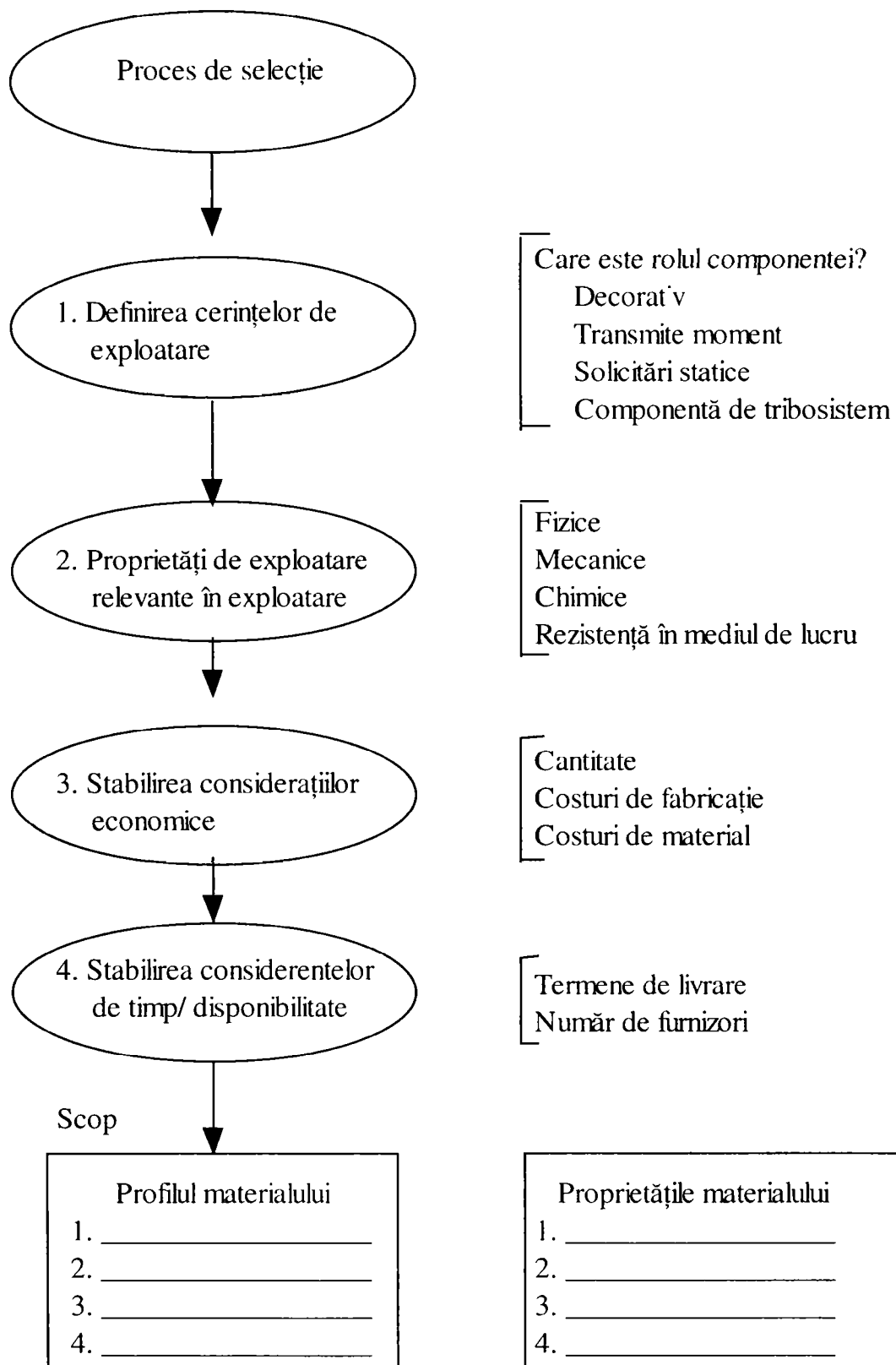


Figura 2.7. Etape în procesul de selecție al materialelor / procedeelor

Proprietăți de material

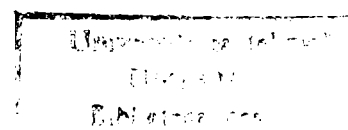
| Chimice | Fizice | Mecanice | Dimensionale |
|------------------------------|---------------|---------------------------|---------------------|
| Compoziție | Electrice | Rezistență | Stabilitate |
| Structură | Termice | Limita de curgere | Textura suprafeței |
| Faze | Magnetice | Rezistența mecanică | Toleranțe |
| Rezistență în mediul ambiant | Gravimetric | Alungirea | |
| Energie superficială | Acustice | Modul elasticitate | |
| Sudabilitate | | Tenacitate | |
| Izotropie | | Energie de rupere | |
| | | Tenacitate la rupere | |
| | | Duritate | |
| | | Tensiunea de forfecare | |
| | | Rezistența la compresiune | |
| | | Rezistența la oboseală | |
| | | Adeziunea | |
| | | Rezistența la uzare | |
| | | Abraziune | |
| | | Eroziune | |
| | | Uzare adezivă | |
| | | Oboseala suprafeței | |

Figura 2.8. Listă de control pentru clarificarea fenomenelor din exploatare

Tabelul 2.6 prezintă o corelație aproximativă a destinației în exploatare a componentei și a proprietății (caracteristicii) suprafeței componentei.

Tabelul 2.6. Corelații proprietăți-caracteristici ale suprafețelor funcționale

| Proprietate de exploatare | Caracteristică a suprafeței |
|----------------------------------|--|
| Rezistență la uzare | Duritate superficială Microstructură adecvată |
| Rezistență la impact | Rezistență la șoc Tenacitate la rupere |
| Rezistență la oxidare | Rezistență la coroziune atmosferică |
| Rezistență mecanică ridicată | Limită de curgere peste 700 Mpa |
| Rigiditate ridicată | Modul de elasticitate peste 210 GPA |
| Biocompatibilitate | Bioactivitate, porozitate controlată, bioinerție |



Această listă de cerințe de material indică o primă caracteristică de material pe care materialul selectat trebuie să o satisfacă. Doar un număr redus de materiale satisface condiția de modul de elasticitate ridicat, cum sunt oțelurile, aliajele cu baza nichel, aliajele cu baza cobalt, uraniul, unele ceramice și compozitele ranforsate cu fibre de bor.

A doua etapă în procesul de selecție este stabilirea constrângerilor de natură economică a componentei proiectate. Cel mai important element economic este mărimea seriei de fabricație, care are un efect profund asupra alegerii materialului. Atunci când este necesară realizarea unui singur produs (unicat) sau a unei serii scurte, utilizarea unui material scump poate fi justificată. Seriile mari impun utilizarea unor materiale cu prelucrabilitate mai ridicată, care permit obținerea unor produse cu calitate satisfăcătoare în condițiile dotărilor existente. Suplimentar costurilor va trebui avută în vedere durata preconizată de viață. Dacă garanțiile oferite sunt deosebite, paleta materialelor utilizabile se restrânge semnificativ, reducând importanța criteriilor economice care stau la baza alegerii materialului. Garanțiile oferite vor impune materiale și tratamente speciale ale suprafeței care se vor reflecta în costul fabricației.

Ultimul criteriu de selecție - disponibilitatea - se referă la timpul necesar livrării materialului selectat de către furnizorul acestuia. Acesta este un factor peste care se poate trece cu ușurință, dar poate fi uneori mai important decât proprietățile mecanice ale materialului. Există constrângeri legate de temenele de execuție ale produselor. Dacă materialul selectat necesită derularea unor procese tehnologice speciale la furnizor, termenele de livrare pot crește excesiv. Dacă produsul are un singur furnizor pe piață, riscul provocat de evenimente deosebite care afectează procesul de producție al furnizorului este ridicat și trebuie și el avut în vedere.

Pe baza elementelor prezentate se poate trasa un profil al materialului, care se poate compara din acest moment cu materialele aflate în baza de cunoștințe (mental, prospecte, manuale) a proiectantului. Profilul de proprietăți poate fi satisfăcut de către mai multe materiale cu mai multe variante de straturi funcționale realizate folosind procedee de acoperire. Alegerea variantei optime este opțiunea proiectantului și se bazează pe experiența pe care o are.

2.8.2. Identificarea mecanismului de uzare

Dacă profilul materialului indică apartenența organului de mașină examinat la un tribosistem, este necesară identificarea mecanismului de uzare predominant. Deoarece nu este posibilă evaluarea experimentală a formei de uzare încă din faza de proiectare, mecanismul dominant și cele secundare trebuie anticipate de către proiectant pe baza informațiilor pe care le are despre tribosistemul în dezvoltare. Principalele forme de uzare care trebuie avute în vedere sunt abraziunea, eroziunea, procesele de natură adezivă și procesele de tip oboseală superficială.

Odată identificată familia mecanismelor de uzare, este necesară particularizarea acestuia unuia din cele peste 15 forme de uzare cunoscute în momentul de față. Tabelul 2.7 prezintă unele informații preliminare care ajută identificarea modului de uzare funcție de domeniul de utilizare al organului de mașină în discuție.

Tabelul 2.7. Moduri de uzare și domeniul potențial de manifestare

| Mod de uzare | Domeniu potențial de manifestare |
|------------------------------|---|
| Abraziune | |
| Tensiuni reduse | Utilaj agricol, vehicularea minereurilor |
| Tensiuni ridicate | Utilaje de sfărâmare |
| Găurire | Manipularea minereurilor, sortarea mineralelor |
| Lustruire | Manipularea solidelor cu inserții de minerale |
| Eroziune | |
| Particule solide | Echipamente de sablare |
| Presiune de fluide | Coturi de tubulatură |
| Cavitație | Pompe, amestecătoare, echipamente ultrasonice |
| Eroziune cu noroi | Utilaj foraj petrolier, pompe, îmbunătățirea minereurilor |
| Adeziune | |
| Fretaj | Organe de mașină fixe una față de alta |
| Uzare adezivă | Roți dințate, came, ghidaje, bucșe |
| Roadere | Supape, suprafețe de alunecare, bucșe |
| Apucare | Sisteme cu alunecare uscată |
| Uzare oxidativă | Sisteme cu alunecare cu aliaje dure |
| Oboseală superficială | |
| Pitting | Dinți de roți dințate, lăgăruri ale laminoarelor |
| Exfoliere | Componente tratate superficial |
| Impact | Ciocane, scule de nituire |
| Deformări locale | Suprasarcini statice, lăgăruri ale componentelor laminoarelor |

În măsura în care modul de uzare într-un anumit tribosistem nu este clar pentru proiectant, se pot face unele observații care să-l ghideze pe acesta privind fenomenele ce au loc în tribosisteme uzuale:

- Când două metale alunecă unul pe celălalt și este foarte probabil ca ele să nu fie lubrificate prin metode hidrodinamice va avea loc o frecare metal pe metal. Dacă sarcinile sunt ridicate și de tip punctiform sau liniar pot apărea fenomene de uzare adezivă. Dacă ambele metale au durități de peste 50 HRC iar solicitările sunt moderate, pot apărea fenomene de uzare oxidativă.
- În sistemele ceramică-metal se va uza componenta metalică printr-un mecanism ce combină abraziunea de către corpul ceramic și uzarea oxidativă de către resturile de oxizi rămase în urma uzării prin frecare relativă
- Polimerii cu aditivi anorganici vor provoca în majoritatea cazurilor fenomene de uzare abrazivă la solicitări reduse pe suprafețele metalice.
- Echipamentele ce manipulează substanțe anorganice dure vor fi întotdeauna subiectul unei forme de uzare abrazivă.
- Uzarea prin lustruire apare la majoritatea componentelor care ghidează alte organe de mașină din alcătuirea echipamentului.
- Cavitația este un mecanism potențial de uzare în majoritatea echipamentelor de

transport și amestec a fluidelor. Dacă lichidele conțin și particule anorganice în suspensie, modul potențial de uzare este hidroabraziunea.

- Uzarea prin fretare este aproape inevitabilă în sistemele cu șuruburi care sunt supuse solicitărilor alternante de amplitudine redusă.
- "Iustruirea" este un mod potențial de uzare în majoritatea echipamentelor cu fibre și în echipamente în care apar alunecări intermitente, nelubrificate, la viteze reduse și în prezența forțelor normale pe suprafață.
- Uzarea adezivă în forma cea mai gravă apare cel mai frecvent în sistemele nelubrificate metal - metal în care unul sau ambele materiale este moale.
- Oboseala suprafeței sub forma pittingului sau a exfolierilor este foarte probabilă în sistemele în care apar solicitări de tipul contactului hertzian.

Se pot face și alte observații cu caracter general privind tipurile de uzare ce pot apărea într-un tribosistem, într-un mod asemănător celor de mai sus, cu un caracter general. Principalul punct care trebuie avut în vedere este acela că profilul determinat al materialului trebuie să satisfacă cerințele privind forma de uzare anticipată.

2.9. Algoritm de selecție a tehnicilor de depunere a straturilor subțiri

Alegerea unui procedeu de realizare a unui strat funcțional este un proces decizional complex, care trebuie să aibă în vedere pe lângă factorii de natură științifică și elemente de natură economică.

Disponibilitatea noilor procedee tehnologice cu dotările tehnice pe care le impun, disponibilitatea spre schimbare a societății, capacitatea de a accepta schimbări tehnologice majore sunt elemente subiective aparent simple cu rol major când tehnologiile curente nu mai satisfac cerințele pieței tradiționale de desfacere. Alături de caracteristicile ce pot fi obținute prin procedeele disponibile în cadrul firmei sau în cercul de relații economice ale sale, elementul determinant este raportul calitate/preț care suplimentare caracteristicilor tehnice permit sau elimină utilizarea unor procedee de altfel bine stăpânite. Un exemplu în acest sens este cel al straturilor subțiri realizate prin metode difuzionale, la care suprapunerea proprietăților de exploatare obținute este evidentă și pune în dilemă tehnologul unei întreprinderi cu dotări deosebite.

Figura 2.8 prezintă domeniile de grosime de strat și duritate realizate prin diferite procedee, în timp ce figura 2.9 ilustrează principalele tratamente termochimice în ceea ce privește spectrul de durități obținabile.

| | Grosimea stratului, μm | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|------|
| | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 200 | 400 | 800 | 1200 |
| Cementare | | | | | | | | | |
| Pachet | | | | | | | | | |
| Gaz | | | | | | | | | |
| Lichide | | | | | | | | | |
| Vid | | | | | | | | | |
| Nitrurare | | | | | | | | | |
| Gaz | | | | | | | | | |
| Săruri | | | | | | | | | |
| Ionică | | | | | | | | | |
| Carbonitrurare | | | | | | | | | |
| În gaze | | | | | | | | | |
| Cianizare | | | | | | | | | |
| Nitrocarburare | | | | | | | | | |

Figura 2.8. Domenii de grosime de strat realizate prin diferite procedee

| | Duritatea HV | | | | | | | |
|-------------------------|--------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 |
| Cementare | | | | | | | | |
| Nitrurare | | | | | | | | |
| Carbonitrurare | | | | | | | | |
| Borurare | | | | | | | | |
| Carburi de titan | | | | | | | | |
| Cromare | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Duritatea HV

Figura 2.9. Spectre de duritate pentru diferite procedee de realizare a straturilor subțiri

Suprapunerile spectrelor de grosimi și de durități sunt evidente și numeroase aplicații pot fi soluționate prin mai multe procedee, utilizând mai multe tipuri de materiale și constituenți. De aceea, activitatea de selecție se complică suplimentar și va trebui să aibă în vedere elemente suplimentare, cum sunt tenacitatea impusă substratului, efectul temperaturii de realizare a stratului funcțional asupra substratului și altele.

Cu totul diferit stau lucrurile atunci când seriile sunt scurte sau se execută unicate. În acest caz, în majoritatea cazurilor "drumul cunoscut este cel mai scurt".

În mod evident, elementul ce stă la baza alegerii unui material sau a unei familii de materiale este rolul său funcțional. Cele 8 proprietăți funcționale esențiale sunt cele menționate în capitolul 1:

- rezistența la uzare
- rezistența la coroziune
- rezistența la oxidare la temperaturi reduse
- rezistența la coroziune și oxidare în gaze fierbinți
- izolații termice
- proprietăți electrice
- proprietăți optice
- proprietăți de compatibilitate biologică

Fiecare din obiectivele funcționale menționate mai sus pot fi atinse prin mai multe procedee, respectiv fiecare procedeu de acoperire permite atingerea mai multor obiective funcționale.

Grila 1 permite într-o primă aproximație selecționarea / excluderea procedeele care permit sau nu obținerea unei familii de obiective (caracteristici) funcționale.

În mod evident, relația procedeu - proprietate funcțională este nedeterminată, motiv pentru care nu este suficientă alegerii procedeele de acoperire. În completarea ei vin relațiile dintre procedeele de acoperire și celelalte elemente caracteristice ale stratului funcțional - grosime de strat, materialul substratului, materialul stratului etc.

Grila 1. Relația procedeu - proprietate funcțională.

| | | Uzare | Coroziune | Oxidare | Coroz. gaze fierbinți | Izolator termic | Propr electrice | Propr. optice | Biocompatibilitate |
|----------------------|---|-------|-----------|---------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Sudare | 0 | x | x | x | x | | | | |
| Placare | 1 | x | x | | | | | | |
| Pulverizare | 2 | x | x | x | x | x | x | | x |
| Chimic | 3 | | x | | | | x | x | |
| Electrochimic | 4 | x | x | | | | | x | |
| Termochimic | 5 | x | | x | x | | | | |
| PVD | 6 | x | | | | | | | |
| CVD | 7 | x | | | | | | x | |

Grila 2 prezintă relația procedeu de realizare a stratului - grosime de strat pentru aceleași procedee și are în vedere cerințele impuse de proiectant având în vedere durata de viață estimată a produsului, natura mediului de lucru și condițiile concrete de exploatare.

Grila 2. Relația grosime a stratului - procedeu

| | | $s < 50 \mu\text{m}$ | $50\mu\text{m} < s < 1\text{mm}$ | $s > 1 \text{ mm}$ |
|----------------------|---|----------------------|----------------------------------|--------------------|
| Sudare | 0 | | | x |
| Placare | 1 | | | x |
| Pulverizare | 2 | x | x | x |
| Chimic | 3 | x | x | |
| Electrochimic | 4 | x | x | |
| Termochimic | 5 | x | | |
| PVD | 6 | x | | |
| CVD | 7 | x | | |

În mod evident, procedeul de acoperire va trebui să țină seama în principal de natura materialului și substratului, care limitează sau nu permite utilizarea anumitor procedee.

Grila 3 prezintă relația procedeu de încărcare - caracteristici fizico - chimice ale substratului, în timp ce grila 4 prezintă relația procedeu de încărcare - caracteristici fizico - chimice ale materialului stratului.

Grila 3. Relația procedeu - caracteristici ale substratului

| | | Cond. electric | Izolator electric | Termostabil | Termodergadabil | Inflamabil |
|----------------------|---|----------------|-------------------|-------------|-----------------|------------|
| Sudare | 0 | x | | x? | | |
| Placare | 1 | x | | x? | | |
| Pulverizare | 2 | x | x | x | x | x |
| Chimic | 3 | x | x | x | x | x |
| Electrochimic | 4 | x | | x? | | |
| Termochimic | 5 | x | x | x | | |
| PVD | 6 | x | x | x | x | x? |
| CVD | 7 | x | x | x | | x |

Grila 4. Relația procedeu de acoperire - caracteristici ale materialului stratului

| | | Cond. electric | Izolator electric | Termostabil | Termodegradabil | Consistență moale” | Consistență “fermă” |
|----------------------|---|----------------|-------------------|-------------|-----------------|-----------------------|------------------------|
| Sudare | 0 | x | | x? | | | x? |
| Placare | 1 | x | | x? | | | x? |
| Pulverizare | 2 | x | x | x | x | x | x? |
| Chimic | 3 | x | x | x | x | x | x? |
| Electrochimic | 4 | x | | x? | | | x? |
| Termochimic | 5 | x | x | x | | | x? |
| PVD | 6 | x | x | x | x | X | x? |
| CVD | 7 | x | x | x | | | x? |

Suplimentar caracteristicilor materialului stratului și substratului, natura acestora intervine ca element restrictiv suplimentar în alegerea procedeului de acoperire. Grilele 5 și 6 prezintă aceste limitări pe familii de materiale ingineresti, respectiv pe clase de materiale. Este evident că procedeele ce impun prezența materialului substratului sau a stratului în circuitul electric care reprezintă sursa termică a procedeului elimină în mod automat unele din procedeele de realizare a straturilor funcționale, în timp ce prezența materialelor termodegradabile sau a ceramicelor este un factor limitator al temperaturilor maxime de proces, respectiv al gradientilor de temperatură care pot să apară pe parcursul procesului de realizare a stratului funcțional.

Grila 5. Clasa materialului substratului

| | | Metalic | Ceramic | Material organic termostabil | Material organic termodegradabil | Compuși intermetalici |
|----------------------|---|---------|---------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Sudare | 0 | x? | | | | |
| Placare | 1 | x? | | | | |
| Pulverizare | 2 | x | x | x | x | x |
| Chimic | 3 | x | x | x | | x |
| Electrochimic | 4 | x | x | x | | |
| Termochimic | 5 | x? | x | x | x | |
| PVD | 6 | x | x | x | x | x |
| CVD | 7 | x? | x | x | x | x |

Grila 6. Clasa materialului stratului

| | | Metalic | Nemetalic | Metaloid | Faze dure (M) | Faze dure (NM) | Cermeturi | Plastice |
|----------------------|---|---------|-----------|----------|---------------|----------------|-----------|----------|
| Sudare | 0 | x | | | | | | |
| Placare | 1 | x | | | | | | |
| Pulverizare | 2 | x | x | x | x | x | x | x |
| Chimic | 3 | x | x | x | | x | | |
| Electrochimic | 4 | x | x | x | | x | | |
| Termochimic | 5 | | x | x | x | | | |
| PVD | 6 | x | x | x | x | x | x | |
| CVD | 7 | x | x | x | x | x | x | x |

Ca rezultat al unei analize efectuate în acest sens, se poate decela o grupă de procedee care permit obținerea unei grupe de proprietăți funcționale.

Analiza poate merge mai departe, prin particularizarea (detalierea mai avansată) familiilor de procedee de sudare, respectiv materiale.

Un asemenea exemplu este prezentat în grila 7, care detaliază procedeele de sudare și materialele care pot fi rezultat al unui procedeu de încărcare. Materialul substratului este întotdeauna metalic, conducător electric, cu temperatura de topire medie și ridicată (peste 1000 °C în majoritatea cazurilor).

Grila 7. Relația procedeu de sudare - clasă de aliaje metalice

| | | Oțel carbon | Aliaje dure martensitice | Oțel înalt aliat martensitic | Oțel înalt aliat ledeburitic | Oțel Cr - Ni anticoroziune | Aliaje ale Ni, superaliaje | Cermeturi | aliaje NiCrBSi, NiCrB |
|---------------|---|-------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|-----------------------|
| SE | 1 | x | x | x | x | x | x | | |
| SF | 2 | x | | x | x | x | | | |
| MIG | 3 | x | x | x | x | x | x | | |
| MAG | 4 | x | x | x | x | x | | | |
| EB | 5 | x | | x | x | x | | | |
| WIG | 6 | x | x | x | x | x | x | x | |
| Oxigaz | 7 | x | x | x | | x | | x | x |
| PTA | 8 | x | x | x | x | x | x | x | x |

În mod asemănător, se poate realiza o corelare între varianta procedeuului de acoperire prin pulverizare termică și familia de materiale depuse.

Grilele prezentate se pot utiliza în vederea realizării unui program pentru selecția preliminară a procedeeului de acoperire utilizabil la realizarea unei familii de proprietăți funcționale.

Coloana 9 a grilei 1 cuprinde o numerotare a procedeelor care permite pentru fiecare familie de proprietăți funcționale (grila 1) codificarea binară a procedeelor utilizabile.

De exemplu, pentru realizarea unor straturi rezistente la coroziune în gaze fierbinți (coloana 4), se pot utiliza sudarea, pulverizarea termică, procedee termochimice, cărora le corespunde numărul binar 10100100.

Prin analiza tuturor celorlalte elemente (grosime de strat, caracteristici strat și substrat, material strat și substrat) se obțin o serie de numere cu exprimare binară, a căror intersecție (operator "și") permite reducerea la minimum a procedeelor care satisfac toate condițiile impuse. Un asemenea mod de lucru facil de automatizat simplifică activitățile de selecție și permite orientarea rapidă a proiectanților și tehnologilor.

Pentru exemplificare, se propune următoarea aplicație:

Realizarea unor straturi rezistente la uzare pe substrat metalic stabil termic cu grosimea în intervalul $0,5 \div 1$ mm, fără pretenții privind stabilitatea termică a stratului, cu conținut de faze dure.

Pe baza grilelor se poate completa tabelul 2.10.

Tabelul 2.10. Rezultatul analizei pentru selecția procedeeului

| | Sudare | Placare | Pulverizare termică | Chimic | electrochimic | Termochimic | PVD | CVD |
|---|----------|----------|---------------------|----------|---------------|-------------|----------|----------|
| Proprietăți antiuzură | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Substrat metalic | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Gros $0,5 \div 1$ mm | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Stabilitate termică substrat | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Strat cu conținut de faze dure nemetalice | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Rezultat | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

În consecință, familiile de procedee care asigură realizarea obiectivelor funcționale menționate sunt pulverizarea termică și procedeele electrochimice. Analiza poate intra în profunzime, pentru ca pornind de la elemente mult mai concrete legate de condițiile de exploatare și detaliind posibilitățile și limitele fiecărui procedeu să se poată opta pentru variante tehnologice și clase de materiale.

CAPITOLUL 3. PROCEDEUL PTA. FACTORII CARE DEFINESC CALITATEA DEPUNERILOR

3.1. Încărcarea prin sudare în plasmă cu pulberi

Încărcarea în plasmă cu pulberi (PTA - **P**lasma **T**ransferred **A**rc) este unul din cele mai performante procedee de sudare în mediu de gaze protectoare, având un avantaj deosebit în domeniul încărcărilor dure și antiuzură: diluția foarte redusă și controlul precis al acesteia. Acest fapt face ca procedeul să cunoască o răspândire crescândă în țările Pieței Comune în domeniul realizării straturilor antiuzură și anticorrosiune, pentru componente de gabarite foarte variate. Deosebirea esențială dintre pulverizarea cu jet de plasmă și încărcarea cu arc de plasmă este aceea că spre deosebire de pulverizarea termică, unde mecanismul aderenței stratului pe substrat are la bază agățarea mecanică și uneori fenomene difuzionale, la procedeul PTA apare o îmbinare intimă, cu caracter metalurgic între MB și MA.

3.1.1. Principiul procedeeului

Încărcarea în plasmă cu pulberi este un procedeu de încărcare de sudare în mediu de gaze protectoare arc cu arc transferat la care materialul de adaos este pulverulent. Figura 3.1 prezintă schematic structura unui sistem de încărcare cu plasmă și pulberi /1/.

Din reprezentarea din figura 3.1 s-a renunțat la reprezentarea pupitrului de comandă al procesului, care realizează funcțiunile de temporizare ce asigură buna funcționare a sistemului.

În timp ce gazul plasmagen are rolul asigurării unei atmosfere inerte în care arcul de plasmă transferat arde stabil, la un potențial redus al gazului, gazul de transport asigură o atmosferă protectoare care asigură deplasarea pe pat fluidizat pulberilor din dozatorul de pulberi spre generatorul de încărcare, asigurând o atmosferă cu potențial ușor reducător până la intrarea pulberilor în arcul transferat.

Instalația de răcire asigură stabilitatea termică a instalației răcind electrodul de wolfram și duza de constrângere a arcului de plasmă. Dimensionarea sistemului de răcire este de mare importanță, dat fiind bilanțul termic al arcului de plasmă, din a cărui putere activă circa 30% se disipă pe duza de constrângere a arcului.

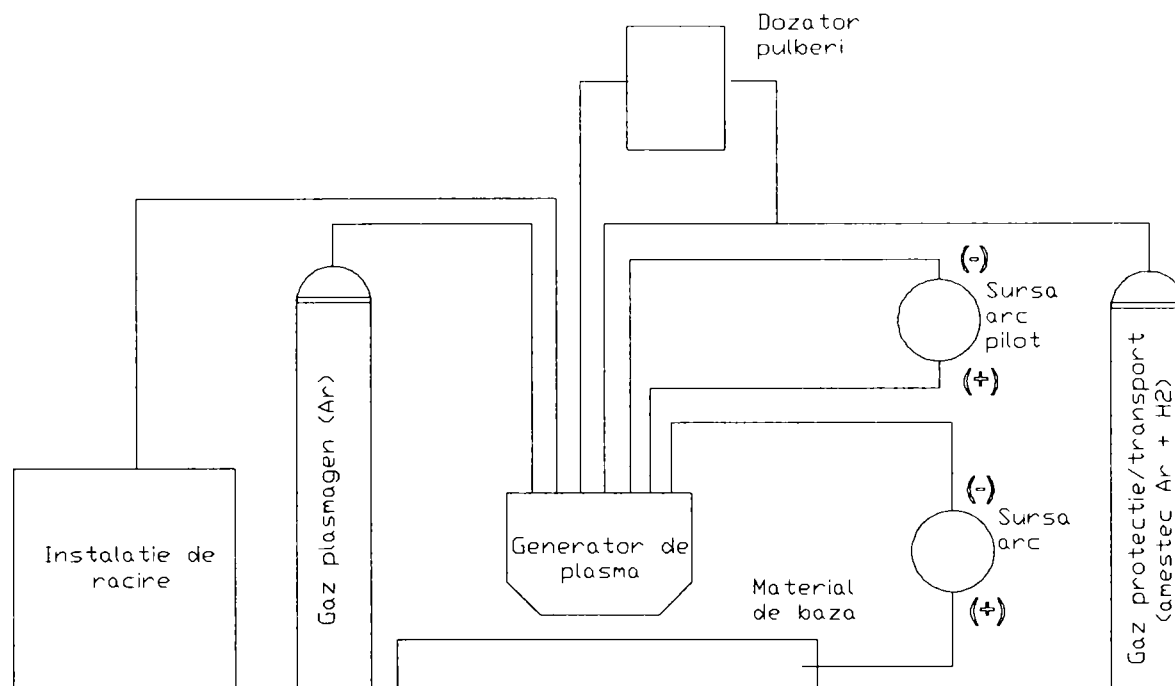


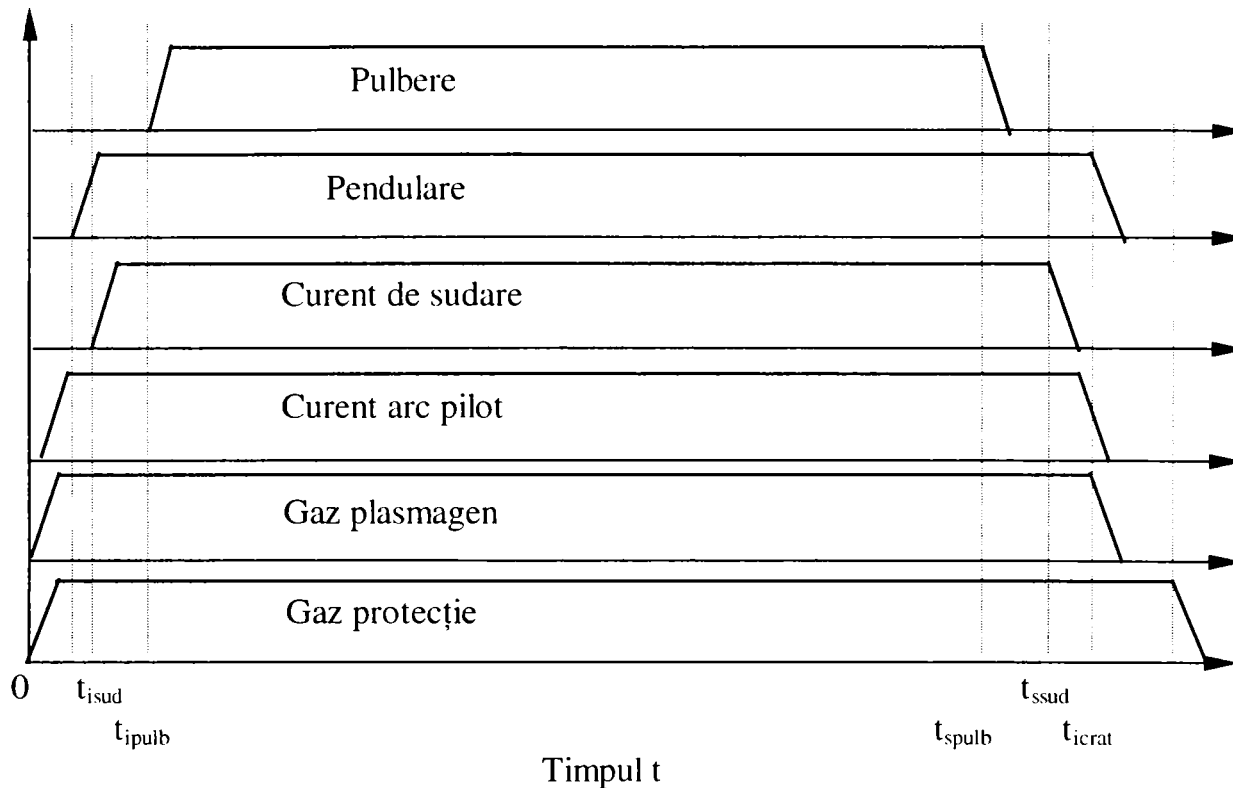
Figura 3.1 - Schema simplificată a instalației de încălzire în plasmă cu pulberi

Funcționarea instalației trebuie să respecte o succesiune bine definită în ceea ce privește gazele plasmagen și de transport, respectiv curentul de sudare și mișcările tehnologice care definesc parametrii geometrici ai depunerii: lățimea și frecvența pendulării, respectiv viteza de sudare.

Figura 3.2 prezintă ciclograma de funcționare a unei asemenea instalații de încălzire:

Sucesiunea alimentării cu gaz plasmagen și de transport, asigurarea pendulării și pornirea transportului de pulbere realizează îndeplinirea condițiilor care duc la obținerea unor rezultate stabile și repetabile:

- Asigurarea unei durate ridicate de viață a electrodului prin spălarea avansată cu argon înaintea amorsării și la răcire până în domeniul de temperaturi de sub 250 °C, la care se evită oxidarea electrodului;
- Evitarea realizării unei pătrunderi accentuate pe punctul de amorsare prin pendularea arcului transferat fără adaos de pulberi (material de adaos);
- Asigurarea aderenței depunerii prin realizarea în punctul de pornire al depunerii a unei temperaturi suficiente a materialului de bază (topirea suprafeței substratului pe întreaga lățime a depunerii);
- Închiderea craterului final prin pendularea băii metalice după oprirea dozării de pulberi;
- Evitarea formării fisurilor de crater prin reducerea vitezei de răcire a băii metalice;
- Protejarea băii metalice până la temperatura la care materialul depunerii nu mai este afectat de contaminarea atmosferică.



t_{isud} – începerea sudării (curent)

t_{ipulb} – începerea adaosului de pulbere

t_{spulb} – sfârșitul adaosului de pulberi

t_{ssud} – oprirea procesului de sudare (curent)

t_{icrat} – închiderea craterului

Figura 3.2 - Ciclogramă la sudarea prin procedeul de încărcare cu plasmă și pulberi

În mod uzual, toți parametrii prezentați în ciclograma din figura 3.2 sunt reglabili independent, atât ca valoare cât și ca momentul activării sau dezactivării funcțiilor. Arcul pilot corespunde aproximativ ca durată de ardere curgerii gazului plasmagen și se situează ca valoare la aproximativ 5 - 10% din valoarea curentului de sudare.

3.1.2. Sursa termică a procesului de sudare

Procedeul de încărcare în arc de plasmă transferat cu pulberi utilizează două surse termice (arce electrice) reglabile în general independent, alimentate de la două surse de putere independente, dintre care una realizează funcția de stabilizare a arcului electric (*arcul pilot*) iar cealaltă (*arcul transferat*) realizează funcția de sursă termică la sudare.

Arcul pilot

Arcul pilot este descărcarea electrică cvasipermanentă ce arde între electrodul nefuzibil de wolfram și duza de cupru perforată, răcită de apă.

Arcul pilot este amorsat de o descărcare de înaltă tensiune care realizează ionizarea în incinta internă a generatorului de încărcare (atmosfera: argon), moment în care se aplică o tensiune de curent continuu care duce la amorsarea unei descărcări electrice staționare, reprezentând arcul pilot. Menținerea arcului pilot este stimulată și de emisia

termoelectrică a vârfului electrodului de wolfram prin efect Joule, respectiv de ușoara radioactivitate a materialului electrodului (în mod uzual, WT 20 - wolfram cu adaos de 2,0% oxid de thoriu).

Densitatea de curent de electroni este dependentă de temperatură și natura materialului din care este confecționat electrodul conform ecuația lui Richardson:

$$j_k = A_R * T^4 * e^{-\frac{U_{ak}}{kT}} \quad (3.1)$$

în care A_r - constanta Richardson iar U_{ak} - energia de extragere

Prin reglajul corespunzător al parametrilor se formează în duza de constrângere a generatorului un arc difuz, care staționează pe peretele interior al duzei de plasmă. Condițiile de formare și stabilizare a arcului pilot sunt asigurate de o valoare ridicată a raportului I_p/v_g .

Cu toate că intensitatea arcului pilot este în mod uzual de max. 10% din valoarea curentului de sudare, valorile uzuale ale curentului în arcul pilot sunt în intervalul 10 ÷ 100 A cu tensiuni ale arcului cuprinse în intervalul 10 ÷ 15 V, iar puterea arcului pilot nu depășește în mod uzual 1,5 kW din considerente de limitare a puterii disipate de sistemul de răcire.

Randamentul termic al arcului pilot nu depășește 30%, restul pierzându-se prin circuitul de răcire al generatorului pe pata anodică și catodică, respectiv prin radiație prin orificiul duzei și convecție prin gazul plasmagen, în afara duzei de constrângere a arcului.

Funcțiile arcului pilot în funcționarea generatorului de plasmă de încărcare sunt:

- amorsarea arcului electric transferat la tensiuni reduse de mers în gol ale sursei principale prin formarea unui jet de plasmă ionizat între electrodul de wolfram și substrat;
- arderea stabilă a arcului transferat în condițiile variației sensibile a lungimii distanței generator-substrat și deplasării generatorului transversal pe sensul de deplasare;
- asigură condițiile de preîncălzire a pulberilor, reducând necesarul de putere al arcului transferat pentru topirea acestora. Acest fapt se reflectă în reducerea diluției depunerilor.

b. Arcul transferat

Arcul transferat (de plasmă) este sursa termică principală la procedeul PTA. El este alimentat de o sursă de curent continuu cu caracteristică puternic căzătoare (panta peste 10V/A) și arde între electrodul nefuzibil de wolfram și substrat. Arcul de plasmă asigură transferul de căldură de la arcul electric la materialul de adaos - pulbere și realizează topirea controlată a substratului. Transferul de căldură între arcul de plasmă și pulberi are loc prin radiația arcului și respectiv convecție în jetul de gaz ionizat pe care îl parcurg pulberile.

Transferul termic prin radiație termică între pulbere și plasmă depinde de:

- capacitatea de absorbție a căldurii de către pulbere, funcție de modul de elaborare, starea suprafeței și compoziția sa chimică;

- conductivitatea termică a gazului plasmagen;
- entalpia gazului plasmagen;
- natura gazului plasmagen.

Gradul de topire al pulberii depinde de proprietățile termofizice ale materialului acesteia și gazului plasmagen, respectiv de timpul de staționare al pulberilor în arc de plasmă. Căldura preluată de pulberi este determinată prin relația:

$$Q_p = \alpha_t * T * t \quad (3.2)$$

în care: α_t - coeficientul de transfer de căldură, T - temperatura arcului, t - timpul de staționare în arc și face abstracție de temperatura pulberilor, nesemnificativă în raport cu temperatura arcului transferat.

Temperatura maximă atinsă de pulberi și timpul de staționare în arc se reglează prin parametrii de proces, respectiv valoarea curentului în arc transferat, debitele de gaz plasmagen și de transport, respectiv prin distanța generator - substrat.

3.1.3. Soluții constructive pentru generatoarele de încărcare

Deoarece soluțiile constructive ale generatoarelor de încărcare cu plasmă și pulberi fac în mod uzual obiectul brevetării, soluțiile constructive utilizate de furnizorii de echipamente conțin elemente constructive caracteristice fiecărei firme. Cu toate acestea, se utilizează în practica industrială curentă două modalități de introducere a pulberii în arc de plasmă, care determină denumirea soluției constructive adoptate.

La generatoarele cu introducere internă a pulberii, gazul plasmagen (plasma) ce curge cu viteze relativ ridicate prin duza generatorului (până la 100 m/s) absoarbe pulberea antrenată de către gazul de transport cu viteze reduse (max. 10 m/s) printr-un efect de injector și o transportă pe materialul de bază sub efectul turbulenței și vâscozității cinematice a plasmăi (figura 3.3).

Se obține un grad ridicat de utilizare al pulberii dacă:

- pulberea se introduce cât de sus posibil în generatorul de plasmă; se exploatează efectul termic al arcului pilot, iar durata de staționare a pulberilor în arc va fi maximă;
- generatorul asigură distribuția uniformă pe circumferință a pulberilor, sub un unghi de incidență cât mai ridicat față de axa coloanei de plasmă,
- plasma arcului transferat curge pe cât posibil turbulent;
- geometria internă a duzei permite injecția radială cu o componentă tangențială a vitezei la coloana arcului.
- Lungimea liberă a arcului de plasmă este cât mai mare.

Generatoarele cu injecție internă au - datorită celor menționate mai sus - avantajul realizării unui grad ridicat de topire al pulberii. Acesta este dependent atât de construcția

generatorului de încărcare (turbulența plasmei, durata de staționare a pulberilor în arc, puterea arcului pilot și transferat, natura gazelor utilizate), dar și de capacitatea pulberilor de a absorbi căldura arcului (reflectivitate la radiația infraroșie, rugozitatea suprafeței particulelor de pulbere, granulație, conductivitate termică etc.).

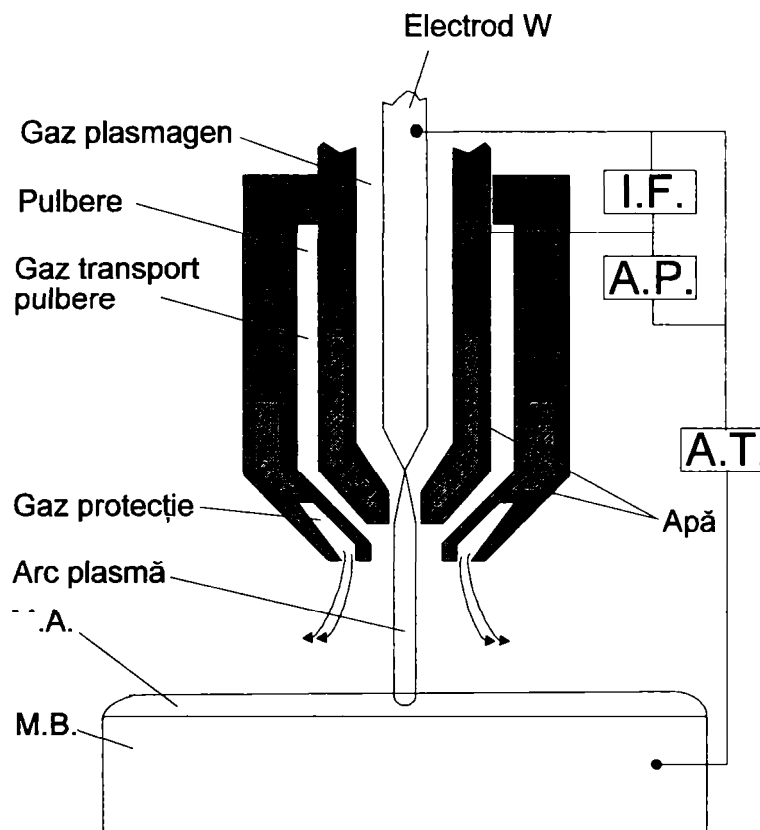


Figura 3.3. Generator cu introducere internă a pulberii

Comparativ cu sistemele cu introducere internă a pulberii, sistemele cu introducere externă a pulberilor - figura 3.4 - prezintă o serie de avantaje și dezavantaje, determinate de condițiile concrete de exploatare și de injecție a pulberilor în arcul transferat, respectiv evitarea parcurgerii duzei de constrângere de către pulberi:

- diluție redusă determinată de transferul termic mai redus între arcul pilot și transferat și pulberile metalice;
- rată de depunere ridicată la o putere egală a arcului transferat;
- risc scăzut de deteriorare a duzei generatorului prin aderențe ale pulberilor topite;
- pierderi ridicate de pulbere (până la 30%) datorită temperaturii mai reduse a pulberilor și respectiv devierii jetului de pulberi de către gazul plasmagen rece ce înconjoară arcul transferat. Pierderile cresc odată cu lărgirea intervalului granulometric al pulberilor pe seama "suflării" particulelor de dimensiuni reduse;
- control dificil al depunerii în sensul limitării topirii substratului, deci al diluției;
- riscul formării de incluziuni de pulberi netopite (putere prea redusă a arcului transferat, debit de pulbere prea ridicat pentru puterea arcului și lungimea liberă, pulberi cu interval granulometric ridicat sau dezechilibrat);
- suprafață rugoasă a depunerilor realizate.

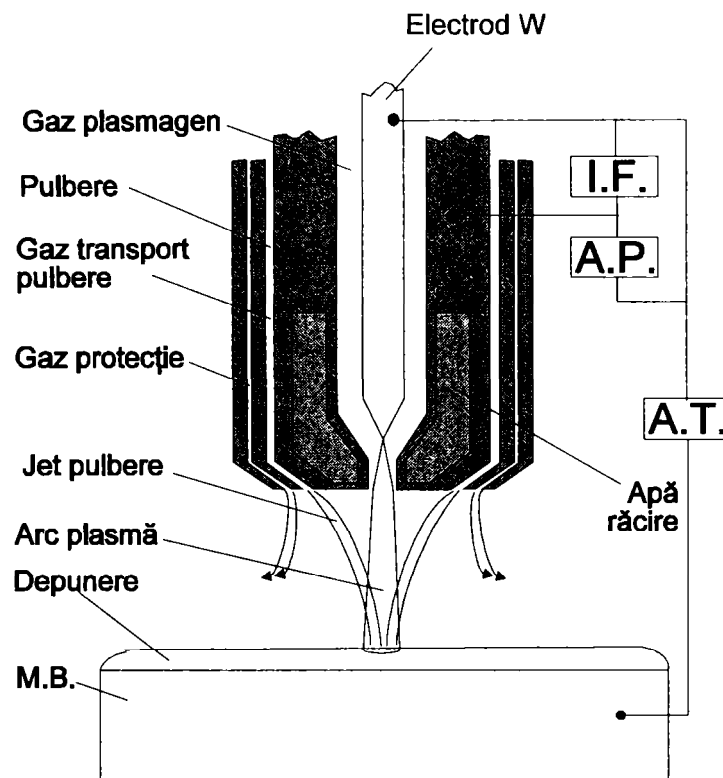


Figura 3.4. Generator de încărcare cu introducere externă a pulberii

Cu toate că utilizarea generatoarelor cu introducere externă a pulberilor prezintă numeroase dezavantaje, ele sunt singurele care fac față ratelor de depunere ridicate pe care le solicită varianta HPTA și care permite atingerea unor parametri extremi: rată de depunere de 16 kg/h la un curent de încărcare de 600 A.

Realizarea încărcării utilizând rate medii de depunere admite atât utilizarea generatoarelor cu introducere internă cât și externă a pulberilor, în timp ce aplicațiile de finețe (MPTA) sau critice în ceea ce privește incluziunile de pulberi netopite utilizează în mod exclusiv sisteme cu injecție internă a pulberilor.

3.2. Influența unor parametri tehnologici asupra calității depunerilor realizate în plasmă cu arc transferat

3.2.1. Introducere.

Procedeul de încărcare cu plasmă și pulberi, este prin numărul ridicat de parametri de proces, un procedeu de sudare care necesită numeroase experimente pentru stabilirea regimurilor optime. Deoarece la fiecare procedeu de încărcare prin sudare se urmărește obținerea unei compoziții chimice bine definite dintr-un număr minim de treceri (straturi), cunoașterea efectului fiecărui parametru tehnologic de regim asupra principalei mărimi geometrice care afectează compoziția chimică și structurală a stratului depus - diluția - este de o deosebită importanță. Asemenea, efectul parametrilor de regim asupra durității matricei metalice la realizarea compozitelor cu matrice metalică prin sudare este de mare importanță în prognoza rezistenței la uzare a

depunderilor realizate în medii abrazive cu și fără șocuri.

În întâmpinarea experimentatorului vin metode matematice statistice care permit simplificarea programelor de cercetare derulate și reducerea numărului de încercări.

Dintre acestea, metoda factorială este cea care permite diminuarea semnificativă a numărului de încercări experimentale prin determinarea unor parametri primari și eliminarea parametrilor secundari de influență, respectiv prin stabilirea sensului gradientului funcției obiectiv și reprogramarea experimentului într-un alt punct al spațiului factorilor de influență situat pe gradientul pozitiv al funcției obiectiv.

Materialele utilizate în programul experimental sunt cele care fac obiectul prezentei teze de doctorat.

Aliajul formator de matrice este un aliaj FeCrNi – tabelul 3.1, în timp ca material de ranforsare al matricei metalice s-a utilizat carbură de wolfram – tabelul 3.2. Proprietățile de exploatare ale pulberilor menționate sunt prezentate în anexa 1 – Materiale utilizate în programul experimental.

Tabelul 3.1. Pulbere P 40, producător Höganäs AB, Suedia

Granulație:

Compoziția chimică pe șarjă:

| Analiza chimică | Rezultatele măsurătorilor | |
|------------------------|----------------------------------|-----|
| C | 2,27 | % |
| Si | 1,06 | % |
| B | <0,01 | % |
| Fe | Rest | % |
| Cr | 24,42 | % |
| Ni | 10,97 | % |
| Co | 0,03 | % |
| Mo | 0,62 | % |
| Mn | 0,31 | % |
| S | 0,016 | % |
| P | 0,010 | % |
| N | 0,042 | % |
| O _{tot} | 0,008 | % |
| Duritate MD | 380 – 400 | HV5 |

Tabelul 3.2. Pulberea WSC, producător WOKA GmbH, Germania

Granulație: 63 – 180 μm

Compoziția chimică pe șarjă:

| Analiza chimică | Rezultatele măsurătorilor | |
|------------------------|----------------------------------|---|
| C | 3,93 | % |
| Fe | 0,20 | % |
| W | Rest | % |
| impurități | 0,25 | % |

Din punct de vedere compozițional, aliajul P 40 este un oțel înalt aliat CrNi, care, datorită conținutului ridicat de carbon este de așteptat să aibă un aspect ledeburitic, caracterizat de precipitări intense de carburi primare într-o matrice metalică cu precipitări secundare de faze dure. Atomizarea pulberilor s-a efectuat cu apă, fapt ce

face ca pulberea să prezintă urme de oxigen, dar are avantajul unei forme pronunțat sferice a particulelor.

În ceea ce privește carbura de wolfram folosită în programul experimental, elaborarea este realizată prin topire și sfărâmare, fapt ce face ca forma particulelor să fie neregulată iar transportul pulberii să fie dificil.

3.2.2. Efectul variației curentului de sudare asupra pătrunderii, eficienței și morfologiei depunerii.

Deoarece s-a constatat experimental că eficiența depunerii (grad de utilizare al pulberilor, pierderi de pulbere) depinde în condiții identice de debit de pulbere și gaz plasmagen de valoarea intensității curentului de sudare, s-a procedat la realizarea unui set de depuneri cu varierea curentului de sudare și menținerea constantă a celorlalți parametri de regim, în vederea identificării compromisului optim eficiență maximă de utilizare a pulberilor - pătrundere minimă a depunerii. Eficiența utilizării pulberilor a fost evaluată prin prisma supraînălțării realizate a depunerii realizate.

În acest scop, pe o placă de probă din OL 37 cu grosimea de 16 mm s-a realizat o depunere continuă, menținând toți parametrii constanți, mai puțin valoarea curentului de sudare. Materialul de adaos a fost un amestec P 40 + 40% WSC (tabelul 3.1.).

Gazul plasmagen utilizat a fost argonul, iar ca gaz de transport și protecție s-a utilizat un amestec Ar + 6,5% H₂.

Tabelul 3.3. redă valorile parametrilor de regim utilizați la realizarea încercării privind eficiența de utilizare a pulberilor metalice.

Tabelul 3.3. Încercare de eficiență a utilizării pulberilor. Parametrii de regim utilizați.

| Nr. experim. | Q _{tr} l/min | Q _{prot} l/min | Q _{pl} l/min | I _{pl} A | I _p A | Q _{pulb} cm ³ /min | v _s cm/min | H _{gen} mm |
|--------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|---|--------------------------|------------------------|
| 1 | 6 | 13 | 5 | 120 - 180 | 10 | 18 | 10 | 12 |

Figura 3.5. prezintă o suită de imagini macroscopice ale secțiunii longitudinale realizate pe axa longitudinală a depunerii realizate.

Creșterea curentului de sudare se regăsește în creșterea dimensiunilor băii metalice și confirmă fenomenul de segregare la baza topiturilor a carburilor de wolfram odată cu creșterea duratei de viață a băii metalice.

Fenomenul este cel mai vizibil în porțiunea cu valoare maximă a curentului, respectiv în regiunile cu grad ridicat de utilizare al pulberilor.

Pe de altă parte, creșterea curentului de sudare (modificat în experimentul derulat de la 120 la 180 A) a dus la manifestarea unor efecte aparent contradictorii, dar indisolubil legate de relația dintre puterea arcului transferat și geometria, respectiv eficiența de utilizare a pulberilor:

- pătrunderea (interfața substrat - depunere coboară sub nivelul suprafeței substratului cu creșterea curentului de sudare);

- grosimea stratului depus crește odată cu puterea arcului electric ca urmare a creșterii gradului de valorificare al pulberilor introduse în generator.

Nu trebuie însă neglijat efectul de accentuare al segregărilor menționat anterior. De aceea, tehnologia optimă este cea care realizează cea mai ridicată eficiență de utilizare a pulberilor în condițiile evitării fenomenelor de segregare și topire a carburilor.

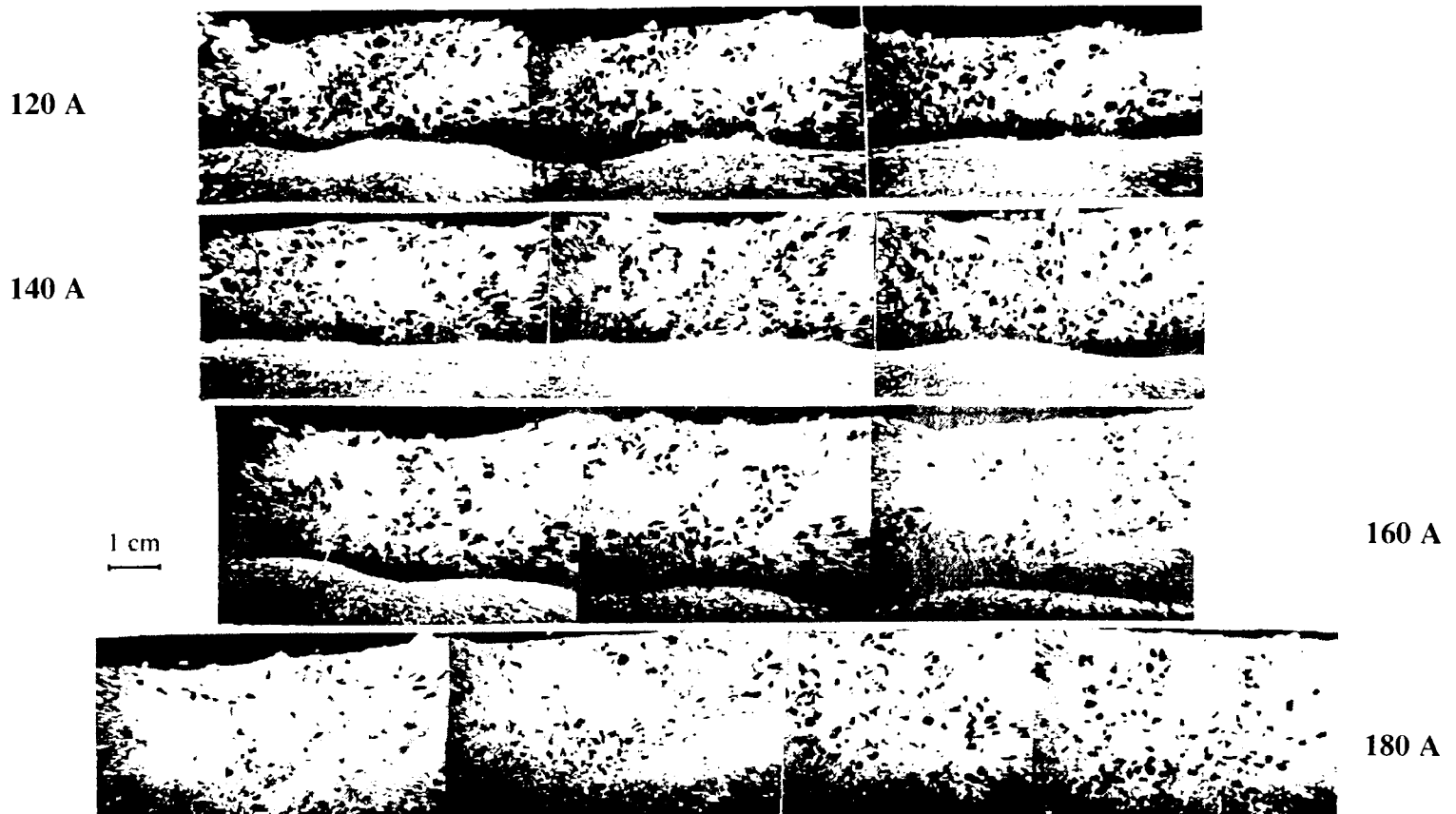


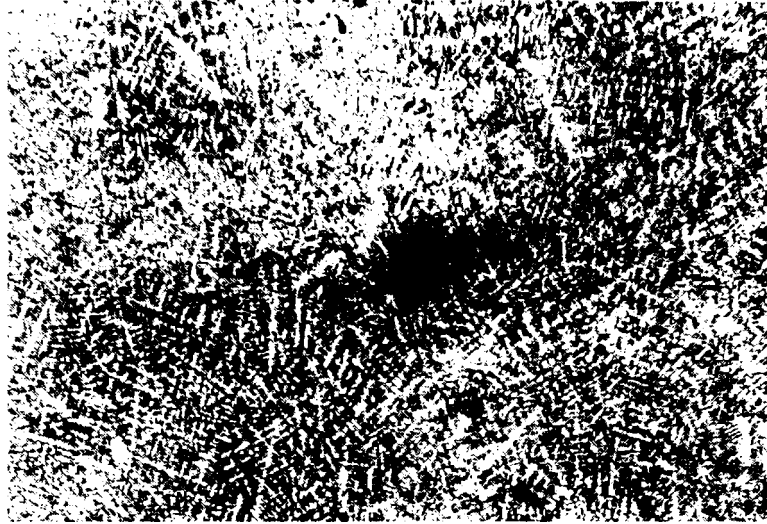
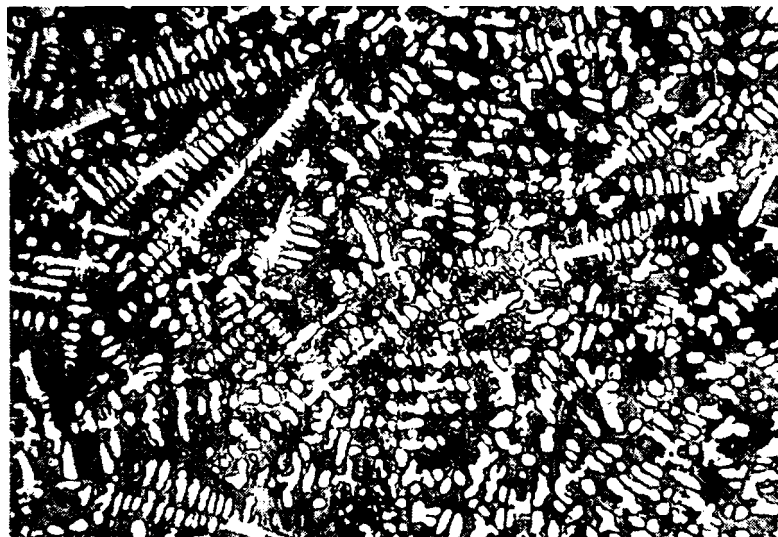
Figura 3.5. Efectul curentului de sudare asupra geometriei depunerilor, 12,5 x

După cum se prezintă în figura 3.5, variația curentului de sudare se regăsește în modificări morfologice semnificative ale depunerilor realizate. Ele se reflectă în:

- segregarea fazelor dure provenind din amestecul de pulberi la baza băii metalice;
- durificarea matricei și tendința ei de fisurare determinată de creșterea proporției de carbon din topitură, rezultat al topirii fazelor dure în condițiile neadecvării parametrilor de regim;
- apariția de fisuri închise și mai apoi deschise.

Ca rezultat al acestor fenomene, apare un fenomen de sărăcire a straturilor superioare în faze dure care conduce la apariția unui gradient nefavorabil de proprietăți de exploatare ale straturilor realizate.

În comparație cu aspectul microstructural al depunerilor realizate cu aliajul P 40 fără adaosuri de faze dure - figura 3.6 a și b, adaosul de faze dure duce la apariția de modificări morfologice semnificative.

Figura 3.6.a. Aliaj P 40, x50, FeCl₃, 125xFigura 3.6.b. Aliaj P 40, x250, FeCl₃, 250x

Se remarcă aspectul dendritic al depunerilor, constituit din dendrite de faze dure cu precipitare primară (așa cum se va releva mai târziu) înglobate într-o matrice fină, cu origine probabil eutectică.

Figurile 3.7, 3.8 și 3.9 prezintă imagini la aceeași mărire ale secțiunii depunerilor, realizate în zona superioară, mediană și respectiv inferioară a depunerilor.

Apariția segregățiilor este evidențiată de

- lipsa fazelor dure netopite în porțiunea superioară a secțiunii realizate;
- aglomerările de faze dure în secțiunea mediană;
- prezența fazelor dure precipitate din topitură în proporție foarte ridicată în toate secțiunile;
- Apariția de faze noi, cu aspect poligonal în volumul matricei depunerii;
- Dezvoltarea unui strat epitaxial pronunțat pe limitele fazelor dure netopite care cresc perpendicular pe fazele dure;
- Dezvoltarea unui strat epitaxial pe interfața substrat - depunere.

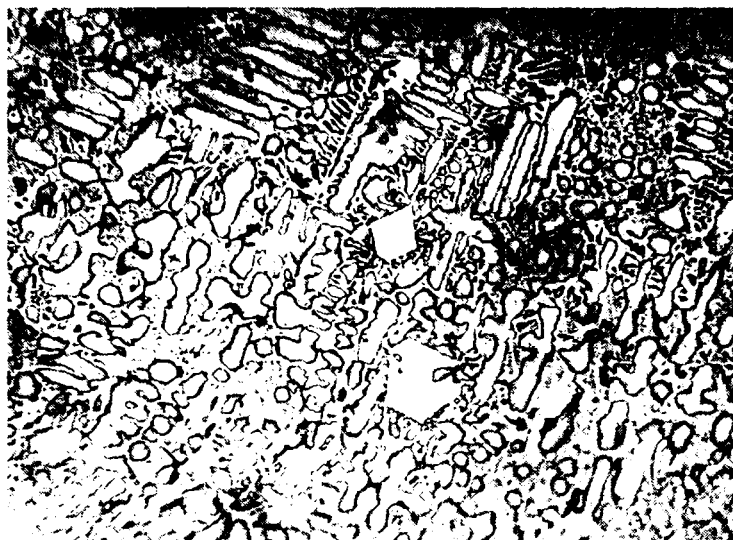


Figura 3.7: Depunere P 40 + 40% WSC, x250, porțiune superioară, Murakami



Figura 3.8. Depunere P 40 + 40% WSC, x250, secțiune mediană, Murakami



Figura 3.9. Depunere P 40 + 40% WSC, x250, secțiune inferioară, Murakami

Ca rezultat al neadecvării parametrilor de regim tipului de material de adaos, suplimentar fenomenelor de segregare, topirea fazelor dure datorată regimului de sudare se regăsește în fragilizarea și fisurarea închisă, mai apoi deschisă a depunerilor

Figurile 3.10 și 3.11 prezintă aceste fenomene la diferite mărimi.



Figura 3.10: Fisură în depunere, x250, Murakami



Figura 3.11. Fisură în depunere, x500, Murakami

După cum reiese din figurile 3.10 și 3.11, fisurile își au originea pe limitele fazelor dure prezente în depunere, în stratul epitaxial de faze dure crescute pe parcursul procesului de solidificare și se propagă în majoritatea cazurilor de-a lungulii axei centrale a carburilor primare cu aspect dendritic din fază dură în fază dură.

De aceea, limitarea proporției carburilor topite și cunoașterea limitei maxime până la care adaosul de faze dure nu afectează comportarea la sudare este un obiectiv deosebit de important în controlul fisurării depunerilor realizate folosind aliaje cu baza fier și adaosuri de faze dure.

3.3. Efectul parametrilor de regim asupra diluției depunerilor. Programarea factorială a experimentului

3.3.1. Planificarea factorială a experimentului cu 8 factori de influență

Principiul metodei factoriale constă în decelarea factorilor de importanță primară și secundară în relație cu funcția obiectiv urmărită. Relațiile de normalizare utilizate în simplificarea calculelor dezvoltate din media aritmetică a limitelor de variație ale factorului de influență urmărit vor fi:

$$\delta_i = \frac{x_{\max i} - x_{\min i}}{2} \quad (3.3)$$

și sunt date de expresiile:

$$p_{i,\text{sup}} = \frac{x_{\max i} - \delta_i}{\delta_i} \quad (3.4)$$

$$p_{i,\text{sup}} = \frac{\delta_i - x_{\min i}}{\delta_i} \quad (3.5)$$

Numărul de experimente (încercări) care explicitează în totalitate influența parametrilor este egal cu 2^k , unde k - numărul de factori de influență. Pentru 3 factori de influență, experimentul complet va avea $2^3 = 8$ încercări și se va derula (conform normalizării) corespunzător tabelului 3.4.

Tabelul 3.4. Programul experimentului complet, 3 parametri

| Încercarea nr. | 0 | 1 | 2 | 12 | 3 | 13 | 23 | 123 |
|----------------|---|---|---|----|---|----|----|-----|
| 1 | + | - | - | + | - | + | + | - |
| 2 | + | + | - | - | - | - | + | + |
| 3 | + | - | + | - | - | + | - | + |
| 4 | + | + | + | + | - | - | - | - |
| 5 | + | - | - | + | + | - | - | + |
| 6 | + | + | - | - | + | + | - | - |
| 7 | + | - | + | - | + | - | + | - |
| 8 | + | + | + | + | + | + | + | + |

Factorii de tip "12" descriu efecte combinate ale mai multor parametri. În practica curentă, în majoritatea cazurilor efectele interdependente sunt însă rare, iar efectul lor este redus sau neglijabil. Această constatare permite înlocuirea interdependențelor de parametri cu alți parametri primari de investigat cu efect mai mare asupra funcției obiectiv, înlocuire ce reduce semnificativ numărul de încercări experimentale. Această procedură se numește program factorial parțial.

Efectul factorilor de influență asupra funcției obiectiv (parametrilor regimului de sudare asupra diluției) se determină în aceste condiții cu relația:

$$Efect = \frac{\sum Z_{i,j}}{\frac{n}{2}} \quad (3.6)$$

în care $Z_{i,j}$ - valoarea funcției obiectiv (diluția) determinată pentru variația parametrului "i" la experimentul "j".

3.3.2. Planificarea experimentului factorial

În acest mod, s-a putut realiza un experiment care să indice dependența diluției procedului PTA ca funcție liniară a 8 parametri - tabelul 3.5 - prin eliminarea efectelor

combinate ale factorilor de influență, acceptate ca fiind ne semnificative în comparație cu efectele directe.

Valoarea diluției a fost determinată pe imagini macrografice prin planimetrie. S-au ridicat probleme deosebite la evaluarea diluțiilor reduse, unde precizia metodei este redusă.

Tabelul 3.5. Planificarea experimentului factorial parțial și valori ale diluției.

| Nr. experim. | Q_{tr} l/min | Q_{prot} l/min | Q_{pl} l/min | I_{pl} A | I_p A | Q_{pulb} cm ³ /min | v_s cm/min | H_{gen} Mm | Diluția % |
|--------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------|------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| 1 | 6 | 13 | 6 | 160 | 10 | 18 | 10 | 12 | 30 |
| 2 | 6 | 13 | 6 | 120 | 5 | 10 | 7 | 12 | 47 |
| 3 | 6 | 13 | 4 | 160 | 10 | 10 | 7 | 8 | 33 |
| 4 | 6 | 13 | 4 | 120 | 5 | 18 | 10 | 8 | 2 |
| 5 | 6 | 10 | 6 | 160 | 5 | 18 | 7 | 8 | 26 |
| 6 | 6 | 10 | 6 | 120 | 10 | 10 | 10 | 8 | 55 |
| 7 | 6 | 10 | 4 | 160 | 5 | 10 | 10 | 12 | 40 |
| 8 | 6 | 10 | 4 | 120 | 10 | 18 | 7 | 12 | 2 |
| 9 | 4 | 13 | 6 | 160 | 5 | 10 | 10 | 8 | 58 |
| 10 | 4 | 13 | 6 | 120 | 10 | 18 | 7 | 8 | 28 |
| 11 | 4 | 13 | 4 | 160 | 5 | 18 | 7 | 12 | 18 |
| 12 | 4 | 13 | 4 | 120 | 10 | 10 | 10 | 12 | 34 |
| 13 | 4 | 10 | 6 | 160 | 10 | 10 | 7 | 12 | 48 |
| 14 | 4 | 10 | 6 | 120 | 5 | 18 | 10 | 12 | 46 |
| 15 | 4 | 10 | 4 | 160 | 10 | 18 | 10 | 8 | 23 |
| 16 | 4 | 10 | 4 | 120 | 5 | 10 | 7 | 8 | 27 |

Încercările au fost efectuate pe instalația IPP 315 dezvoltată la ISIM Timișoara și au avut ca scop decelarea caracteristicilor de lucru ale generatorului în varianta cu introducere internă a pulberii.

3.3.3. Rezultate experimentale

Analiza factorială a efectului parametrilor de regim asupra diluției depunerilor

Efectul celor opt factori de influență asupra funcției obiectiv diluție se determină pe baza relației (3.6).

Pe baza acestei relații, s-au determinat parametrii ecuației de regresie ce descrie dependența funcției obiectiv "**Diluție**" în mod liniar față de parametrii indicați în tabelul 3.5. Tabelul 3.6 indică valoarea parametrilor de regresie astfel determinați.

Tabelul 3.6. Valori ale parametrilor de regresie determinați.

| Parametru | Valoare coef. Regresie | Parametru | Valoare coef. Regresie |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Debit gaz plasmagen Q_{pl} | 20 | Curent pilot I_{pil} | -1,25 |
| Vitaze de sudare V_s | 7,25 | Debit gaz protecție Q_{prot} | -2,25 |
| Curent sudare I_s | 4,5 | Debit gaz transport Q_{tr} | -6 |
| Înălțimea generatorului H_{gen} | 1,75 | Debit pulbere Q_{pulb} | -21 |

Pe baza valorilor calculate, figura 3.12 a - h prezintă efectul diferiților parametri de sudare asupra diluției depunerilor.

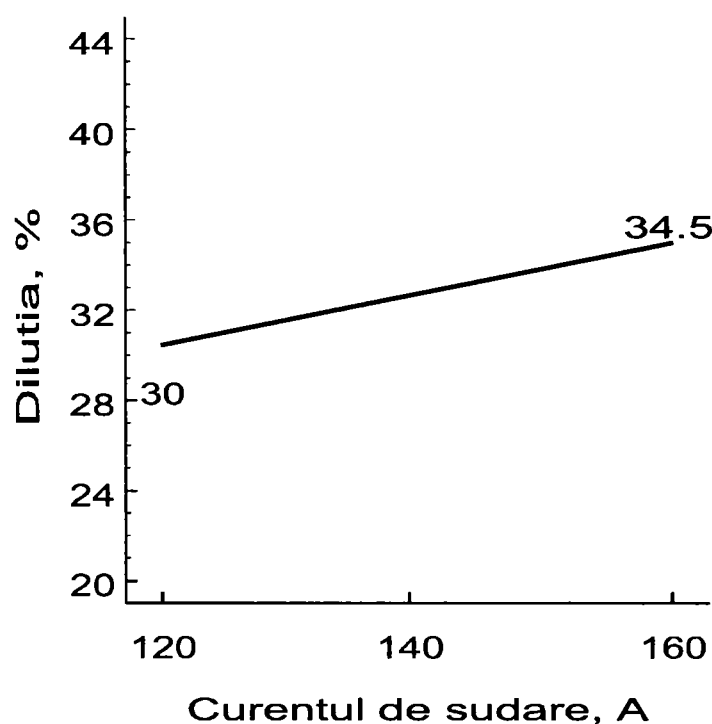


Figura 3.12.a. Efectul curentului de sudare

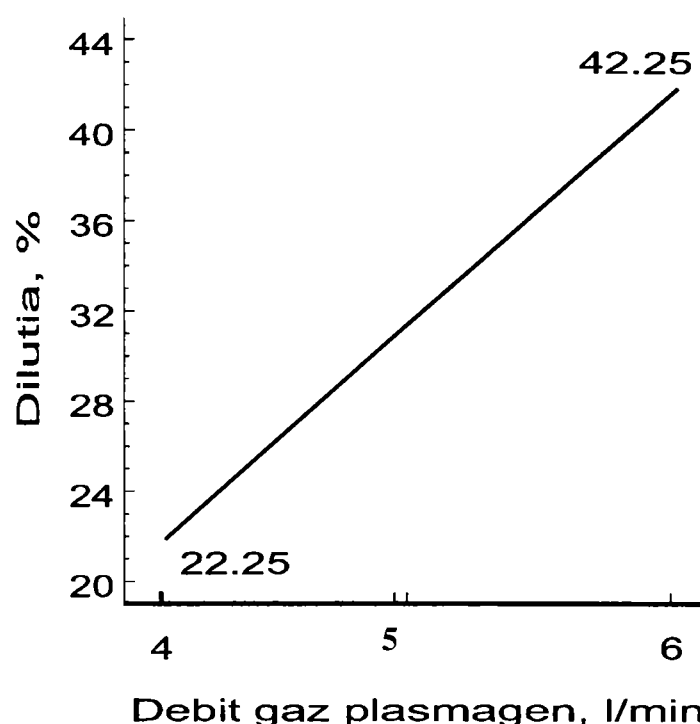


Figura 3.12.b. Efectul debitului de gaz plasmagen

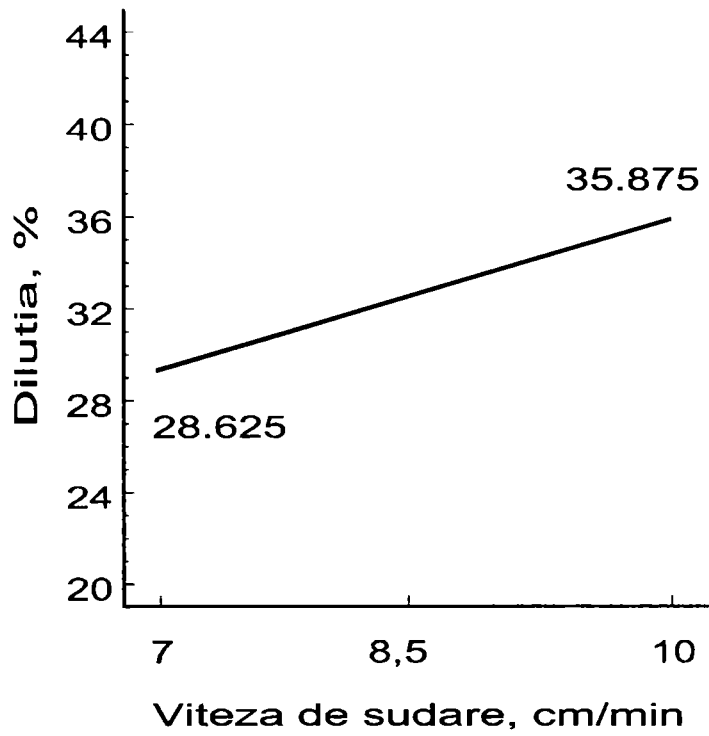


Figura 3.12.c. Efectul vitezei de sudare

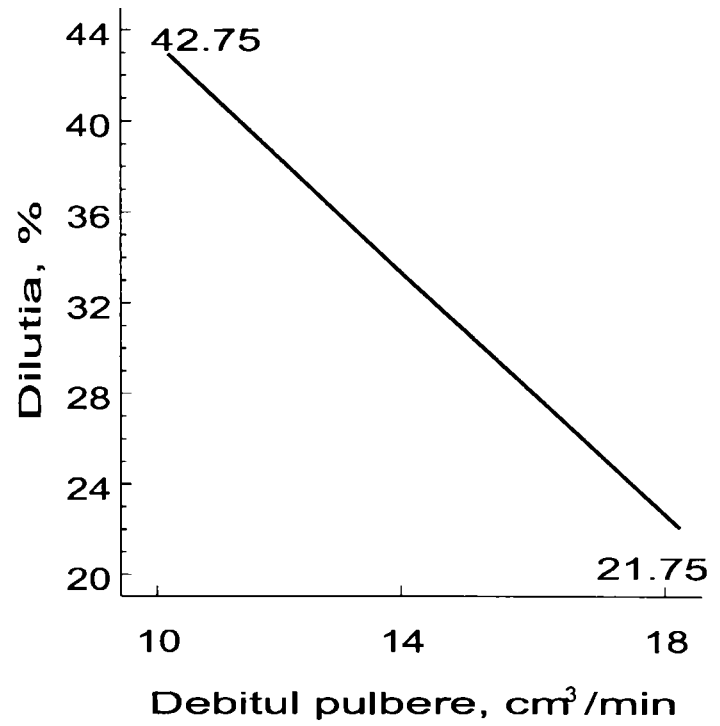


Figura 3.12.d. Efectul debitului de pulbere

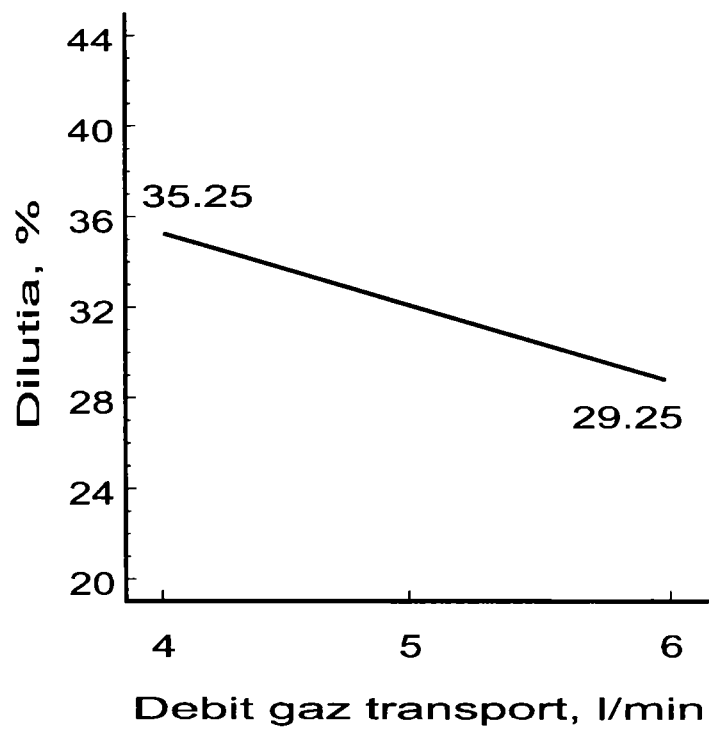


Figura 3.12.e. Efectul debitului gazului de transport

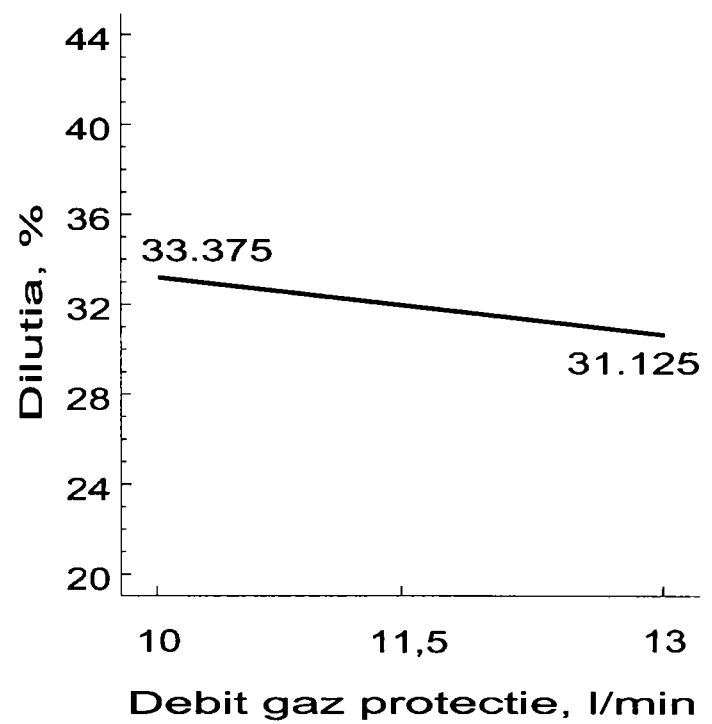


Figura 3.12.f. Efectul debitului gazului de protecție

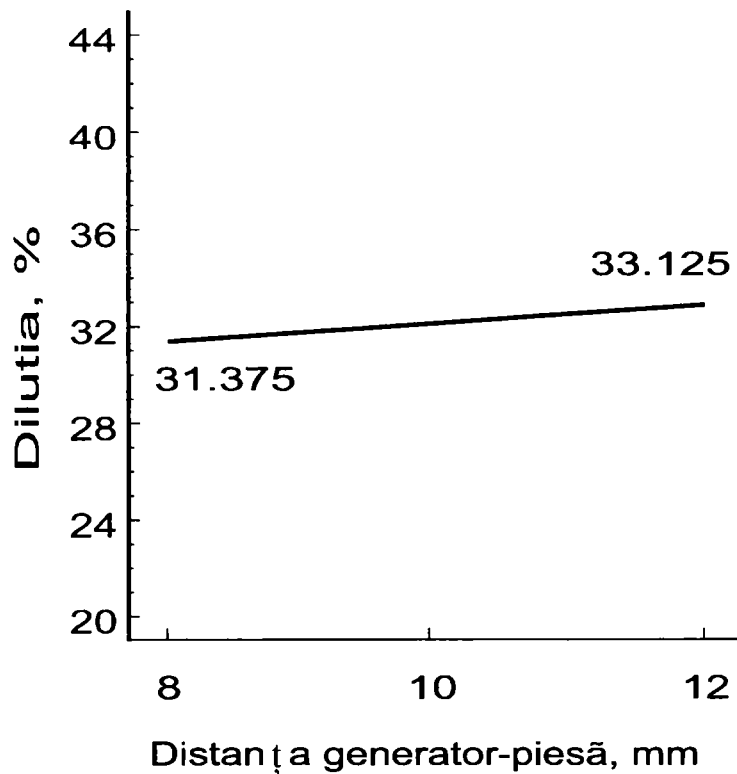


Figura 3.12.g. Efectul distanței generator - piesă

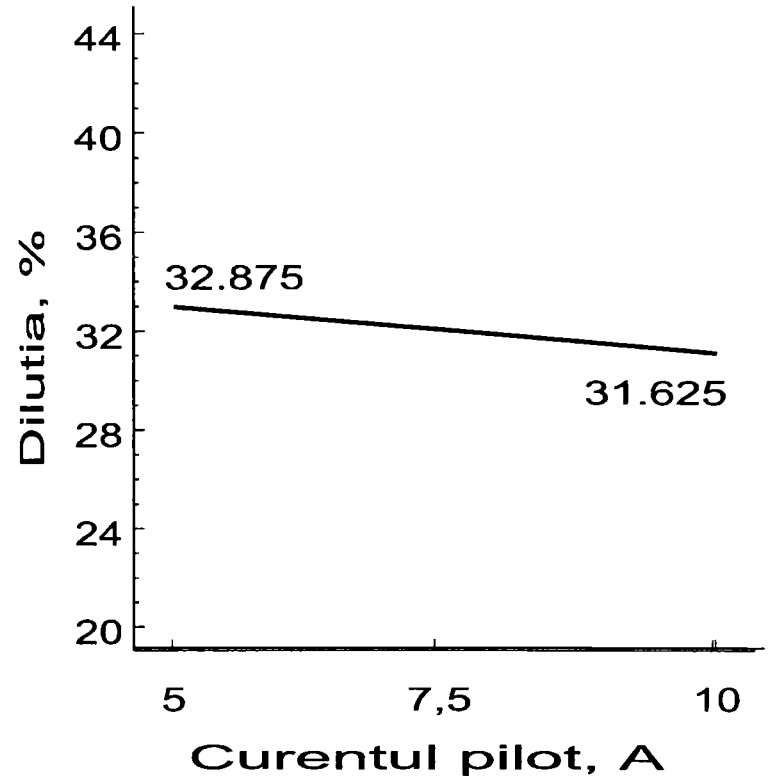


Figura 3.12.h. Efectul curentului pilot

Figura 3.12: Efectul principalilor parametri de regim asupra diluției depunerilor

Sunt de remarcat principalii factori de influență ai diluției depunerii - debitul de gaz plasmagen, curentul prin arcul transferat, debitul de pulbere și viteza de sudare, care sunt determinanți în exploatarea avantajelor procedurii PTA. Efectul acestor principali parametri este prezentat de valoarea coeficientului de regresie prezentat în tabelul 3.5, care este o măsură a efectului liniarizat al parametrului de regim examinat asupra funcției obiectiv – aici diluția.

3.4. Domenii clasice și noi de utilizare a procedurii PTA

Procedul PTA se individualizează printre celelalte prin diluția redusă a procedurii respectiv gradul ridicat de mecanizare al procedurii. Tabelul 3.7 indică comparativ, valorile diluției și ratei de depunere a diferite procedee de încărcare prin sudare, provenind din diferite surse.

Tabelul 3.7. Valori ale diluției pentru diferite procedee de sudare

| Procedeu de încărcare | Rata depunerii [kg/h] | Diluția [%] |
|-----------------------|--------------------------|----------------|
| SE | 20 ÷ 35 | 1 ÷ 6 |
| SF | 30 ÷ 40 | 2 ÷ 10 |
| ELECTROD-BANDĂ | 5 ÷ 20 | 4 ÷ 20 |

| Procedeu de încărcare | Rata depunerii [kg/h] | Diluția [%] |
|-----------------------|--------------------------|----------------|
| WIG | 2 ÷ 20 | 0,5 ÷ 3 |
| MIG | 10 ÷ 30 | 2 ÷ 6 |
| MAG | 20 ÷ 40 | 5 ÷ 25 |
| PLASMA-MIG | 5 ÷ 20 | 3 ÷ 20 |
| MPTA | 3 ÷ 10 | 0,5 ÷ 2 |
| PTA | 3 ÷ 10 | 2 ÷ 10 |
| HPTA | 3 ÷ 10 | 4 ÷ 18 |

Diluția procedurii PTA are valori reduse către medii (3÷18%) iar rata de depunere a procedurii, care variază în limite largi (0,5÷16 kg/h), înglobează trei variante de aplicare industrială a procedurii: MPTA (**M**icro-**P**TA), PTA, HPTA (**H**igh deposition **P**TA), a căror dezvoltare a fost stimulată de aplicații concrete: încărcarea antiuzură a scaunelor de supape și placarea interioară a tubulaturii de diametru redus (MPTA), încărcarea antiuzură și anticorrosiune a armăturilor industriale (PTA).

Valoarea ratei de depunere și a diluției procedurii îl face interesant pentru realizarea de straturi antiuzură pe suprafețe mici și medii. O variantă nouă, dezvoltată odată cu sursele de mare putere cu invertor este HPTA, care realizează rate ale depunerii de până la 18 kg/h destinate încărcării antiuzură a elementelor grele din alcătuirea utilajelor miniere și siderurgice.

Principalele aplicații industriale ale procedurii sunt din următoarele domenii:

- Construcțiilor de utilaj chimic (inele și plăci de etanșare, suprafețe de alunecare, ștuțuri de intrare-ieșire, cilindri de vaporizare);
- Industria sintezei și prelucrării maselor plastice (șnecuri de extrudare, pistoane de presare);
- Construcții de mașini (șnecuri, dinți de escavator, valțuri, mori cu ciocane, supape de Otto de toate gabaritele și diesel navale, jgheaburi de transport clincher, pereți de separare în industria cimentului).

Introducerea, promovarea și menținerea procedurii în aplicațiile industriale este legată de cerințele ridicate din fabricație privind calitatea stratului, care sunt dificil de realizat prin alte procedee clasice (WIG, oxi-gaz, MIG) sau productivitate ridicată asigurată în condițiile mecanizării / automatizării complete.

Avantajele procedurii PTA, comparativ cu alte procedee consacrate de încărcare sunt:

- Mecanizarea completă a procedurii;
- Obținerea unor straturi uniforme de 1 ÷ 5 mm grosime dintr-o trecere;
- Posibilitatea obținerii unor diluții reduse deci un număr redus de straturi până la obținerea proprietăților finale de exploatare ale stratului;
- Realizarea unor rate de depunere relativ ridicate;
- Capacitatea de utilizare a unor materiale ce nu pot fi trase sub formă de sârme; realizarea pulberilor este mai convenabilă economic decât obținerea vergelelor din aliaje dure prin extrudare;

- Reducerea necesarului de prelucrare prin realizarea unei geometrii apropiate de cea finală;
- Capacitatea realizării unei compoziții chimice și calități constante de strat pe întreaga lungime a depunerii.

Printre dezavantajele procedurii PTA se pot enumera următoarele ca fiind cele mai importante:

- Mecanizarea totală face ca procedeul să fie rentabil doar la serii mijlocii și mari de produse sau componente cu forme simple;
- Echipamentele au prețuri de cost mari în comparație cu echipamentele clasice de sudare cu arc (SE, MIG/MAG);
- Materialele clasice, care se pot trage și sub formă de sârme au, datorită procedurii de atomizare, un preț de cost ridicat, ceea ce face procedeul utilizabil în condiții de economicitate doar la depunerea materialelor speciale;

O aplicație de ultimă oră este sudarea prin procedeul PTA a materialelor valoroase, cum sunt aliajele din familiile INCONEL, INCOLLOY, HASTELLOY etc. Procedeul, dezvoltat de firma CLOOS (Germania) realizează productivități deosebit de ridicate în comparație cu procedeul clasic la sudarea acestor materiale (WIG) în condiții de calitate deosebite.

3.5. Discuții

Mecanismele decelate de influență a calității depunerilor au la bază fenomene metalurgice și sunt controlate de parametrii tehnologici. Principalul parametru calitativ al depunerii care determină calitatea depunerii din punctul de vedere al compoziției chimice și proprietăților de exploatare materialelor depuse este diluția realizată pe parcursul procesului de sudare. De aceea, factorii care controlează creșterea și scăderea diluției trebuie cunoscuți și controlați cu strictețe.

3.5.1. Creșterea diluției.

Factorii care cresc diluția procedurii sunt în ordine descrescătoare debitul de gaz plasmagen, viteza de sudare, curentul de sudare, distanța generator - piesă. Efectul lor poate fi explicat prin:

- **Debitul de gaz plasmagen:** Creșterea debitului de gaz plasmagen are ca efect creșterea temperaturii plasmei termice și a rigidității arcului transferat. Ca o consecință, se manifestă următoarele efecte:
 - arcul transferat pătrunde prin baia metalică până la nivelul substratului (materialului de bază);
 - transferul de căldură către pulberi este mai ridicat;
- **Viteza de sudare:** Creșterea vitezei de sudare se reflectă în contactul direct dintre arcul transferat și substrat. În consecință, efectul de topire al acestuia este accentuat datorită transferului de căldură direct, și nu numai prin conducție prin baia metalică;

- **Curentul de sudare:** Creșterea curentului de sudare mărește temperatura arcului de plasmă transferat. Ridicarea temperaturii arcului se reflectă în:
 - mărirea cantității de căldură transferată pulberilor deci încălzirea băii metalice;
 - creșterea debitului de gaz prin ajutoraj ce se reflectă în rigiditatea arcului transferat.
- **Distanța generator - piesă:** creșterea distanței generator piesă mărește timpul de staționare al pulberii în arcul transferat, ridicând aportul de căldură în baia metalică și în consecință, temperatura acesteia.

3.5.2. Scăderea diluției:

Parametrii ce duc la scăderea diluției sunt, în ordinea crescătoare a intensității efectului, intensitatea curentului arcului pilot, debitul gazului de protecție, debitul gazului de transport, debitul de pulbere. Efectul acestor parametri asupra diluției se explică prin:

- **Debitul gazului de protecție:** creșterea gazului de protecție se reflectă într-o spălare mai eficientă a băii metalice de către amestecul Ar + H₂, care manifestă un efect de răcire a acesteia;
- **Debitul gazului de transport:** Deoarece în soluția constructivă adoptată, gazul plasmagen trece parțial prin duza de plasmă, se presupune că efectul se manifestă în scăderea timpului de staționare al pulberilor în arcul de plasmă și scăderea cuplajului lor termic cu acesta. Ca consecință, încălzirea pulberilor de către arcul transferat va fi mai puțin intensă, iar baia metalică rezultată mai rece;
- **Debitul de pulbere** este parametru cu cea mai spectaculoasă influență asupra diluției. Diluția este controlată prin răcirea băii metalice atunci când în condiții de regim tehnologic date se recurge la creșterea debitului de gaz plasmagen.

3.6. Concluzii:

- a) Principalii factori de influență ai diluției la procedeul PTA sunt debitul de pulbere, debitul de gaz de transport, debitul de gaz plasmagen, curentul de sudare și viteza de sudare;
- b) Efectul debitului gazului de protecție, al intensității curentului arcului pilot și distanței generator - substrat este nesemnificativ;
- c) Parametrii cu efect pozitiv asupra diluției sunt debitul de pulbere și debitul de gaz de transport;
- d) Parametrii cu efect negativ asupra diluției sunt debitul de gaz plasmagen, curentul în arcul transferat și viteza de sudare;
- e) Pentru fiecare material dur destinat încărcării este necesară particularizarea experimentului, pentru evaluarea efectului diluției asupra durității depunerii.

CAPITOLUL 4. EXAMINAREA MICROSTRUCTURALĂ A DEPUNERILOR REALIZATE FOLOSIND AMESTECURI DE PULBERI

Cercetarea microstructurii depunerilor realizate folosind diverse amestecuri de pulberi, toate având adaosuri de carbură de wolfram, s-a făcut prin microscopie optică urmărindu-se aspectele morfologice ale fazelor și constituenților determinate de regimul de sudare, fenomenele de segregare și eventualele defecte prezente în depuneri, vizibile atât la scară macro, cât și microscopică.

Analiza microstructurală a vizat fazele formate ca efect al ciclului termic la sudare în urma depunerii unor amestecuri având ca elemente formatoare de matrice pulberile P 40 (tabelul 3.1), W 1.4115 (tabelul 4.1) și 316 Lc (tabelul 4.2), în adaos cu pulberi grobe de carbură de wolfram WSC (tabelul 3.2), respectiv amestecuri echivalente volumic de carbură de wolfram și de titan TiC.

Examinarea prin microscopie optică a fost efectuată utilizând fie tehnica contrastului interferențial în lumină polarizată pe straturi de ZnSe depuse în vid înaintat pe suprafețele de examinat, fie metode clasice, cu reactivi uzuali (MURAKAMI, FeCl₃).

4.1. Depuneri realizate cu aliaj formator de matrice P 40

Aliajul P 40 corespunzător compoziției sale chimice - tabelul 3.1 – are o structură formată din carburi primare într-o masă ledeburitică, alcătuită din austenită și carburi ale elementelor de aliere de tip (FeCr)_xC_y. Anexa 1 prezintă caracteristici fizice și de exploatare ale pulberii P 40.

Ca urmare a acestui fapt, este de așteptat ca adaosul de carburi - tabelul 3.2. - să accentueze fenomenele de precipitare a fazelor dure și să ducă la creșterea durității matricei metalice. Proprietățile fizice și de exploatare ale pulberii de carbură de wolfram utilizată în programul experimental derulat sunt prezentate în anexa 1.

Figura 4.1 prezintă aspectul microscopic al unei depuneri realizate cu aliajul P 40 (regimuri conf. Anexei 2), în condiții uzuale de sudare. Structura microscopică este tipică de turnare cu dendritele primare de faze dure înglobate într-o matrice de eutectic fin.

Acest aspect microstructural corespunde celui care a fost de așteptat pe baza compoziției chimice a aliajului, respectiv a proporției ridicate de carbon.

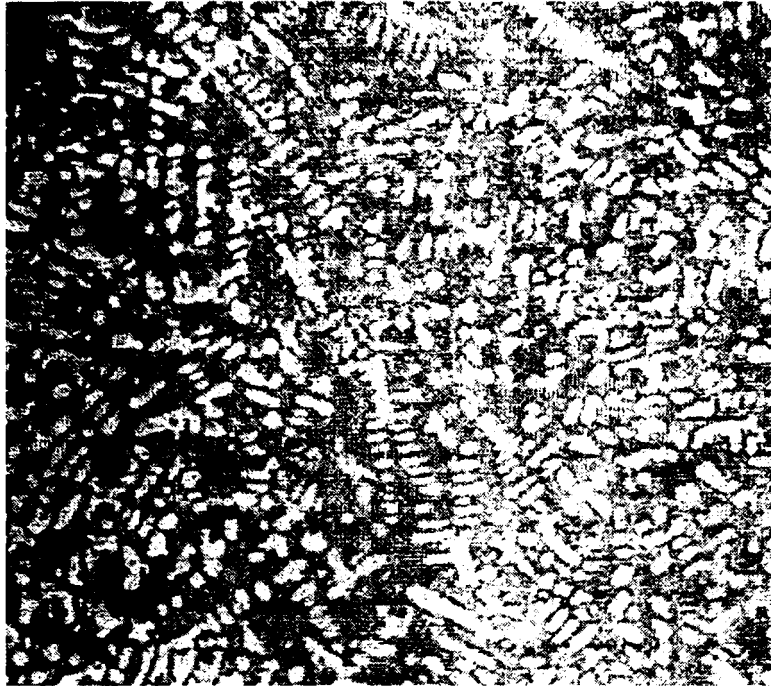


Figura 4.1. Aliajul P 40. Microstructură, x200, FeCl₃

Mecanismul de precipitare a fazelor dure este influențat de viteza de încălzire folosită la sudare, de temperatura de vârf atinsă și de viteza de răcire, respectiv valoarea gradului de subrăcire.

Deoarece adaosul de faze dure induce modificări microstructurale radicale, s-a procedat la examinarea în detaliu a aspectelor microstructurale induse de fazele dure topite pe parcursul procesului de sudare.

4.1.1. Amestecul P 40 + 25% WSC

Volumul redus al carburilor în adaosul de pulberi și în consecință în masa metalică este la prima vedere deosebit de favorabil din punct de vedere tehnologic: nu apar probleme de antrenare al amestecului de pulberi (datorat formei carburilor rezultate din procesul de elaborare - sfărâmare mecanică), respectiv nu există un risc evident de fragilizare excesivă a matricei prin îmbogățirea în carburi.

Cu toate acestea, dată fiind proporția redusă de carburi în volumul aliajului formator de matrice, realizarea unor depuneri cu proporții reduse de faze dure creează dificultăți în obținerea depunerilor omogene din punctul de vedere al distribuției fazelor dure pe grosimea secțiunii depunerilor.

De aceea, pe parcursul programului experimental a fost necesară reducerea ușoară a valorii aportului termic al arcului transferat pentru reducerea la minim a fenomenelor de segregare.

Figurile 4.2.a și 4.2.b ilustrează fenomenul de segregare menționat. Parametrii de regim utilizați sunt cei prezentați în anexa 2.

Așa cum se poate remarca din figura 4.2.a., tendința de segregare (sedimentare) este evidentă cu toate că s-au luat măsuri deosebite de optimizare a parametrilor tehnologici. Segregarea poate fi evitată prin optimizarea parametrilor regimului de sudare.

Întrucât densitatea de faze dure nu este suficientă “autosușinerii mecanice” a acestora, din punct de vedere tehnologic, este necesară scurtarea la minim a duratei de viață a băii metalice, care să nu permită pierderea “omogenității” topiturii realizate în arcul transferat.

Se evită astfel riscul de întrerupere a continuității matricei metalice prin contactul fazelor dure precipitate sau crescute epitaxial pe limitele fazelor dure netopite. Orice lipsă de continuitate a matricei metalice este un concentrator de tensiune puternic, cu efecte negative asupra rezistenței la sollicitările din exploatare, dintre care una din cele dominante este oboseala de contact.

Cu toate că reducerea aportului energetic al arcului transferat îmbunătățește distribuția carburilor pe secțiune, nu s-a reușit realizarea unor distribuții omogene în orice secțiune a acesteia.

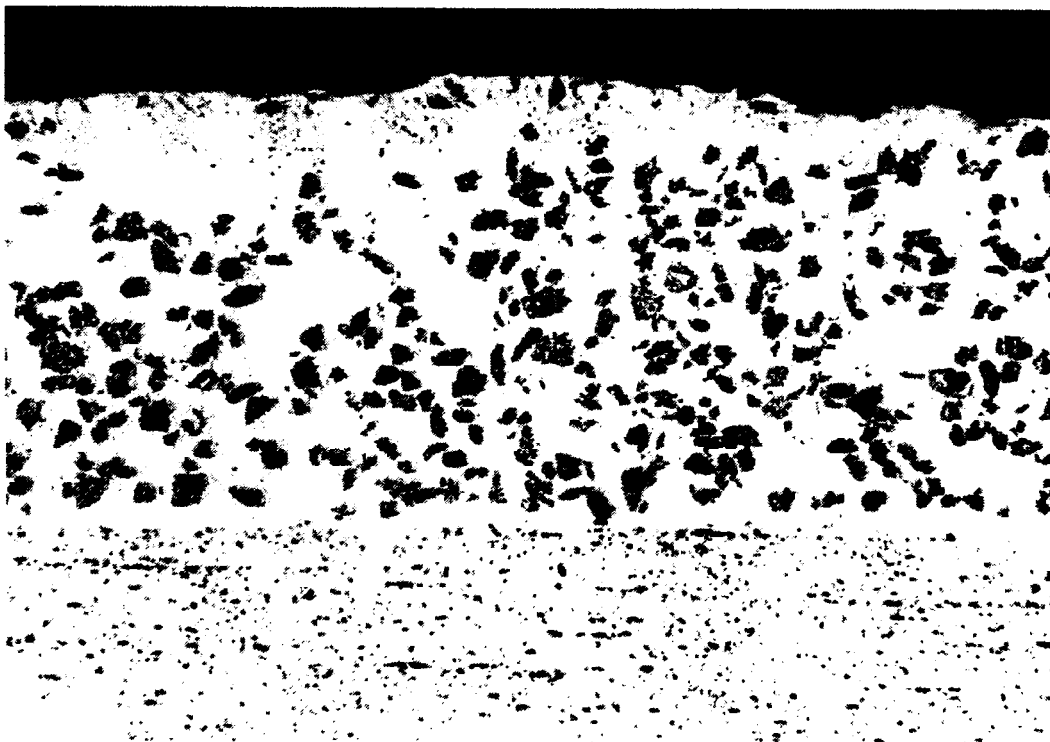


Figura 4.2.a. x25, Murakami

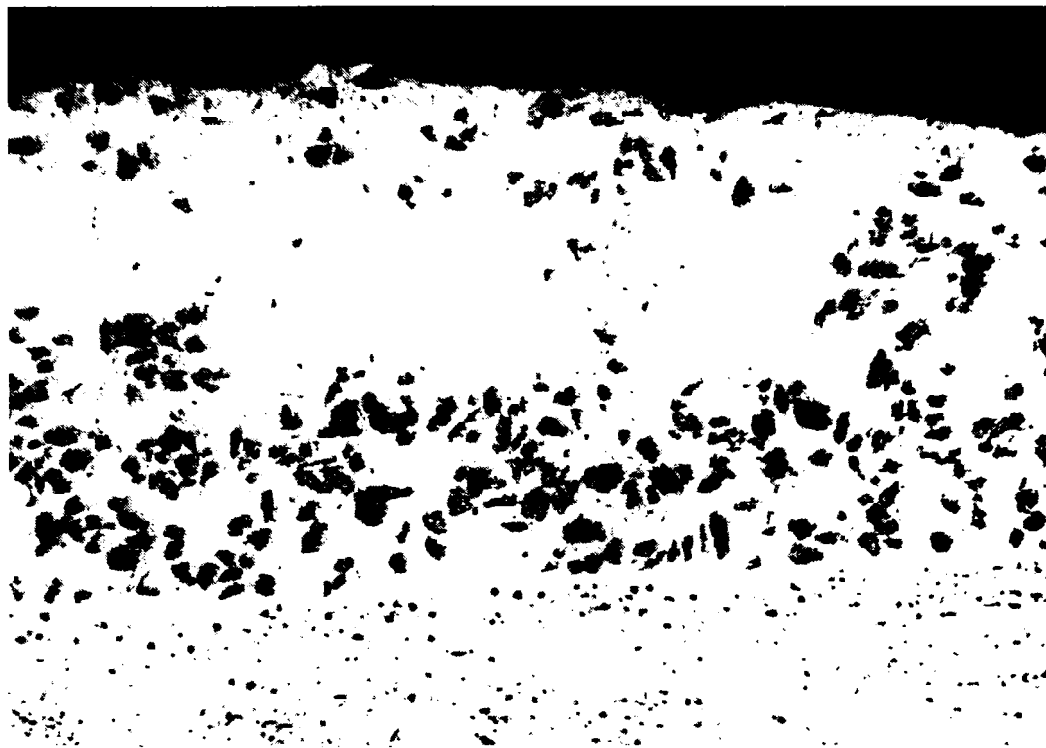


Figura 4.2.b. x25, Murakami.

Examinarea microstructurală efectuată pe probe sudate cu amestecul P 40 + 25% WSC utilizând tehnica microscopiei optice cu contrastare prin interferență la valori mai mari ale măririi a relevat schimbări semnificative ale aspectului matricei metalice determinate de adaosul și topirea parțială a carburilor în depunere.

Precipitățile primare de carburi își păstrează aspectul dendritic, așa cum a fost relevat la examinarea depunerilor realizate cu pulberea P 40, însă își extind proporția pornind fie prin creștere epitaxială de pe limitele fazelor dure netopite, fie prin precipitare din volumul băii de metal topit.

Cu toate că compoziția matricei metalice a depunerii este cel puțin aparent omogenă din punct de vedere chimic, se remarcă diferențe din punct de vedere microstructural al precipităților primare și epitaxiale (pe limitele carburilor netopite) de faze dure.

După cum se remarcă din figura 4.3.a și 4.3.b., gradul de finisare al carburilor precipitate primar (dendrite) este mai avansat în zonele adiacente substratului, unde viteza de răcire a topiturii este mai ridicată, decât în zona adiacentă suprafeței depunerii, unde durata de viață a topiturii este mai ridicată sau solidificarea are loc pe un strat depus la pendularea anterioară încă cald, iar viteza de răcire mai redusă atât în fază lichidă cât și solidă.

Ca rezultat, densitatea fazelor dure precipitate este mai ridicată în apropierea substratului decât în straturile superioare ale depunerii.

Totuși, nu se remarcă o orientare preferențială a dendritelor în volumul depunerii. Unul din motivele care fac ca orientarea acestora să fie variată este numărul relativ ridicat de centre de cristalizare distribuiți relativ uniform în volumul topiturii, dar și deplasarea continuă a băii metalice care are ca efect agitarea ei continuă și schimbarea permanentă a direcției și sensului gradientului de temperatură.

În timp ce în zona superioară a depunerilor în matricea metalică se remarcă câmpuri de culoare închisă cu structură fină (eutectic) cu o extindere relativ mare, porțiunile de eutectic în zonele inferioare ale depunerii sunt mult mai reduse, ca urmare a timpului

mai scurt de solidificare – figura 4.4.a și 4.4.b. Se remarcă o extindere mai ridicată a zonelor de culoare deschisă, probabil un constituent de tipul austenitei aliate.

Se remarcă de asemenea prezența stratului epitaxial (probabil carburi) dezvoltat pe fazele dure netopite care se presupun a fi din familia $(\text{FeCrW})_x\text{C}_y$. Se remarcă extinderea zonei de faze crescute pe limitele fazelor dure netopite, care este mai mare în porțiunea superioară a depunerii comparativ cu regiunea inferioară, ca rezultat al duratei mai mari de viață a topiturii în zona superioară și timpului de creștere disponibil semnificativ mai ridicat.



Figura 4.3.a. x200, ZnSe, porțiunea superioară a depunerii.



Figura 4.3.b. x200, ZnSe, porțiunea inferioară a depunerii

Cu toate că durata de viață a băii în porțiunea superioară a depunerii este mai ridicată

decât în zonele inferioare, nu se remarcă schimbări în aspectul (forma geometrică) fazelor dure. Se poate concluziona că topirea particulelor de carburi are loc numai în arcul transferat, în timp ce fenomenele de trecere în soluție a fazelor dure în baia metalică sunt ne semnificative ca pondere.



Figura 4.4.a. x500, ZnSe.

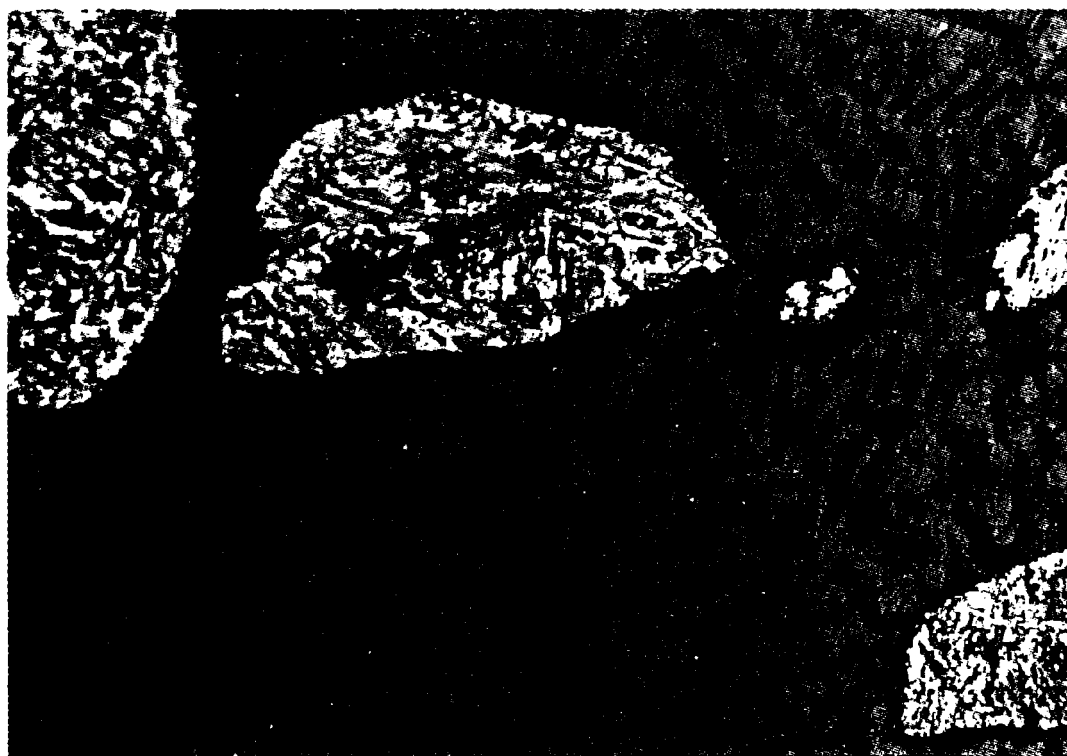


Figura 4.4.b. x500, ZnSe.

Deoarece comportarea la sudare a amestecului P 40 + 25% WSC este corespunzătoare (nu apar fisuri, pori, probleme de antrenare și curgere a pulberilor, dificultăți de umectare a substratului), pe baza încercărilor de sudare se concluzionează că pulberea P 40 are resurse pentru preluarea unor adaosuri de peste 25% carbură de wolfram.

4.1.2. Amestecul P 40 + 40% WSC

Asemănător probelor realizate cu amestecuri P 40 + 25% WSC, depunerile realizate cu o proporție de 40% (procente masice) carbură de wolfram au o comportare excelentă la sudare, fără probleme în ceea ce privește tendința la fisurare, formarea porilor, antrenarea și curgerea pulberilor sau umectarea substratului. Pierderile de pulberi sunt reduse, formarea băii este stabilă iar formarea stratului este uniformă, obținându-se o depunere cu o suprafață excelentă.

Spre deosebire însă de depunerile de realizate cu amestecuri P 40 + 25% WSC, la depunerile realizate cu amestecurile P 40 + 40% WSC aspectul suprafeței depunerilor este dependent de sistemul de introducere al pulberilor.

În timp ce depunerile realizate cu generatoare cu introducere internă a pulberii au o suprafață compactă, lucioasă, caracteristică depunerilor cu pulberi metalice fără adaosuri de faze dure, depunerile realizate cu generatoare cu introducere externă au o suprafață pronunțat rugoasă, cu aderențe evidente de faze dure netopite, probabil determinate de “suflarea” fazelor dure din jetul de pulberi ca urmare a comportamentului lor aerodinamic nefavorabil.

Asemănător depunerilor realizate cu adaosuri de 25% masice WSC, tendința de segregare a fazelor dure este prezentă și se manifestă sub două forme distincte – figura 4.4.a și 4.4.b.:

- Segregarea la baza băii metalice pe interfața cu substratul – rezultat al unei băi de dimensiuni mari, cu durată de viață excesivă;
- Segregarea pe planuri paralele cu frontul de cristalizare la baza băii metalice – băi de sudare de dimensiuni medii, figura 4.4.a.



Figura 4.4.a. x25, Murakami

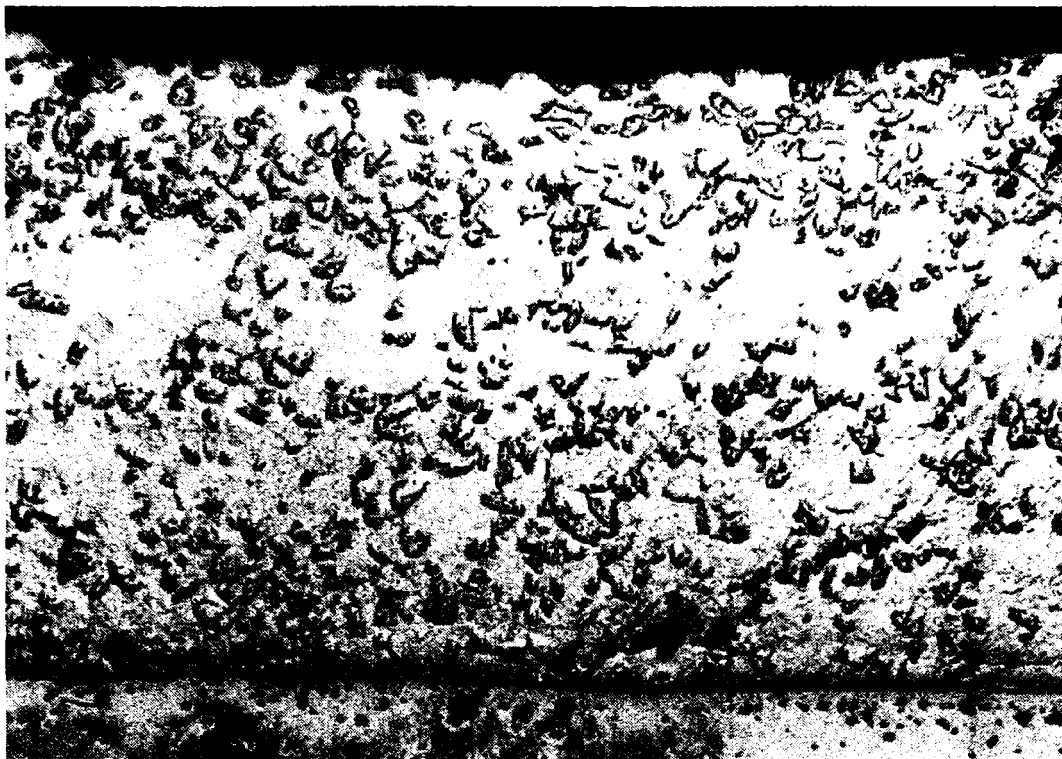


Figura 4.4.b. x25, Murakami.

În timp ce depunerile de tipul celor prezentate în figura 4.4.a duc la formarea unor straturi cu gradient al rezistenței la uzare și risc ridicat de fisurare într-un plan paralel cu interfața strat – substrat prin solicitări de oboseală de contact, depunerile de tipul celor din figura 4.4.b au o rezistență la uzare relativ constantă pe grosimea secțiunii, iar riscul de degradare al stratului prin fisurare și exfoliere locală este diminuat de continuitatea matricei metalice în spațiile interparticulare.

Realizarea depunerilor omogene în sensul clasic al materialelor compozite elaborate prin metode clasice rămâne însă dificilă la această proporție de faze dure.

În ceea ce privește aspectul microscopic al depunerilor, se pot remarca următoarele elemente (figura 4.5.a, b și c, figura 4.6.a și b):

Asemănător depunerilor realizate cu amestecuri conținând 25% WSC, gradul de dispersie al carburilor precipitate primar este mai avansat în zonele adiacente substratului în comparație cu zona superioară sau mediană a depunerii, iar extinderea zonelor de creștere epitaxială a fazelor dure complexe pe limita carburilor netopite este mai mare decât la depunerile cu 25% WSC. Motivul este proporția mai ridicată de carbon din topitură, provenind din fazele dure amestecate primar și topite în arcul transferat, care cresc pe germenii de cristalizare reprezentați de fazele dure netopite.

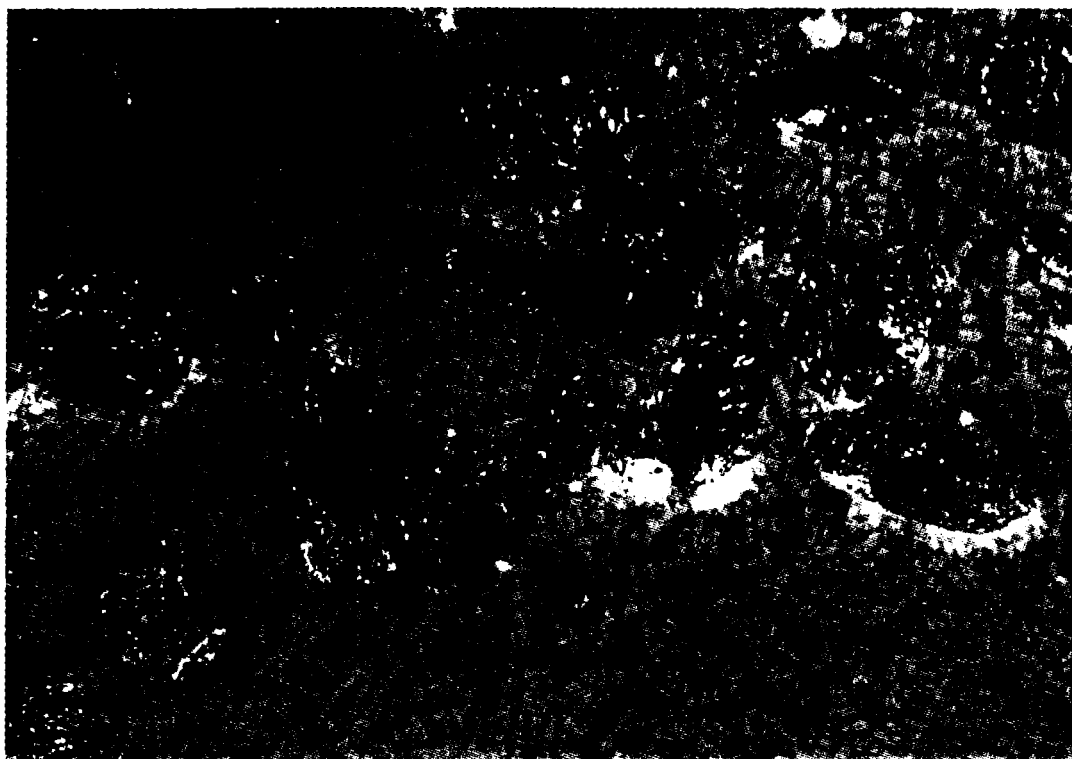


Figura 4.5.a. x200, ZnSe, porțiune superioară



Figura 4.5.b. x200, ZnSe, porțiune mediană

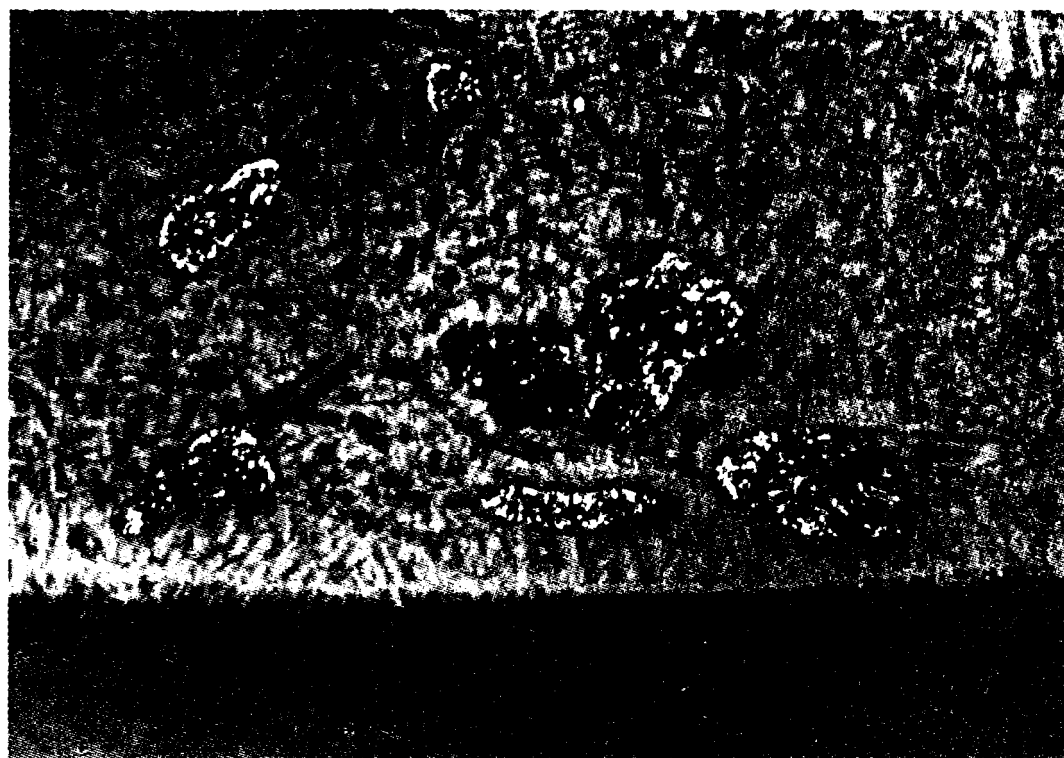


Figura 4.5.c. x200, ZnSe, porțiune inferioară

Fenomenul finisării fazelor dure precipitate este vizibil la analiza comparativă a imaginilor corespunzând porțiunii superioare și mediane a depunerii.

Densitatea de faze dure precipitate în porțiunea inferioară a depunerii este însă mai redusă decât în porțiunile mediană și superioară. Cauza acestui fenomen poate fi viteza ridicată de solidificare, care nu permite precipitarea fazelor dure din în topitură. De asemenea, porțiunea superioară a secțiunii prezintă faze dure de dimensiuni mai ridicate dar mai puțin disperse, având ca motivație probabilă fenomene identice celor care au loc la depunerea amestecurilor cu adaosuri de 25% WSC.

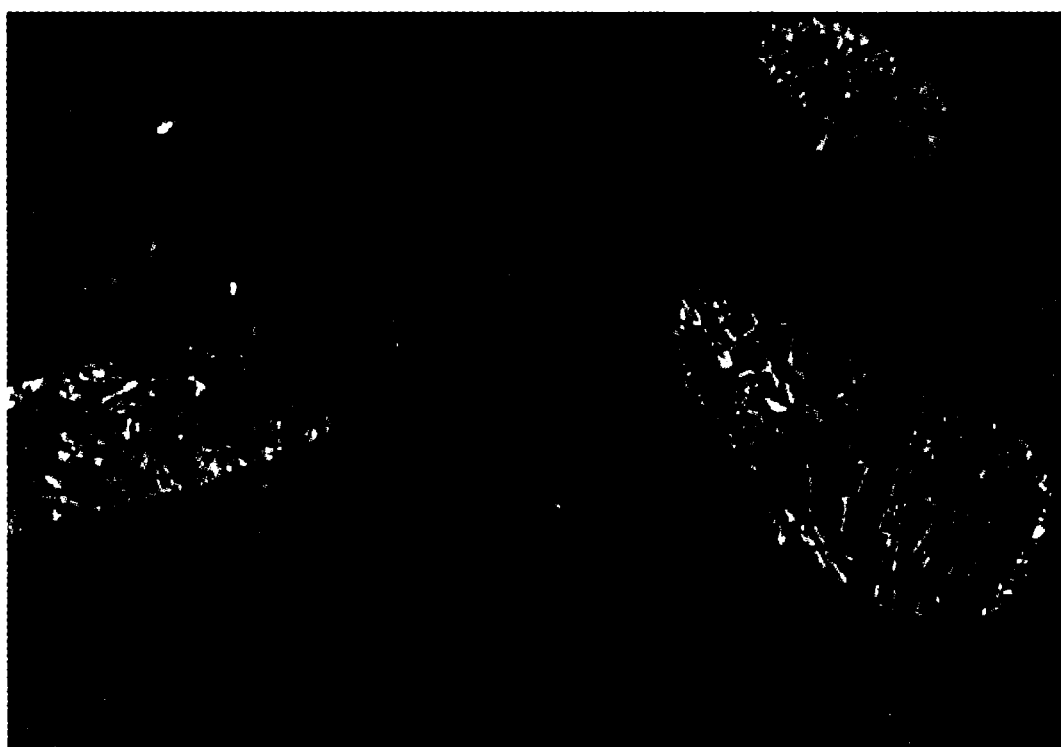


Figura 4.6.a. x500, ZnSe.



Figura 4.6.b. x500, ZnSe.

În comparație cu depunerile realizate cu amestecul P 40 + 25% WSC, pentru o aceeași regiune a depunerii, gradul de dispersie al fazelor dure este mai ridicat. Pentru amestecul cu 40% WSC motivația este de natură strict metalurgică și se presupune a fi determinată de creșterea numărului centrelor de cristalizare existenți în volumul depunerii.

Proporția zonală relativ ridicată a fazelor dure face ca în zonele de aglomerare a acestora să înceapă formarea de punți de legătură între carburile netopite – figura 4.7.



Figura 4.7. x1000, ZnSe

Punțile de legătură dintre fazele dure relevate de figura 4.7 sunt porțiuni cu caracteristici mecanice apropiate de ale fazelor dure, respectiv fragilitate ridicată (potențiale amorse de fisură) și reduc tenacitatea și rezistența la oboseală a stratului, regăsindu-se în scăderea caracteristicilor de exploatare ale straturilor dure realizate. Aceste regiuni s-au dovedit pe parcursul programului experimental derulat a fi principalele amorse de dezagregare a straturilor depuse.

Examinarea prin microscopie optică la mărire ridicată relevă elementele constitutive ale matricei metalice a depunerii:

- Faze dure, cu precipitare primară (culoare roșie);
- Soluție solidă γ aliată (culoare maro deschis);
- Eutectic cu dispersie fină.

În ceea ce privește aspectul macroscopic al depunerilor realizate, s-au pus în evidență următoarele concluzii de ordin structural și tehnologic:

- Este posibilă realizarea unor depuneri cvasi-omogene în ceea ce privește distribuția fazelor dure pe grosimea depunerii;
- Gradul de finisare al fazelor dure precipitate din soluție crește pentru depunerile cu 40% WSC
- Extinderea zonei de creștere epitaxială a carburilor din soluție este mai mare la aliajele cu 40% WSC în comparație cu depunerile realizate cu 25% WSC
- În depunere încep să apară, în zonele cu aglomerații de carburi, puncte de contact între carburile netopite adiacente, care întrerup continuitatea matricei metalice și se regăsesc în scăderea proprietăților de exploatare ale depunerilor.

Toate acestea indică faptul că din punct de vedere metalurgic și tehnologic aliajul P 40 are capacitatea de a prelua în amestec cantități de peste 40% faze dure de tipul carburilor de wolfram topite și sfărâmate. De aceea, s-a procedat la examinarea comportării la adaosuri în proporții mărite de faze dure la 55%, respectiv 65%.

4.1.3. Amestecul P 40 + 55% WSC

Depunerile realizate cu o proporție de 55% (procente masice) carbură de wolfram au o comportare puțin mai dificilă la sudare în comparație cu amestecurile testate anterior. Încep să se manifeste primele semne ale fenomenelor de fisurare la sudare și formare a porilor, care se manifestă la puteri ridicate ale arcului electric, comparabile cu cele realizate la sudarea amestecurilor P 40 + 25% WSC. Formarea băii este încă stabilă iar formarea stratului este relativ uniformă, dar cu o supraînălțare mai redusă, determinată de modul de reglaj al debitului de pulbere și derulare a experimentului (debit de pulbere constant).

Asemănător depunerilor realizate cu 40% WSC, tendința de segregare a fazelor dure este prezentă și se manifestă sub două forme distincte – figura 4.8.a și 4.8.b.:

- Segregarea la baza băii metalice – rezultat al unei băi de dimensiuni mai mari, cu durată de viață excesivă;

- Segregarea pe plane paralele cu frontul de cristalizare – băi de sudare mari.

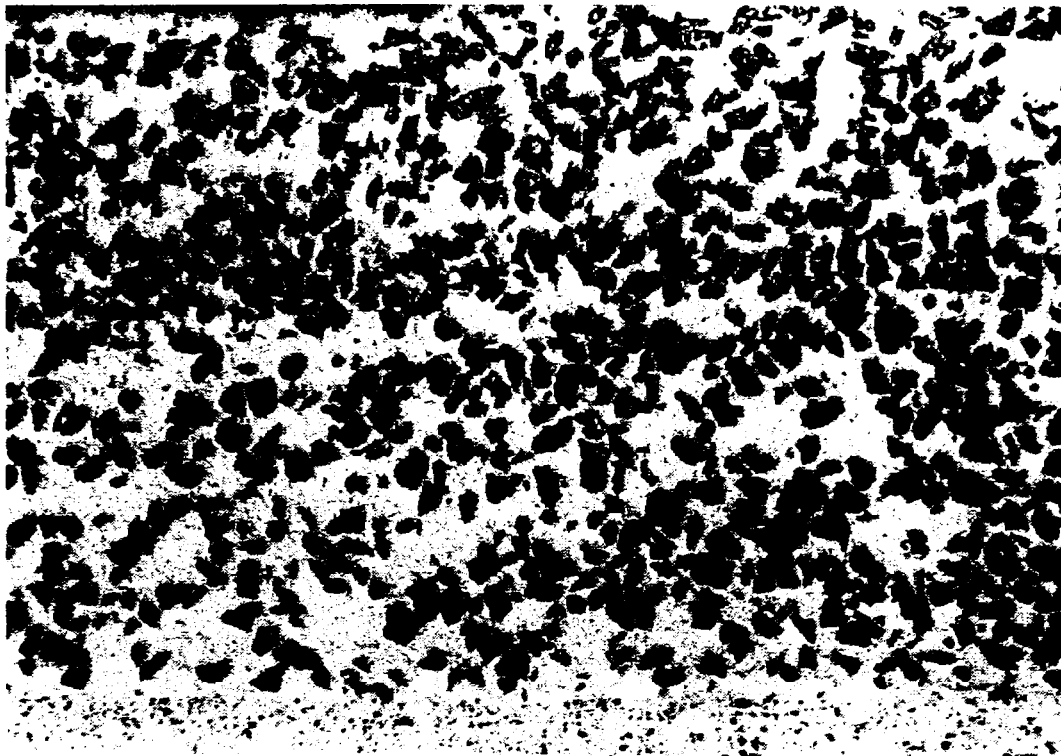


Figura 4.8.a. x25, Murakami



Figura 4.8.b. x25, Murakami.

În timp ce cazul “a” duce la formarea - ca și la depunerile prezentate anterior - a unor depuneri cu gradient al rezistenței la uzare și risc ridicat de fisurare într-un plan paralel cu interfața strat – substrat, varianta “b” are o rezistență la uzare relativ uniformă pe grosimea secțiunii, dar riscul de degradare al stratului prin fisurare și exfoliere locală este accentuat.

Deoarece densitatea fazelor dure este deja ridicată, începe manifestarea unui fenomen

de autosusținere a fazelor care fac ca în condițiile optimizării parametrilor de regim să se obțină depuneri omogene - figura 4.8.a.

În ceea ce privește aspectul microscopic al depunerilor, se pot remarca următoarele (figura 4.9.a - c, figura 4.10. a și b):

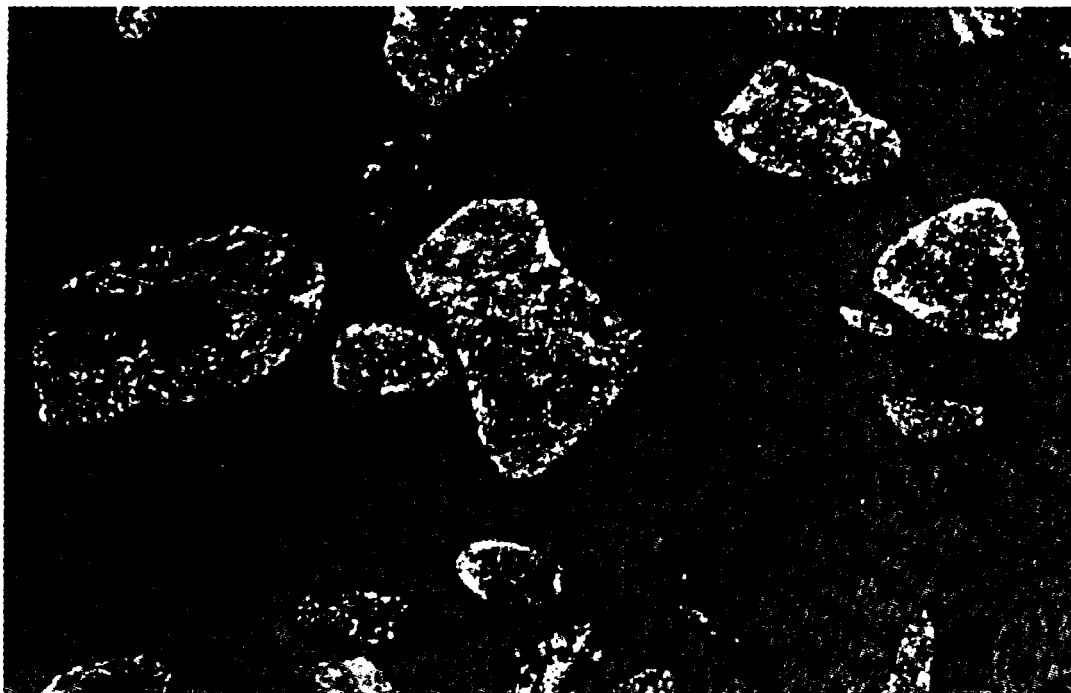


Figura 4.9.a. x200, ZnSe.

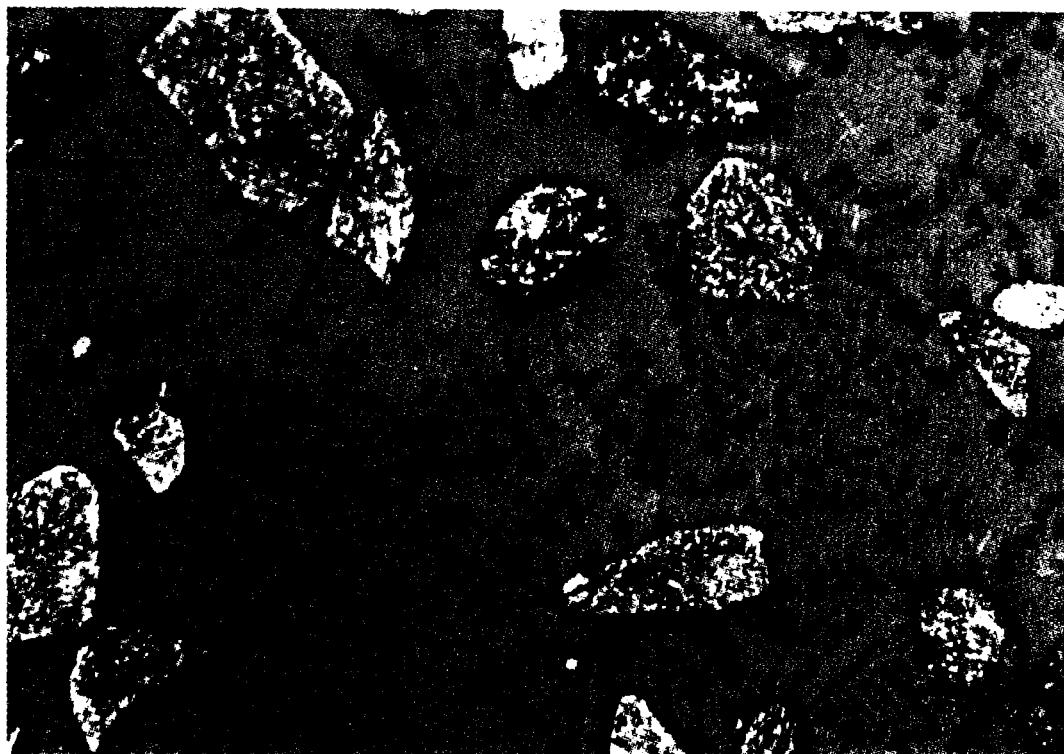


Figura 4.9.b. x200, ZnSe.

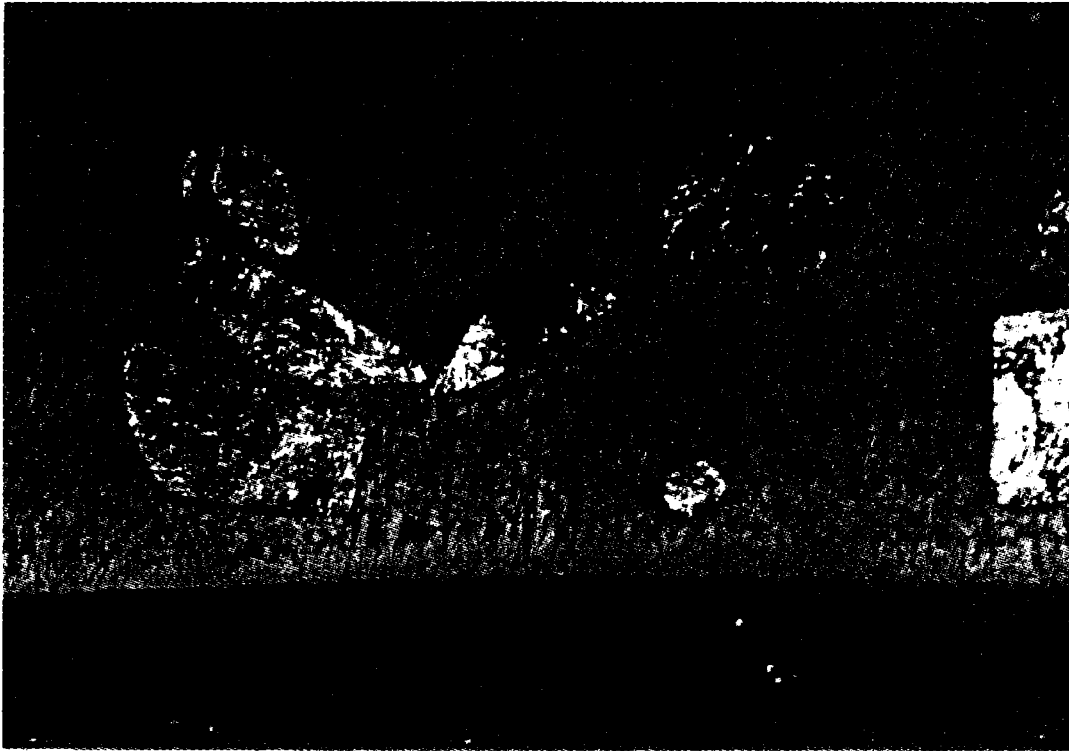


Figura 4.9.c. x200, ZnSe.

Asemănător depunerilor realizate cu amestecuri conținând 40% WSC, gradul de dispersie al carburilor precipitate primar este mai avansat în zonele adiacente substratului și scade odată cu avansarea pe grosimea depunerii. Extinderea zonelor de creștere a fazelor dure complexe pe limita carburilor netopite este mai redusă decât la depunerile cu 40% WSC, fiind comparabilă cu cea realizată la depunerile cu 25% WSC. Motivul este proporția mai redusă de carbon din topitură provenind din fazele dure amestecate primar topite în arcul transferat, care este determinată de necesitatea reducerii energiei arcului electric pentru a evita problemele de sudabilitate menționate anterior: tendință spre fisurare, formare dificilă a stratului.



Figura 4.10.a. x500, ZnSe.



Figura 4.10.b. x500, ZnSe.

În comparație cu depunerile realizate cu amestecul P 40 + 25% WSC și respectiv 40% WSC, pentru o aceeași regiune a depunerii, gradul de dispersie al fazelor dure precipitate este mai ridicat. Pentru amestecul cu 55% WSC motivația este de natură strict metalurgică și se presupune a fi determinată de creșterea numărului centrelor de cristalizare existente în volumul depunerii.

În zonele de aglomerare a fazelor dure încep să se formeze cu o frecvență crescândă punți de legătură între carburile netopite.

Grosimea stratului de faze dure crescute epitaxial pe limitele carburilor netopite este

semnificativ mai mare decât la depunerile realizate cu adaosuri de 25 sau 40% WSC. Se poate concluziona că, dat fiind faptul că depunerile nu fisurează la adaosuri de 55% WSC, aliajul P 40 are capacitatea de a prelua porții mărite de carburi.

4.1.4. Amestecul P 40 + 65% WSC

Cu toate că la depunerea amestecurilor de pulberi precedente nu s-au remarcat probleme de antrenare a pulberilor, la sudarea amestecurilor cu 65% proporții masice de carburi începe manifestarea efectului carburilor de wolfram asupra curgerii amestecului de pulberi, care se comportă asemănător unei pulberi fără conținut de particule sferice. Curgerea este dificilă, iar antrenarea pulberilor pe tubulatura de aducțiune la generatorul de încărcare este intermitentă. Ca efect, depunerile vor avea fie un aspect deosebit de rugos al suprafeței - figura 4.12.a, fie vor conține pori induși de zborul fazelor dure care perturbă perdeaua protectoare de gaz sau duc la fenomene necontrolabile de fierbere a băii metalice - figura 4.12.b.

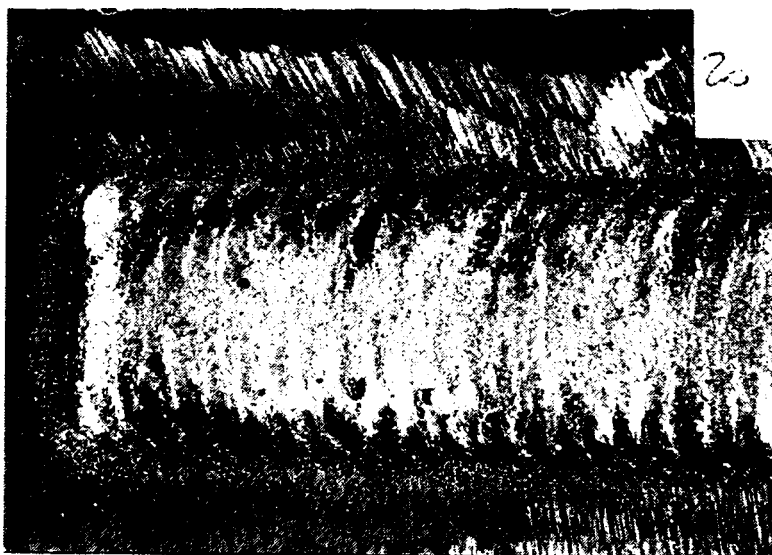


Figura 4.12.a - Depuneri cu suprafața rugoasă

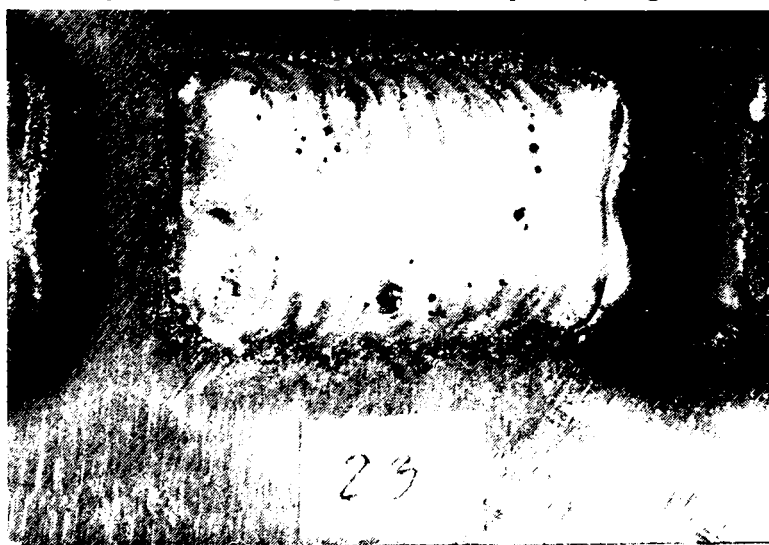


Figura 4.12.b – Depuneri cu pori deschiși

Toate acestea au făcut ca depunerile realizate cu un adaos de 65% WSC să se efectueze în condiții deosebit de îngrijite în ceea ce privește regimurile tehnologice utilizate.

Proporția ridicată de carburi și curgerea dificilă a amestecului de pulberi fac ca în volumul amestecului mecanic să existe aglomerări de carburi. De aceea, depunerile prezintă aglomerări locale de particule dure chiar și în condițiile evitării fenomenelor de segregare.

Proporția ridicată de carbură accentuează tendința de segregare a fazelor dure și de fisurare a depunerilor. De aceea, s-a recurs la scăderea suplimentară a puterii arcului transferat. Ca rezultat, pierderile de pulbere cresc semnificativ și se regăsesc în aspectul rugos al depunerii - figura 4.12.a. Pierderile ridicate de pulberi datorate puterii reduse a arcului transferat coroborate cu densitatea aparentă mult mărită a amestecului de pulberi fac ca supraînălțarea depunerilor realizate să scadă sensibil comparativ cu depunerile realizate folosind amestecuri cu 25, 40 și 55% WSC.

Figura 4.13 a și b. prezintă aspecte macrostructurale ale depunerilor realizate cu adaosuri de 65% (masice) carbură de wolfram.

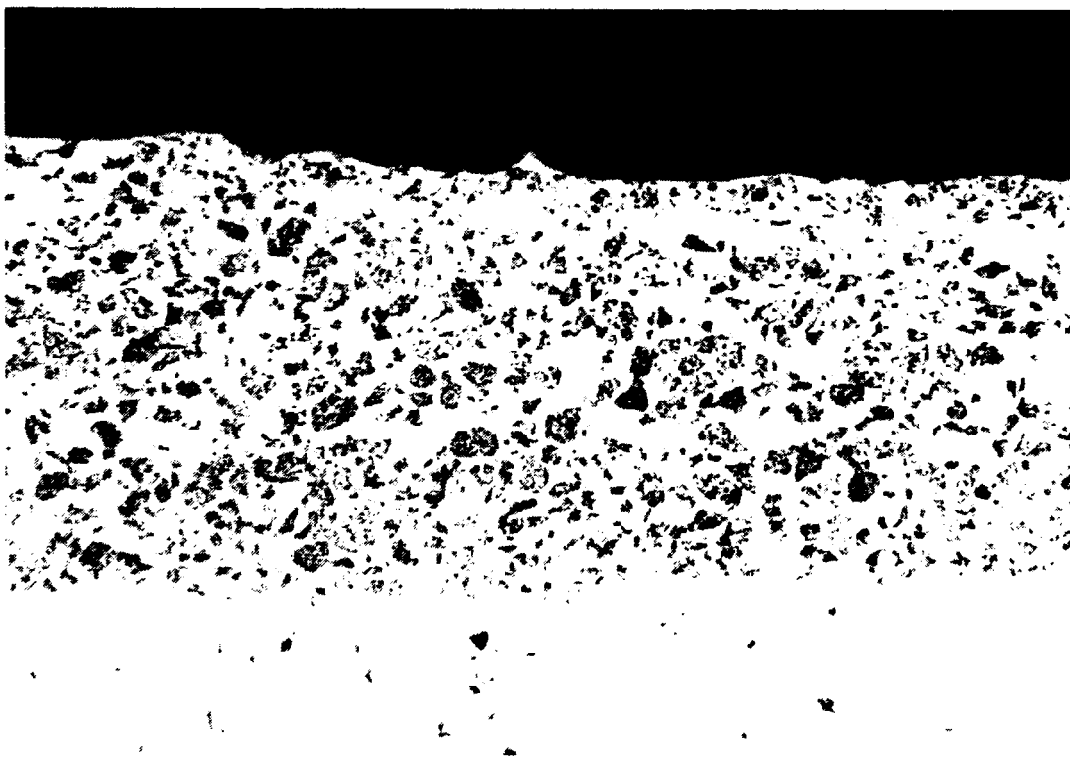


Figura 4.13.a. x25, Murakami

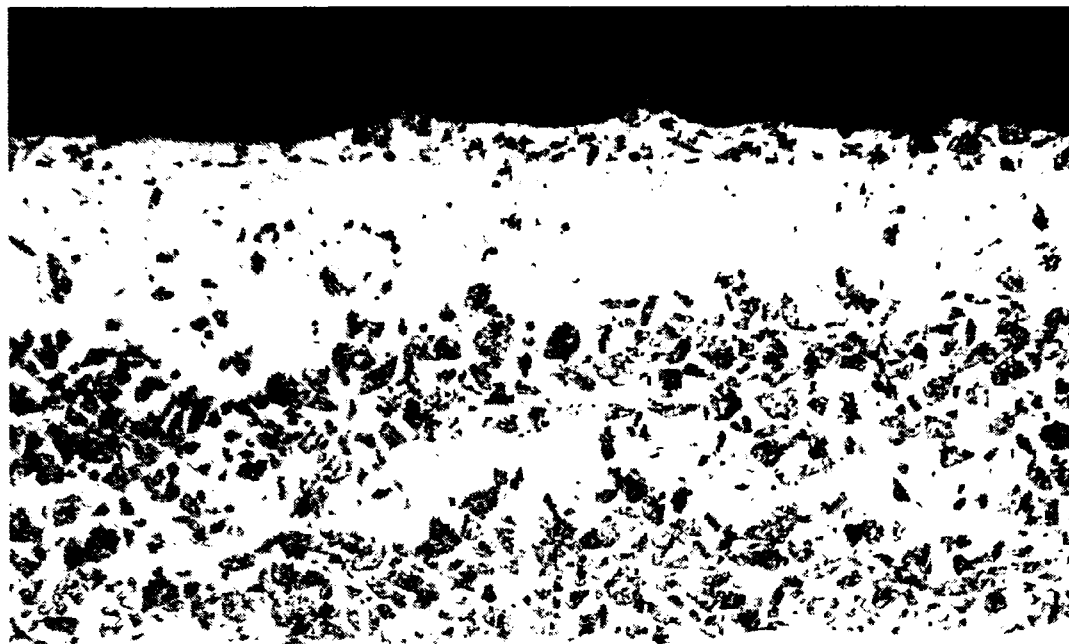


Figura 4.13.b. x25, Murakami.

Chiar și la depunerile aparent omogene realizate cu amestecurile conținând 65% WSC, fenomenele de segregare locală nu pot fi evitate, fapt evidențiat de figura 4.13.b. Fenomenul de autosuținere al fazelor dure remarcat la depunerile cu adaos de 55% WSC continuă să se manifeste la o intensitate mărită și permite obținerea de depuneri cu un grad ridicat de omogenitate al distribuției fazelor dure pe secțiunea depunerii.

În ceea ce privește aspectele microstructurale, se remarcă accentuarea la nivel microscopic al aglomerării fazelor dure – figura 4.14, scăderea intensității precipitărilor fazelor dure din topitură – figura 4.15 a și b precum și reducerii domeniului de creștere epitaxială a fazelor dure pe limitele carburilor netopite – figura 4.16. a și b.

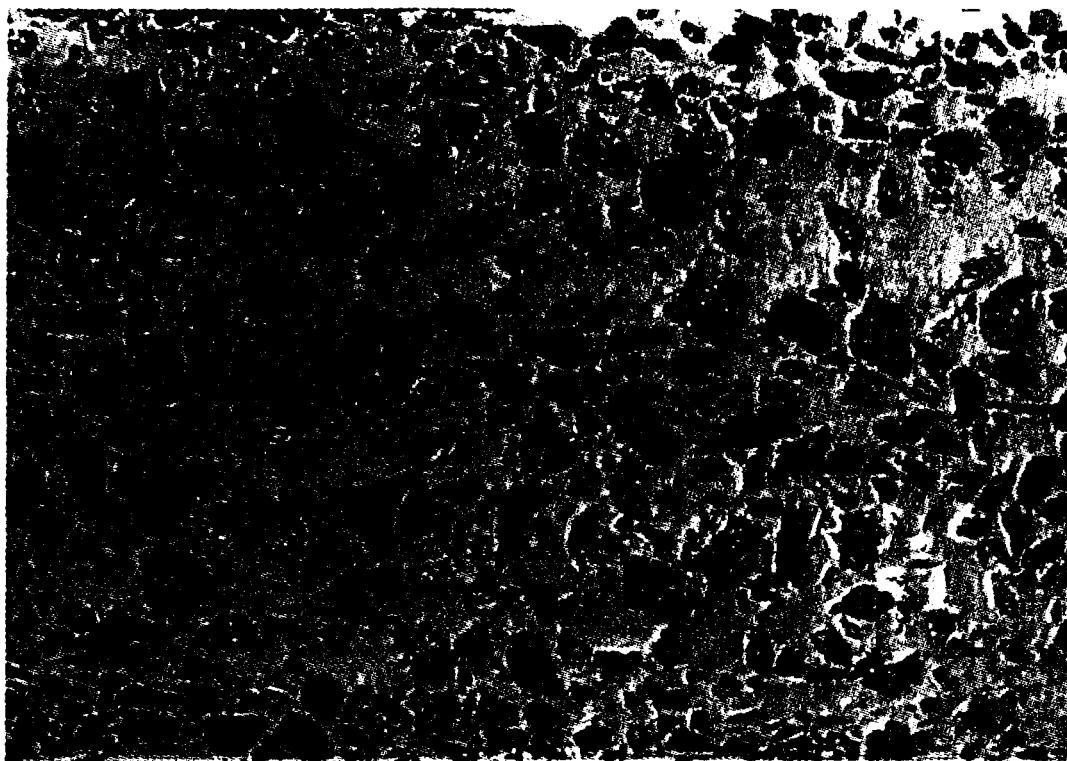


Figura 4.14. Aglomerări locale ale fazelor dure în volumul matricei, x50 ZnSe

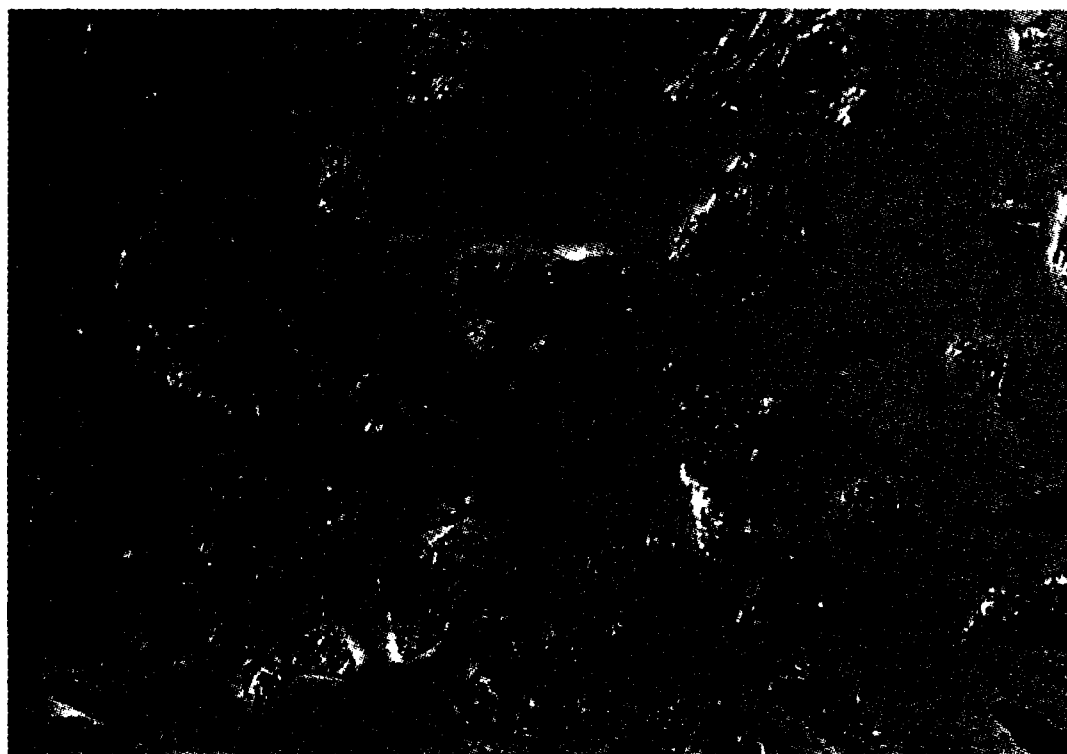


Figura 4.15.a. x200, ZnSe

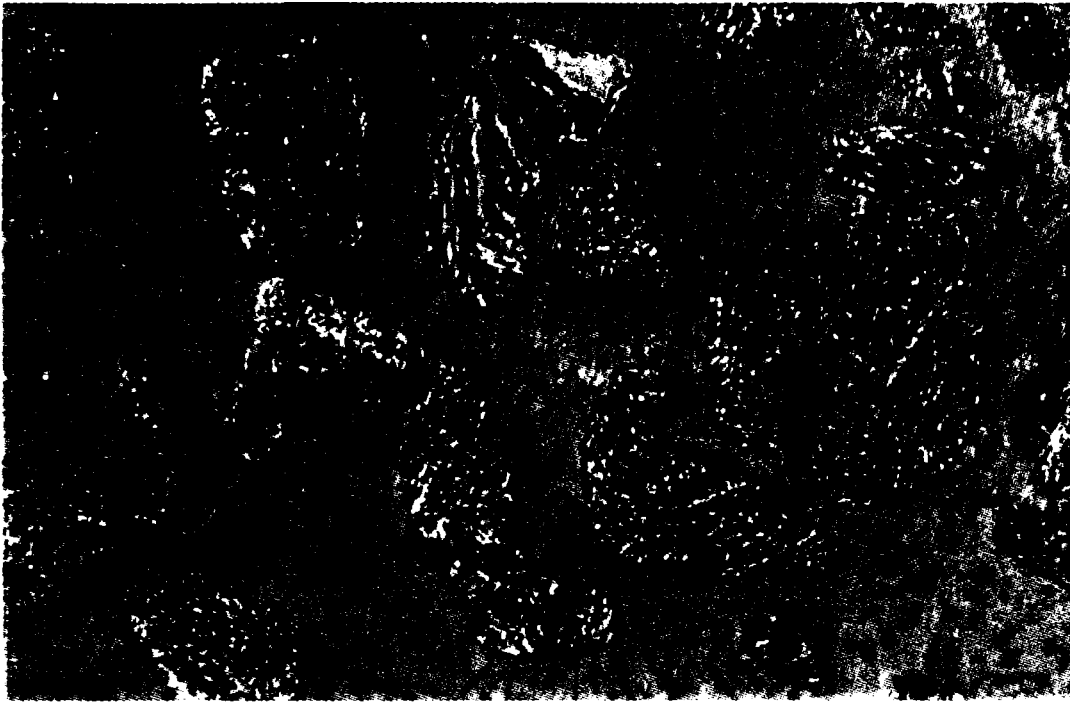


Figura 4.15.b. x200, ZnSe



Figura 4.16 a. x500, ZnSe



Figura 4.16 b. x500, ZnSe

Aceste fenomene sunt rezultatul scăderii puterii arcului electric, ce se regăsește în scăderea gradului de topire al fazelor dure introduse pe calea amestecului mecanic.

În consecință, fazele dure prezente vor proveni în mare parte din aliajul formator de matrice.

Așa cum se poate observa din imaginile din figura 4.15, dimensiunea fazelor dure precipitate din topitura metalică este mai redusă decât la depunerea aliajelor cu proporții mai reduse de faze dure. Motivația este aceea a puterii reduse a arcului electric transferat și în consecință, o viteză ridicată de solidificare a topiturii, fără precipitarea extensivă a fazelor dure.

4.2. Depuneri cu aliaj formator de matrice cod W 1.4115

Pentru a evalua efectul materialului matricei asupra comportării la încercările de uzare, s-au realizat probe de sudare, examinări microstructurale și încercări de uzare abrazivă asupra unor depuneri realizate utilizând aliaje formatoare ferito-martensitice.

Tabelele 4.1. prezintă compoziția chimică a pulberilor ferito-martensitice menționate mai sus. Proprietățile de exploatare ale aliajului W 1.4115 sunt prezentate în anexa 1

Depunerile realizate s-au derulat utilizând amestecuri cu un conținut de până la 55% carbură de wolfram WSC.

Ca urmare a proporției crescute de carbon în depunere în urma îmbogățirii în carbon, este de așteptat modificarea structurii de la una ferito-martensitică la una austenitică sau ledeburitică.

Tabelul 4.5. Pulbere W 1.4115, producător Höganäs AB. Suedia

Granulație: 53 – 200 μm

Compoziția chimică pe șarjă:

| Analiza chimică | Rezultatele măsurărilor | |
|------------------------|--------------------------------|---|
| C | 0,20 | % |
| Si | 0,46 | % |
| B | <0,01 | % |
| Fe | Rest | % |
| Cr | 16,91 | % |
| Ni | 0,76 | % |
| Mo | 1,13 | % |
| Mn | 0,62 | % |
| S | 0,003 | % |
| P | 0,018 | % |
| O _{tot} | 0,043 | % |

Datorită conținutului redus de carbon în aliajul formator de matrice, este de asemenea de așteptat o tendință mai redusă la fisurare a depunerilor.

4.2.1. Depuneri realizate cu amestecul W 4.115 + 25% WSC

Spre deosebire de depunerile realizate cu amestecul P 40 + 25% WSC, volumul redus al carburilor în masa metalică nu creează dificultăți în obținerea depunerilor omogene din punctul de vedere al distribuției fazelor dure pe grosimea secțiunii depunerilor.

Figurile 4.17.a și b ilustrează acest fenomen, cu depuneri realizate cu regimuri extreme în ceea ce privește durata de viață a băii metalice.

Așa cum se poate remarca din figura 4.17.a., tendința de segregare (sedimentare) nu este atât de evidentă ca la depunerile cu aliaj formator de matrice P 40, motiv pentru care optimizarea regimului de sudare nu este critică din punctul de vedere al segregării fazelor dure.

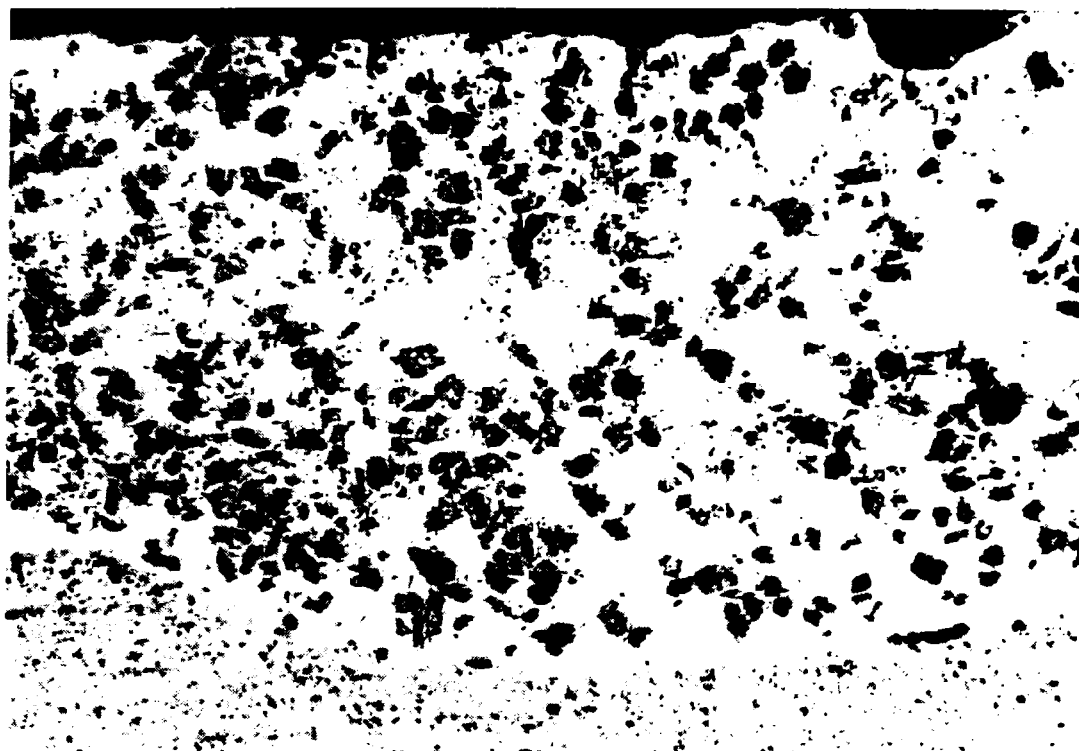


Figura 4.17. a. x25, Murakami

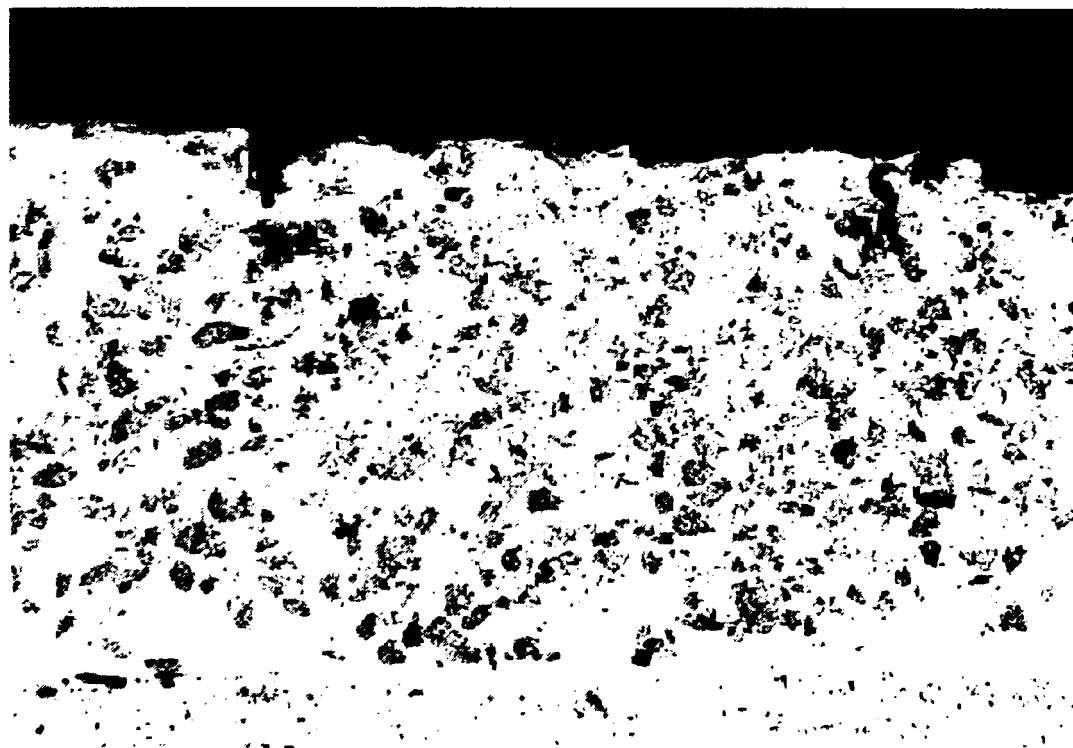


Figura 4.17. b. x25, Murakami.

Examinarea microstructurală efectuată prin microscopie optică cu contrastare prin interferență a relevat schimbări ale aspectului matricei metalice determinate de adaosul de carburi.

Precipitățile primare de carburi își păstrează aspectul dendritic, așa cum a fost relevat la examinarea depunerilor realizate cu pulberea P 40.

Cu toate că compoziția matricei metalice a depunerii este omogenă din punct de vedere chimic, se remarcă diferențe din punct de vedere microstructural al precipităților primare și epitaxiale (pe limitele carburilor netopite) de faze dure.

4.2.2. Depuneri realizate cu amestecul W 4.115 + 40% WSC

Spre deosebire însă de depunerile cu adaosuri de 25% WSC, depunerile cu 40 respectiv 55% WSC prezintă tendințe de segregare ale fazelor dure. De aceea, s-au derulat probe în vederea optimizării regimurilor și evitarea segregării, într-un mod asemănător depunerilor realizate cu pulberea formatoare de matrice P 40.

Figurile 2.18 a și b, prezintă aspecte macrostructurale ale depunerilor realizate cu amestecuri cu baza W 1.4115 și adaosuri de 40% WSC

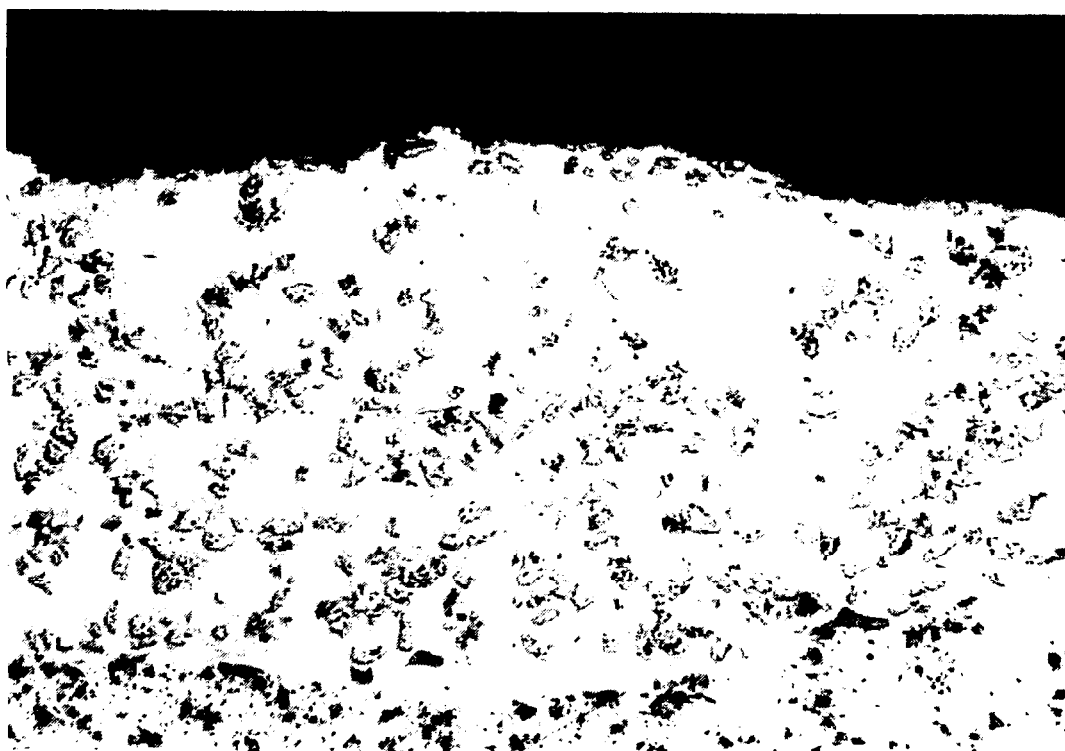


Figura 4.18. a. x25, Murakami

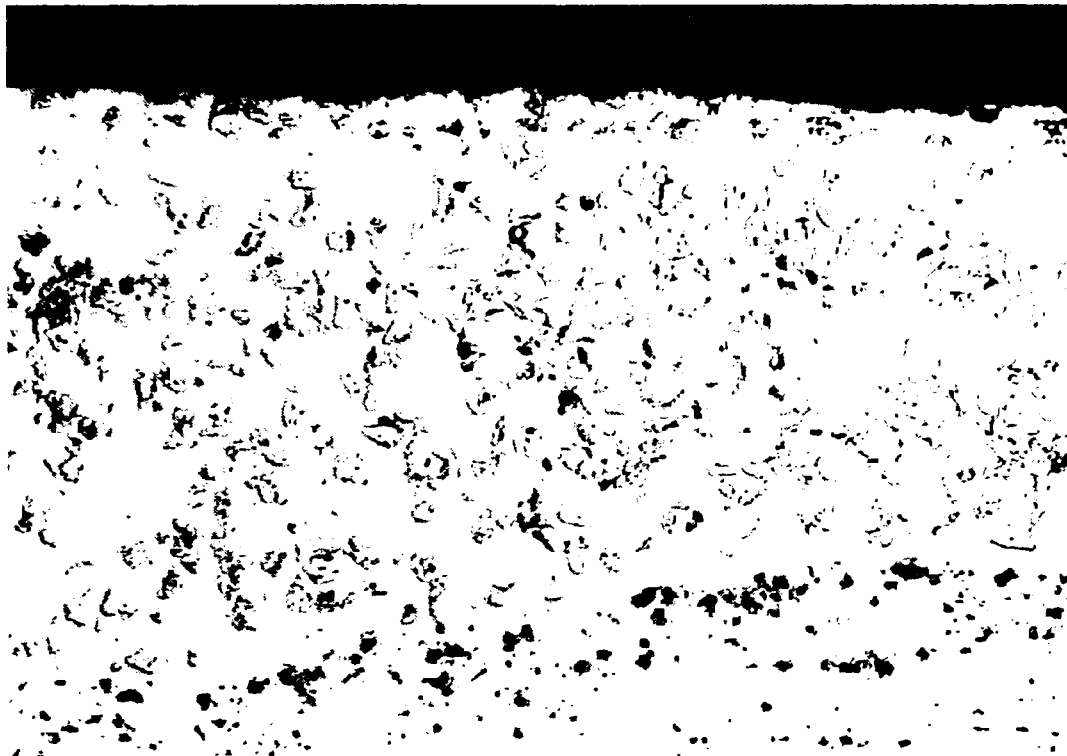


Figura 4.18. b. x25, Murakami.

Aspectul matricei depunerilor prezintă suplimentar carburilor netopite și segregării de faze dure, cu aspect dendritic, înglobate într-o matrice eutectică fină.

În ciuda prezenței segregățiilor, intensitatea fenomenului de precipitare a fazelor dure primare nu este atât de evidentă ca la depunerile realizate cu aliajul P 40. Cauza acestui fenomen este probabil proporția mult mai redusă a carbonului în aliajul W 1.4115, care, în ciuda solubilității mai reduse a carbonului în aliajele ferito–martensitice decât în aliajele austenitice, permite un nivel mai redus al precipitărilor comparativ cu aliajul P 40, care depășește nivelul saturației în carbon.

Figura 4.19 prezintă aspectul microscopic la mărire redusă a unei depuneri realizate cu un amestec W 1.4115 + 40% WSC în porțiunea inferioară a depunerii.

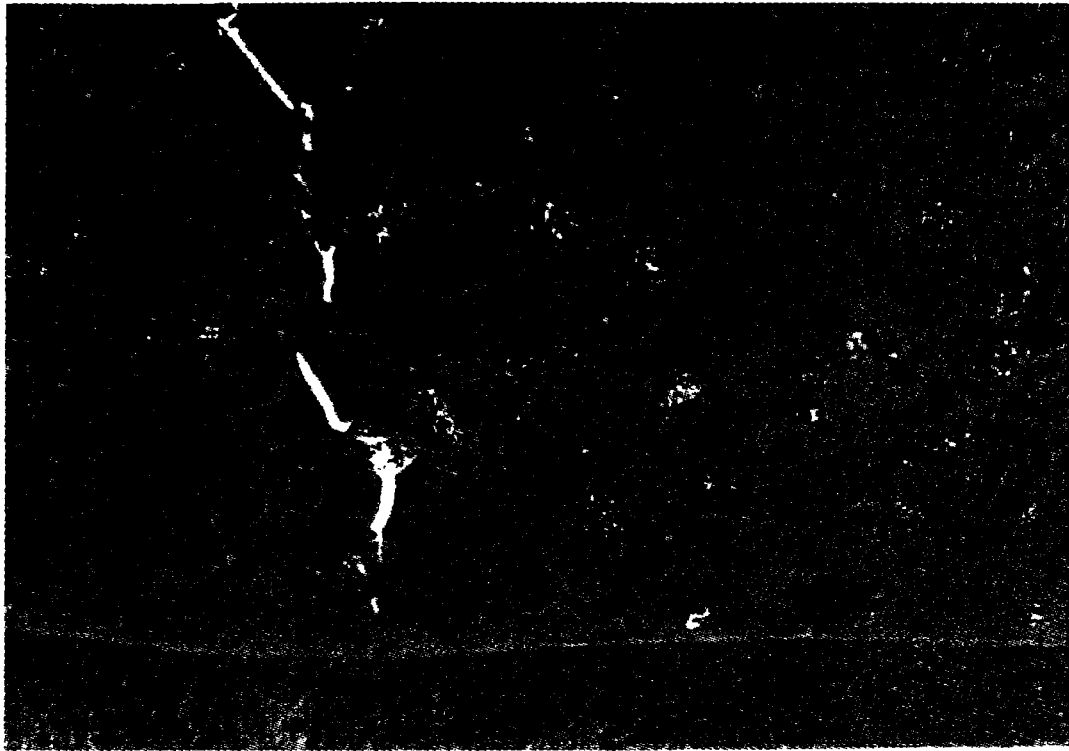


Figura 4.19. x50, ZnSe

Asemănător depunerilor realizate cu proporții asemănătoare de carburi cu aliajul P 40, asigurarea omogenității locale a depunerii este relativ dificilă. Se pot remarca aglomerări locale, care au potențialul de a deveni centre de fisurare sub efectul solicitărilor de oboseală de contact ce apar în exploatare

Figurile 4.20 a și b prezintă aspecte ale depunerii în zona mediană și inferioară a depunerii. Așa cum s-a observat la depunerile realizate cu aliajul P 40, gradul de finisare al fazelor dure precipitate din topitură este mai avansat în porțiunea inferioară a depunerilor. De asemenea, extinderea stratului epitaxial de carburi este mai mare în zona mediană a depunerii.

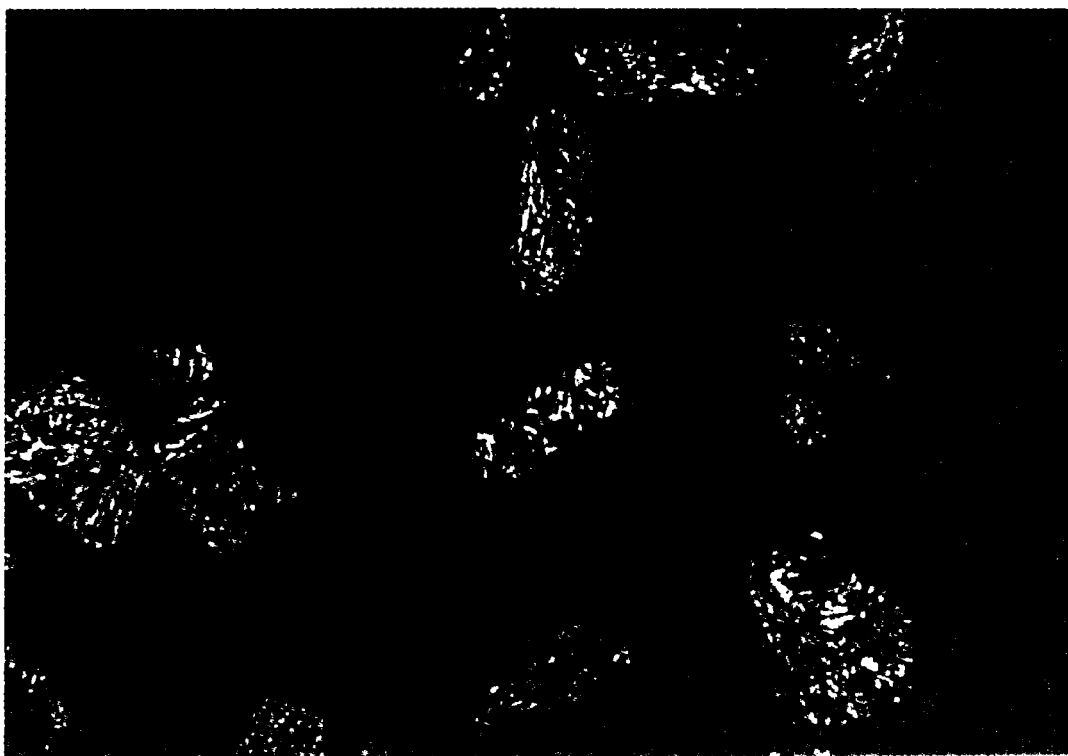


Figura 4.20.a. x200, ZnSe.

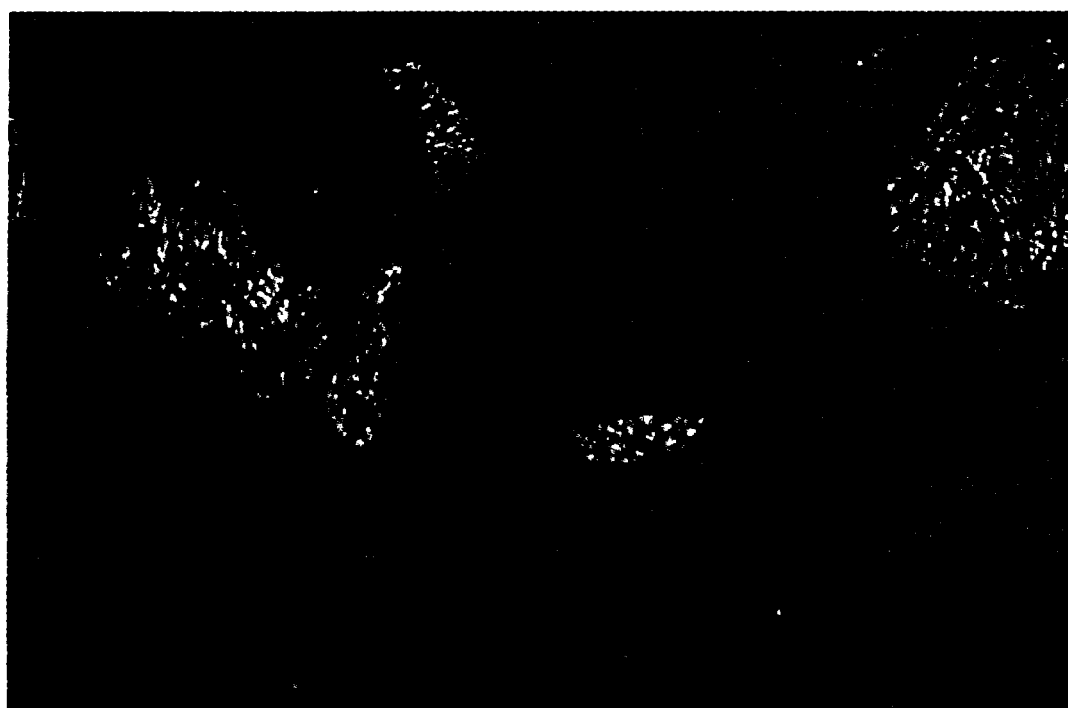


Figura 4.20.b. x200, ZnSe.

În timp ce în zona superioară a depunerilor în matricea metalică se remarcă câmpuri de culoare închisă (eutectic) cu o extindere relativ mică, porțiunile de eutectic în zonele inferioare ale depunerii sunt mai extinse, dar cu un grad de finisare mai avansat.

Figura 4.21 prezintă suplimentar aspecte ale matricei metalice vizibile la mărire mare. Se remarcă aspectul eutectic al matricei, ce înglobează componente de culoare deschisă, respectiv închisă.



Figura 4.21. x500, ZnSe.

Datorită creșterii proporției fazelor dure precipitate direct pe fazele dure netopite, extinderea zonelor fără precipitări directe este mai mare, iar ponderea zonelor cu aspect eutectic (roșu deschis) este mai extinsă pe seama reducerii regiunilor cu precipitate de fază (probabil γ). Figura 4.22 ilustrează acest fenomen pentru o depunere realizată cu amestecul W 4.115 + 40% WSC.



Figura 4.22. x1000, ZnSe.

4.2.3. Depuneri realizate cu amestecul W 4.115 + 55% WSC

Spre deosebire de depunerile realizate cu aliajul formator de matrice P 40, depunerile realizate cu un adaos de 55% WSC în matrice formată de aliajul W 1.4115 nu prezintă tendințe evidente de segregare a fazelor dure, stabilirea parametrilor de regim fiind relativ facilă din acest punct de vedere.

Figurile 2.23 a și b prezintă în acest sens aspecte macrostructurale ale depunerilor realizate cu amestecuri cu baza W 1.4115 și adaosuri de 55% WSC, relevând o omogenitate relativ ridicată a distribuției fazelor dure în volumul depunerii.

Încă de pe parcursul procesului de realizare al depunerilor s-a putut remarca o vâscozitate ridicată a topiturii (depunerii), care se presupune a fi cauza tendinței reduse de segregare a fazelor dure.

Asemănător depunerilor anterioare, pe plan microstructural se observă diferențe semnificative în ceea ce privește aspectul matricei între zonele superioară, mediană și inferioară. Figura 4.23 a, b, 4.24 a și b respectiv 4.25 a și b prezintă aspectul microstructural în zonele menționate ale depunerilor realizate.

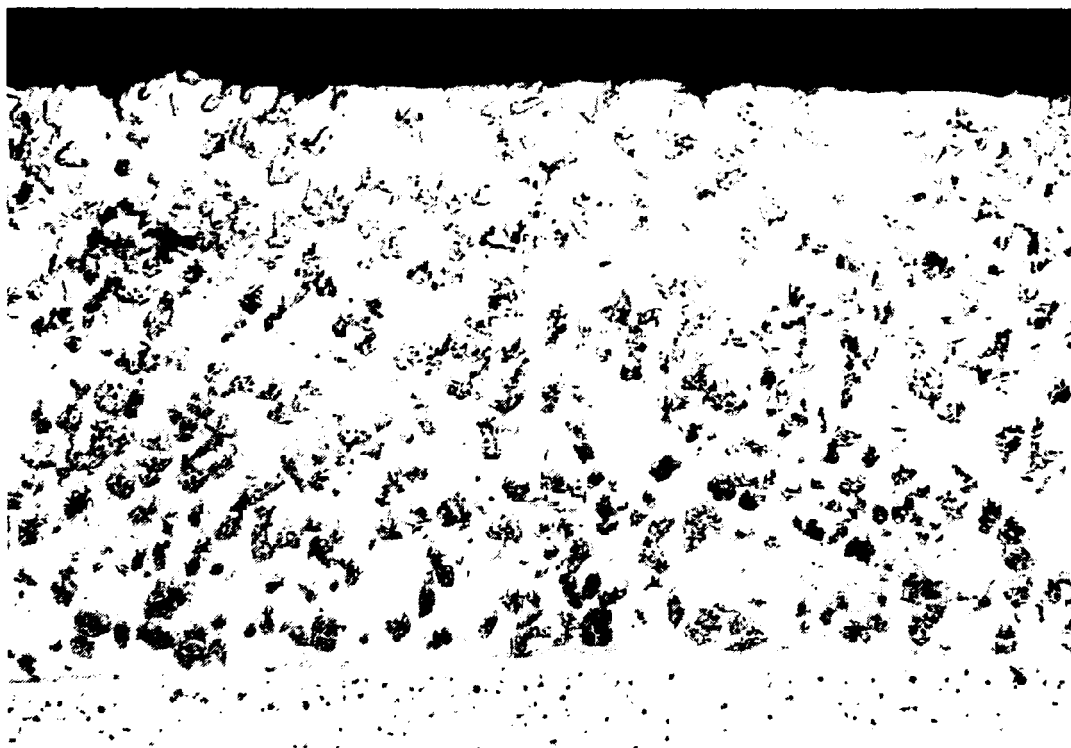


Figura 4.22.a. x25, Murakami

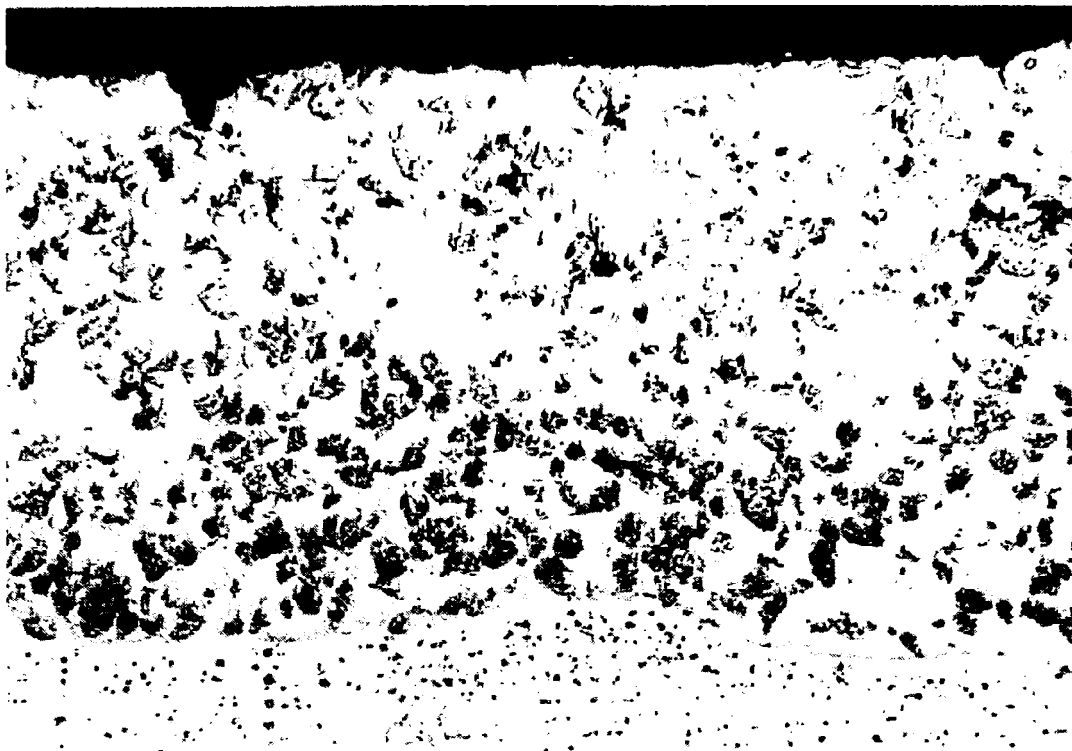


Figura 4.22.b. x25, Murakami.

Este de remarcat orientarea mult mai clară a fazelor solidificate în apropierea substratului decât în cazul depunerilor realizate folosind aliajul formator de matrice P 40, în timp ce în zona mediană și superioară gradul de “dezorientare” al fazelor precipitate crește evident. Fazele precipitate în porțiunea superioară au un grad evident mai ridicat de dezvoltare decât în porțiunea mediană a depunerii.

Este vizibilă de asemenea dimensiunea mult mai mare a fazelor crescute din topitură având ca germene de cristalizare fazele dure netopite pe parcursul procesului de sudare. Motivația acestui fenomen poate fi încă o dată proporția redusă de carbon în topitură (baia metalică), fenomen care suprimă aproape integral precipitarea directă din soluție.



Figura 4.23.a. x200, ZnSe.



Figura 4.23.b. x200, ZnSe.

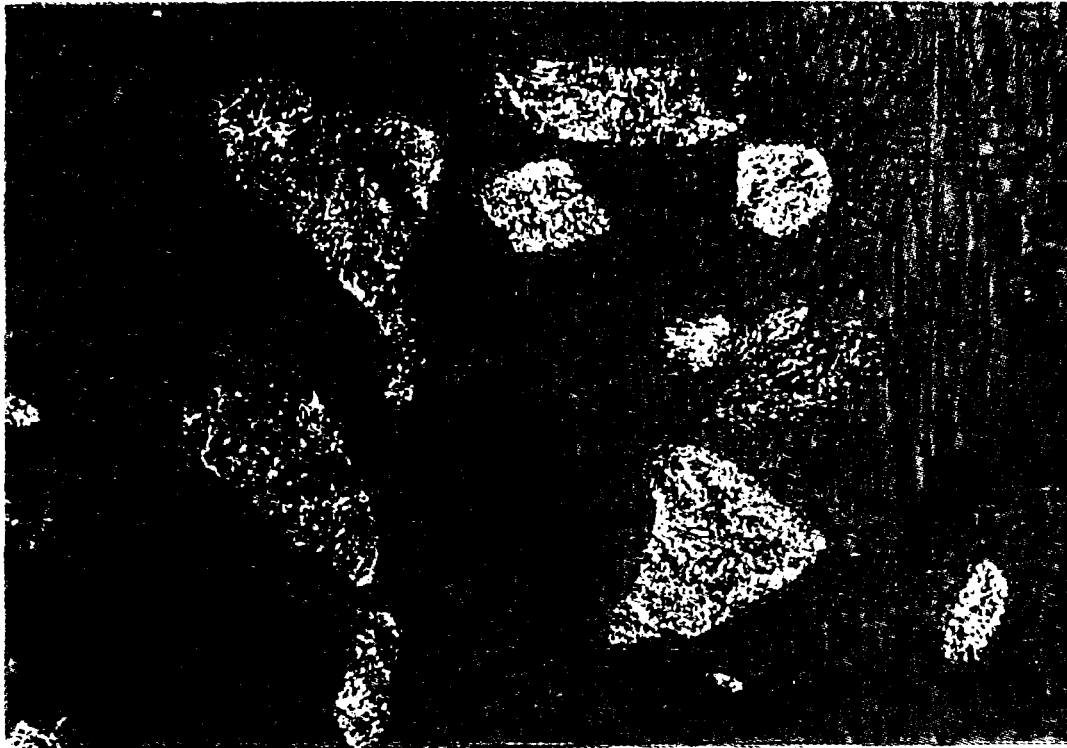


Figura 4.24.a. Porțiunea inferioară, x200, ZnSe.

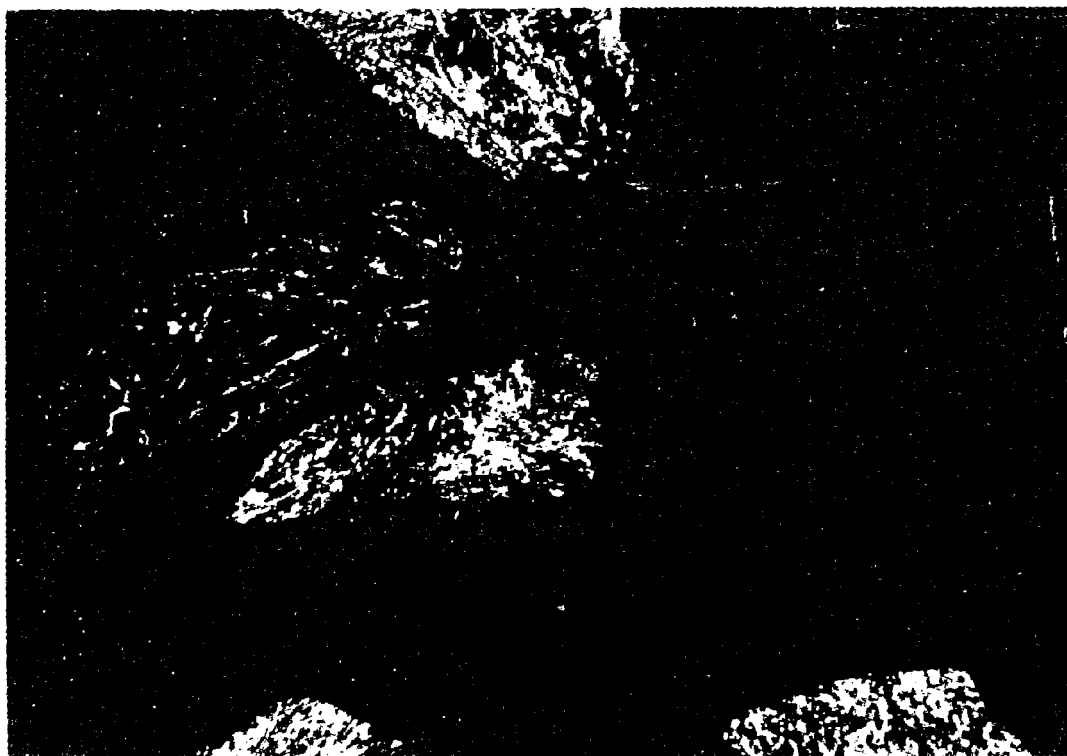


Figura 4.24.b. Porțiunea inferioară x500, ZnSe.



Figura 4.25.a. x200, ZnSe.



Figura 4.25.b. x500, ZnSe.

Modificările structurale sunt asemănătoare depunerilor cu aliajul P 40, însă este de remarcat o schimbare radicală de natură metalurgică. Caracterul ferito-martensitic al depunerii se schimbă, devenind de tip ledeburitic, având ca fază constitutivă austenita (Fe_γ) aliată. Această schimbare este relevantă și de comportamentul magnetic al depunerii, care devine paramagnetic.

Concluzii

- este posibilă realizarea de depuneri folosind aliaje ferito–martensitice cu adaosuri de faze dure de tipul carburilor de wolfram;
- riscul de segregare al depunerilor este mai redus decât în cazul depunerilor realizate folosind pulberea matrice P 40
- tendința de fisurare a depunerilor este redusă
- are loc o schimbare morfologică care face ca depunerile să prezinte caracter (aspect microscopic) ledeburitic.

4.3. Depuneri cu aliaj formator de matrice P 40 și adaos de WSC și TiC

Programul experimental derulat a avut în vedere înlocuirea parțială a WSC cu o carbură cu stabilitate termică mai ridicată, pentru a evidenția rolul fazelor topite asupra comportamentului depunerilor din punctul de vedere al sudabilității.

În acest sens, s-a recurs la înlocuirea parțială a WSC prin carbura TiC, obținută sub formă aglomerată prin sinterizare. Pentru derularea experimentului s-a procedat la înlocuirea unei proporții volumice de WSC egală cu diferența dintre două cantități succesive de fază dură.

S-au derulat experimente utilizând două amestecuri de pulberi:

- P 40 + 40% WSC + 12,2% TiC (echivalent amestec P 40 + 55% WSC);
- P 40 + 55% WSC + 15,4% TiC (echivalent amestec P 40 + 55% WSC).

Încă de la primele încercări, s-au putut consemna următoarele observații:

- Probleme legate de curgerea dificilă a pulberilor, determinată de rugozitatea superficială ridicată a carburilor de wolfram și titan
- tendință ridicată de fisurare a depunerilor realizate după plane paralele cu substratul;
- pierderi ridicate de pulbere la realizarea depunerilor. Cauza acestei observații pare să fie comportarea aerodinamică diferită a pulberilor TiC, care prin natura procesului tehnologic de elaborare (sinterizare) datorită rugozității ridicate au un diametru aerodinamic mult mai ridicat decât carburile de wolfram.

4.3.1. Depuneri realizate cu amestecul P 40 + 40% WSC + 12,4% TiC

Cu toate că curgerea pulberilor a ridicat de la început probleme la realizarea depunerilor, tendința de fisurare a depunerilor s-a manifestat doar la regimuri extreme de depunere, la valori ridicate ale intensității curentului arcului transferat, la care se manifestă fenomene de topire avansată a fazelor dure.

De aceea, realizarea depunerilor a fost posibilă fără dificultăți majore în condițiile creșterii ușoare a debitului de transport al pulberii și limitării puterii arcului transferat.

Cu toate că nivelul pierderilor de pulberi este relativ ridicat (pulberile TiC sinterizate au suprafața foarte rugoasă și sunt ușor antrenate de curenții de gaz), depunerea realizată prezintă un grad deosebit de ridicat de omogenitate, mult superior depunerilor realizate fără adaosul de carbură TiC. Figura 2.26 a, b și c prezintă aspecte structurale ale depunerilor realizate, la diferite mărimi prin microscopie optică.

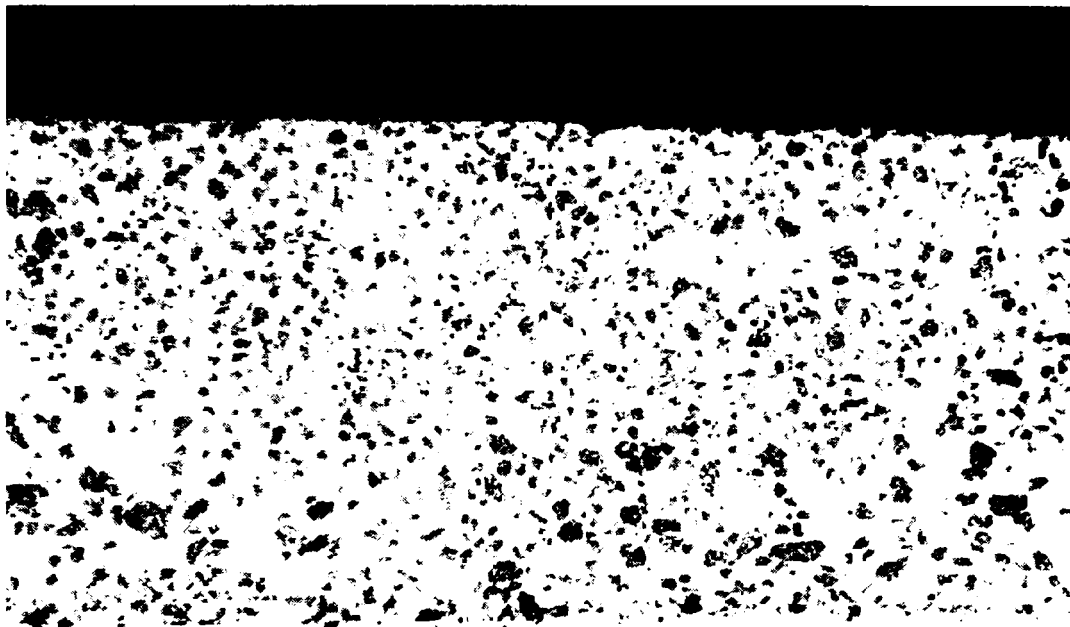


Figura 2.26.a. x25, Murakami

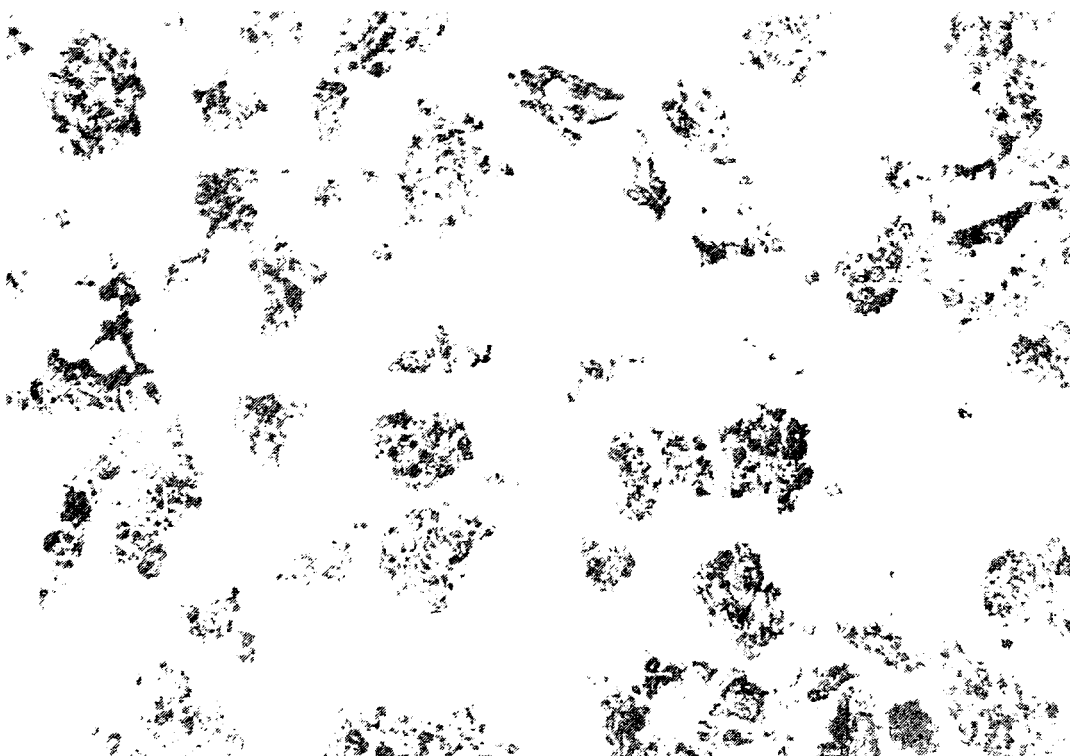


Figura 2.26.b. x200, Murakami

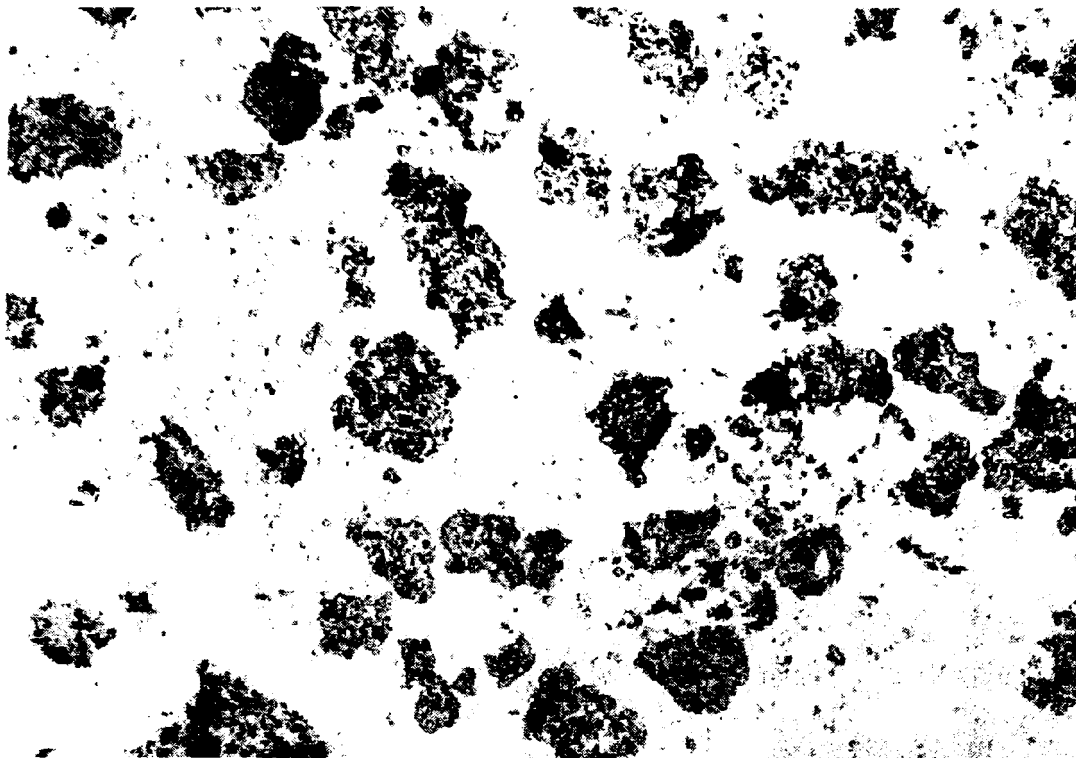


Figura 2.26.c. x200, Murakami

Se remarcă distribuția omogenă a unor precipitate fine, în întregul volum al matricei, pe toată grosimea depunerilor realizate. Se poate presupune de aceea că precipitatele fine de carburi precum și densitatea redusă a TiC fac ca fenomenul de segregare al WSC să piardă din intensitate iar depunerile să cunoască gradul de omogenitate structurală prezentat de figura 2.26.

Analiza prin contract de fază a permis decelarea deosebirilor dintre fazele dure netopite funcție de proveniența acestora (WSC, TiC)

Figura 2.27 prezintă la o mărire redusă o imagine macro realizată prin contrastare prin interferență (ZnSe)

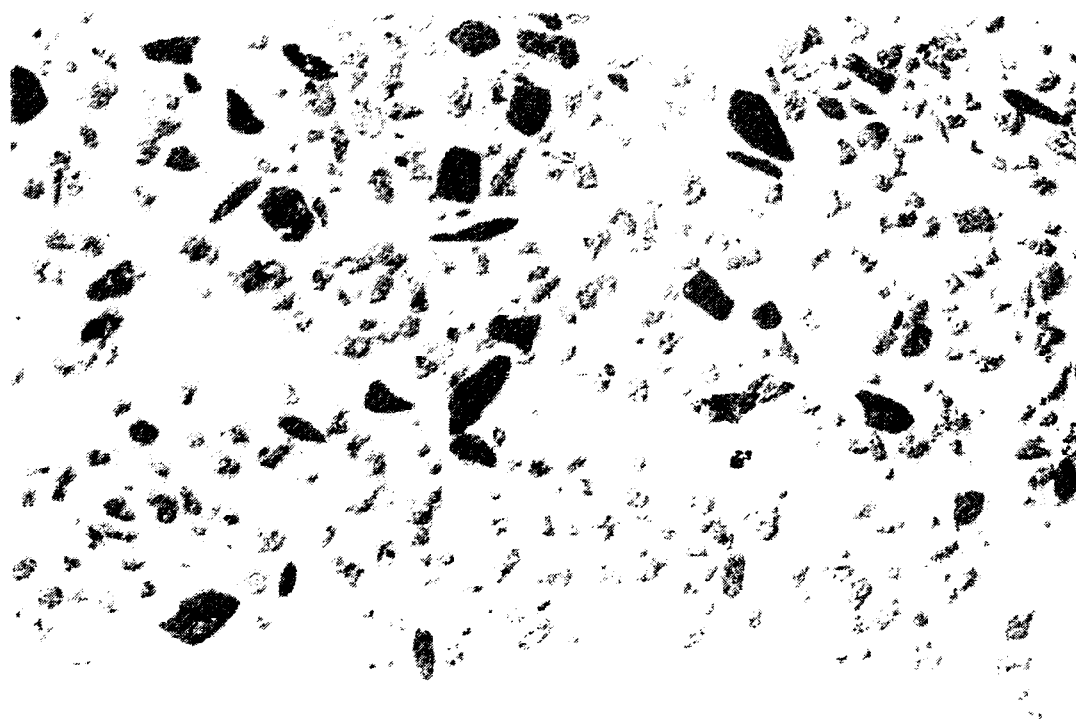


Figura 2.27. x50, ZnSe

Examinarea permite decelarea fazelor de tip WSC (particule de culoare închisă) și TiC (culoare deschisă), respectiv a fazelor precipitate din topitură și a componentelor matricei metalice.

Figura 2.28 a și b, respectiv 2.29 a și b prezintă aspecte ale microstructurii așa cum se regăsesc la nivel median și la suprafața depunerii.

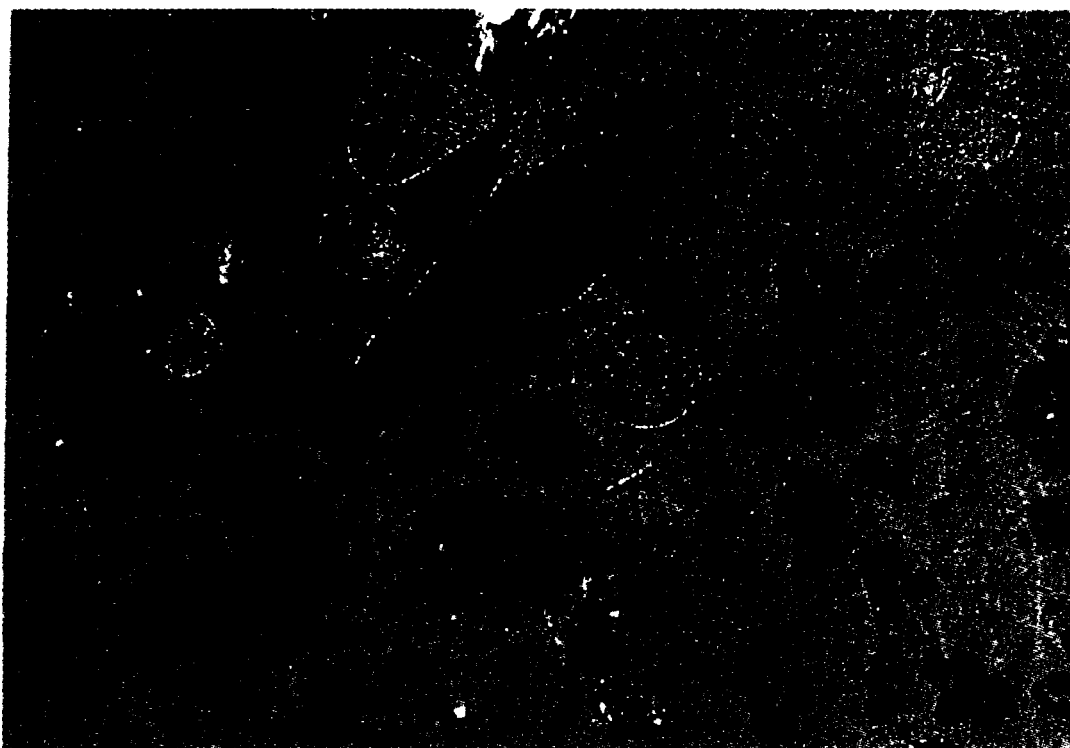


Figura 2.28.a., x200, ZnSe, porțiune mediană

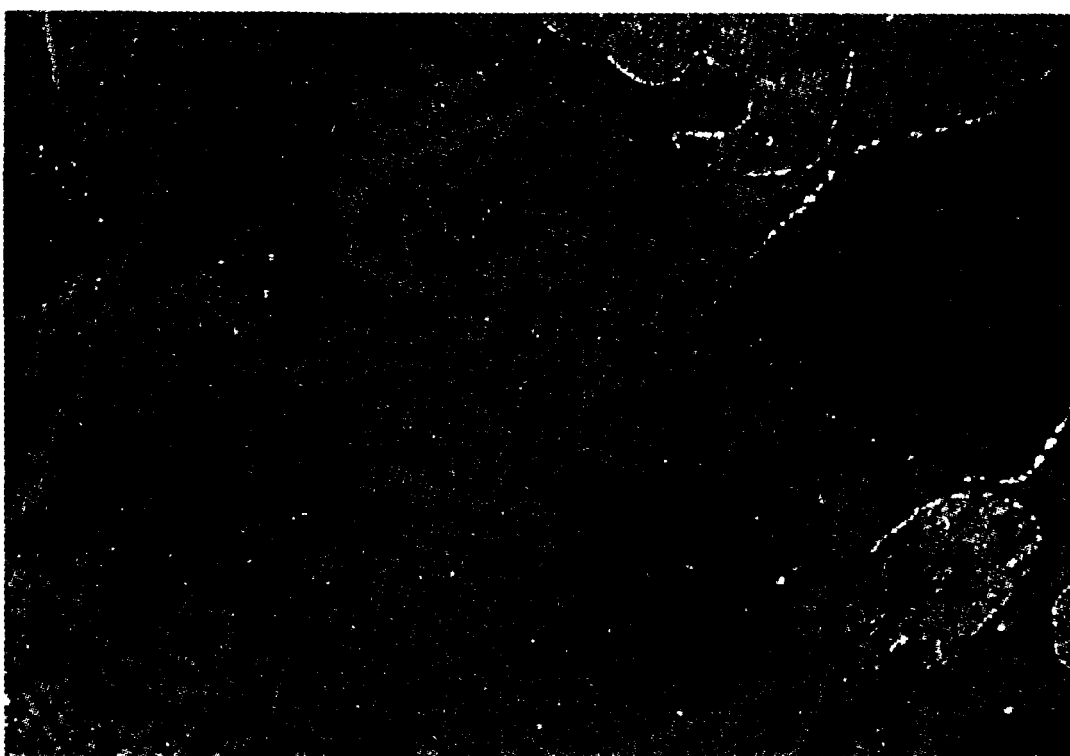


Figura 2.28.b., x500, ZnSe, porțiune mediană



Figura 2.29.a., x200, ZnSe, suprafața depunerii

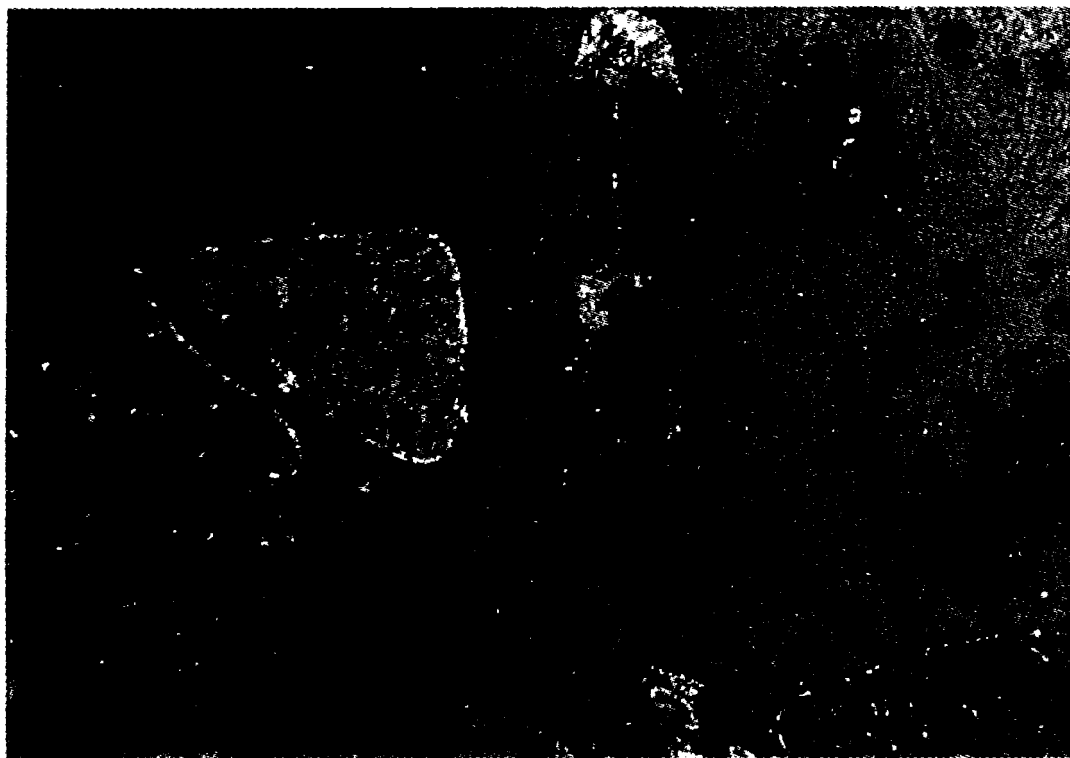


Figura 2.29.b., x500, ZnSe, suprafața depunerii

În timp ce fazele dure netopite provenind din WSC își păstrează structura dendritică rezultată din procesul de elaborare și se prezintă ca “grăunți” cu “ace” de diverse culori, particulele netopite de pulbere TiC nu arată structură internă dar prezintă elementele caracteristice aglomerării prin sinterizare ca goluri și formă apropiată de cea sferică.

Se poate remarca însă comportarea diferită a aliajului în porțiunea mediană respectiv superioară a depunerii prin prezența în partea mediană a precipitărilor fine de carburi (presupuse a fi TiC) și care nu se regăsesc în porțiunea inferioară.

Figura 2.30 prezintă aspectul matricei depunerilor realizate.

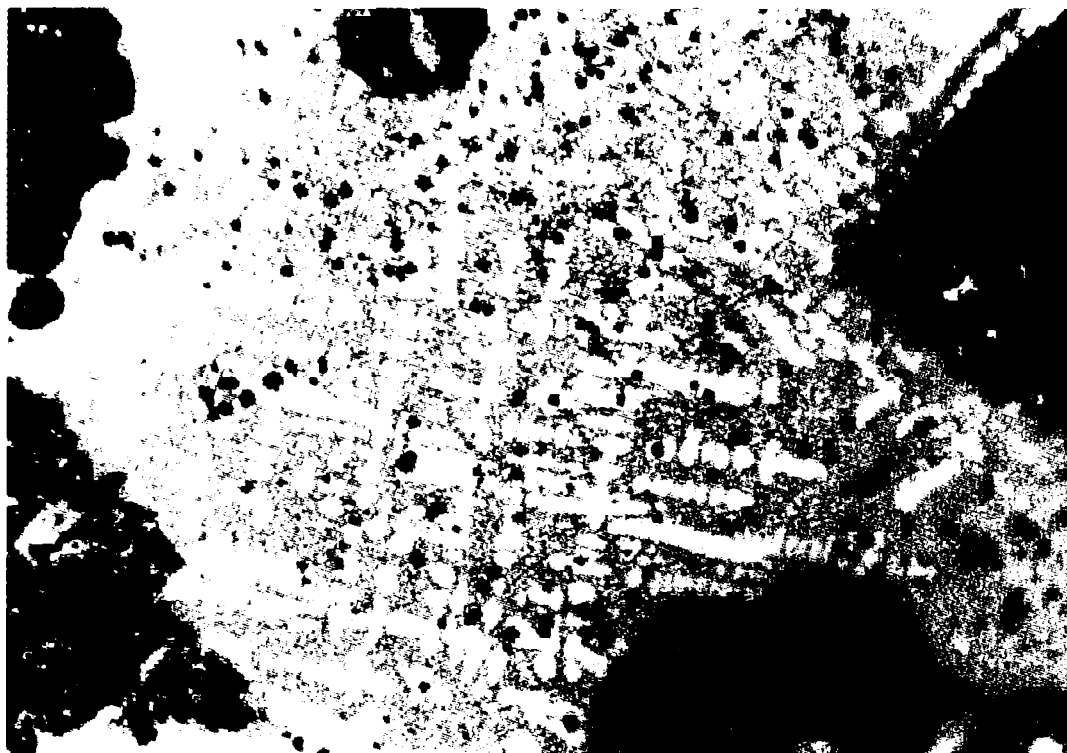


Figura 2.30. x1000, ZnSe

Se poate remarca absența fazelor crescute epitaxial pe limitele fazelor dure de tip TiC, spre deosebire de particulele netopite de WSC, la care fenomenul se manifestă conform așteptărilor. Cauza probabilă este lipsa de soluții solide pe care TiC le formează cu componentele amestecului supus procesului de sudare, respectiv stabilității termice ridicate a TiC, care precipită din topitură înaintea tuturor celorlalte faze.

4.3.2. Depuneri realizate cu amestecul P 40 + 55% WSC + 15,2% TiC

Depunerea amestecurilor P 40 + 55% WSC + 15,2% TiC a ridicat probleme deosebite de antrenare a pulberilor și a impus măsuri tehnologice deosebite de evitare a fisurării straturilor depuse. Dată fiind densitatea volumică deosebit de ridicată a fazelor dure, straturile depuse sunt foarte susceptibile la fisurare. Nu s-a reușit realizarea unor depuneri total lipsite de defecte de tipul fisurării paralele cu planul interfeței strat – substrat.

Figura 2.31 a, b și c prezintă unele aspecte macroscopice și indică sursa fenomenelor de fisurare: apariția de puncte de contact între fazele dure din depunere.

Aglomerările de culoare albă din depunere sunt particule netopite de pulbere P 40 și sunt rezultatul măsurilor tehnologice de reducere a puterii arcului transferat, luate pentru evitarea fisurării depunerilor. Fisurile parcurg linii de aglomerare a fazelor dure, interceptând în unele cazuri și limitele fazelor granulelor de pulbere P 40 rămase netopite – figura 2.31.c.

Se remarcă de asemenea grosimea redusă a stratului, rezultat al creșterii semnificative a pierderilor de pulbere datorită puterii reduse a arcului transferat din cadrul experimentului și utilizării unui sistem cu introducere externă a pulberilor.

Aspectele microscopice ale depunerilor realizate sunt relevate în figura 2.32 a și b, respectiv 2.33 a și b, așa cum se regăsesc în porțiunea superioară și inferioară a depunerilor.

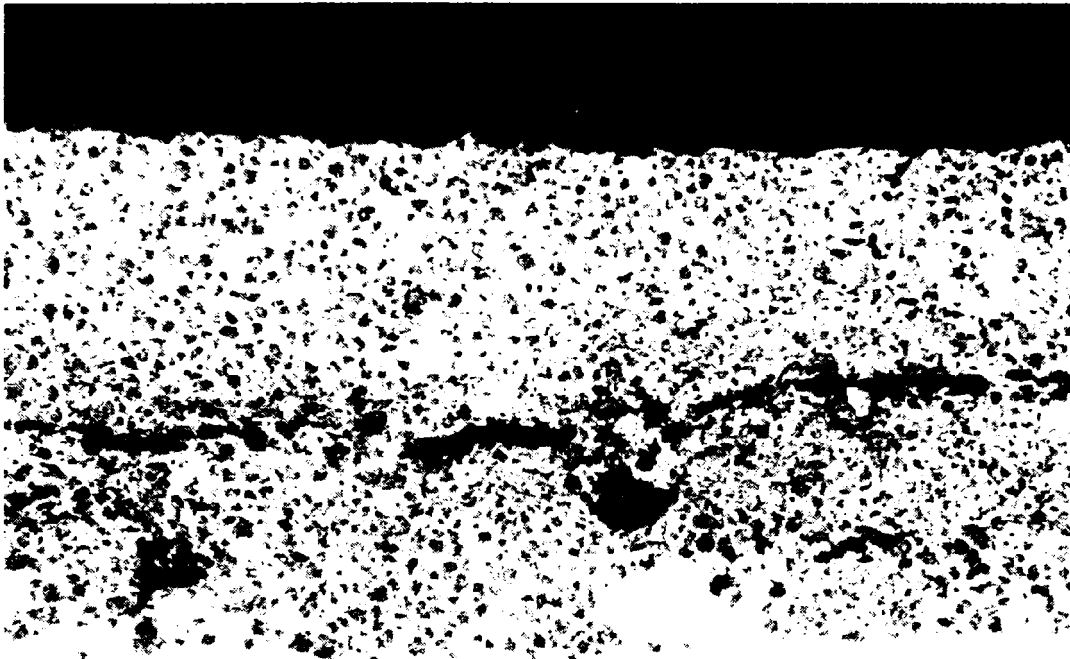


Figura 2.31.a. x25, Murakami

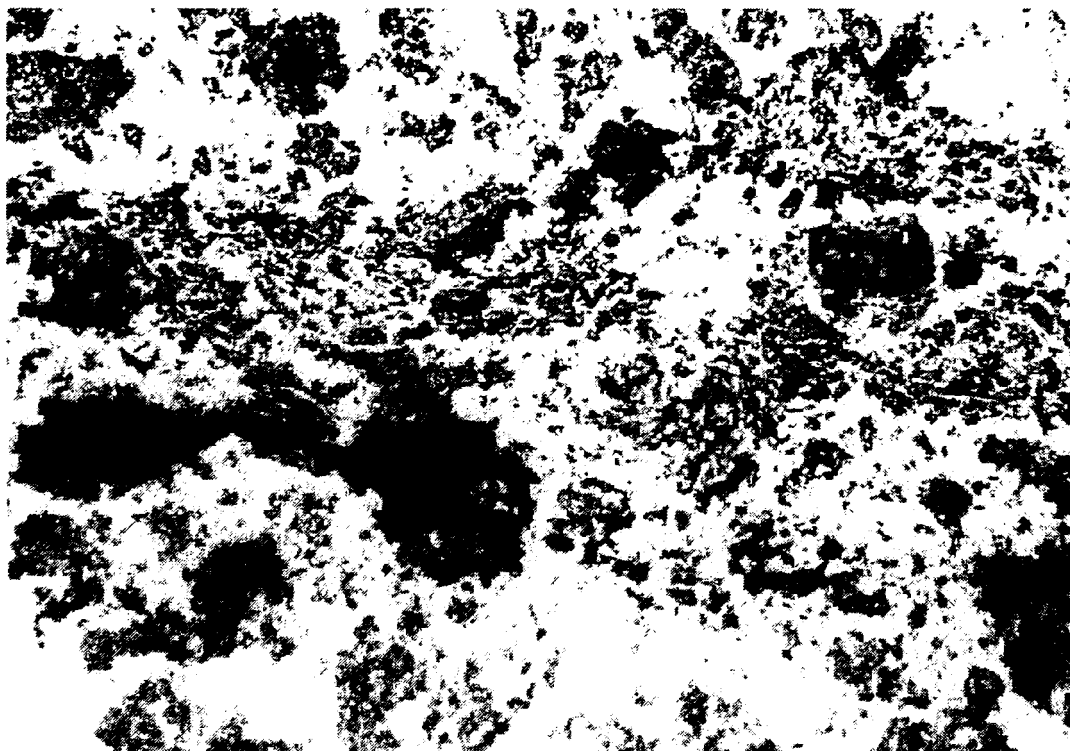


Figura 2.31.b. x200, Murakami

Analiza imaginilor de microstructură permite relevarea unor elemente caracteristice asemănătoare depunerilor realizate fără adaosuri de TiC, după cum urmează:

- intensitatea precipitării fazelor fine (TiC?) este mai intensă în porțiunea superioară a depunerilor;

- extinderea zonelor de precipitare primară a carburilor din topitură este mai mare în regiunea superioară a depunerilor
- extinderea zonelor eutectice în regiunea inferioară este mai mare decât în porțiunea superioară

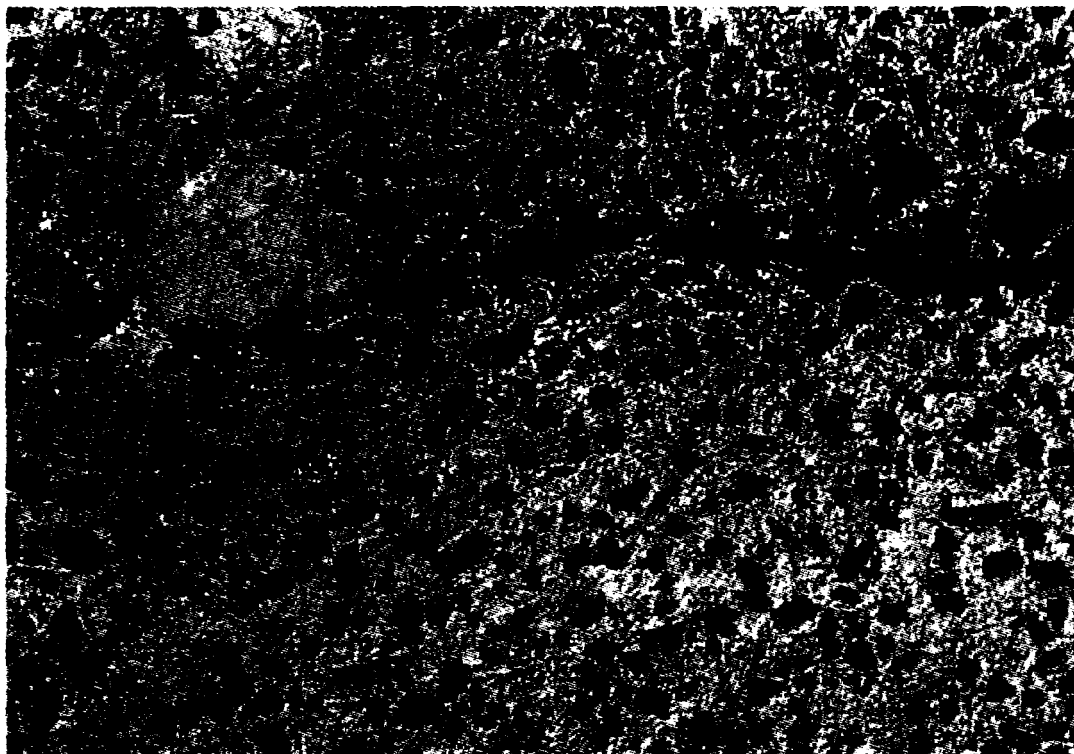


Figura 2.31 c. x50, ZnSe

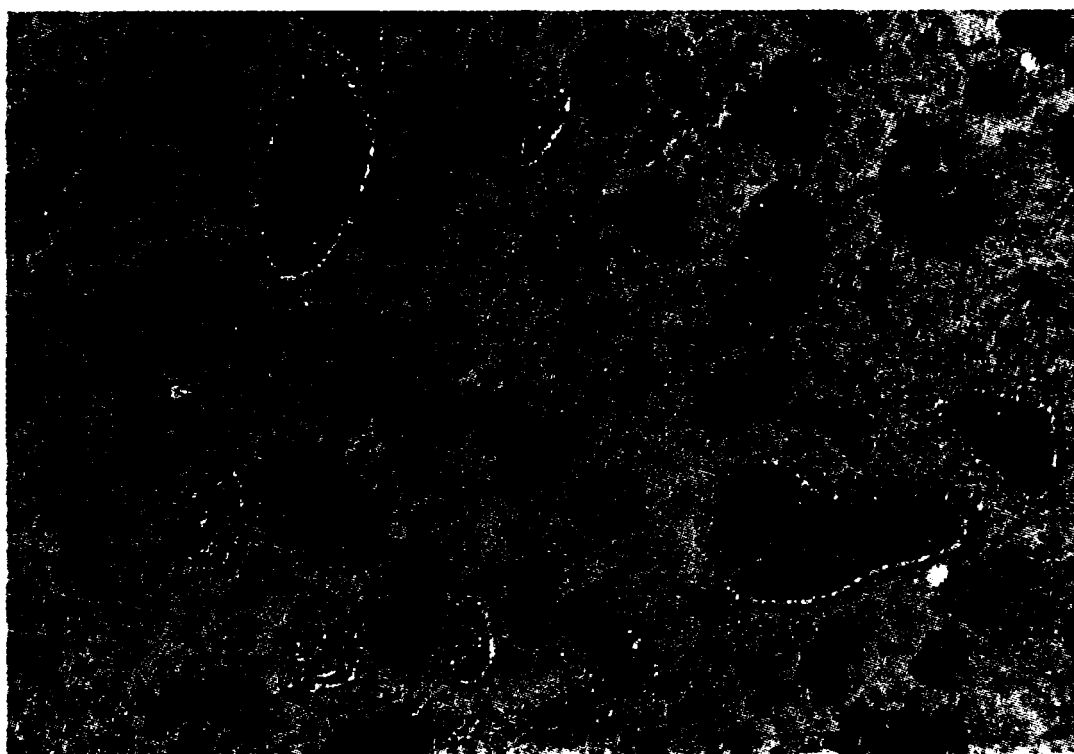


Figura 2.32.a. x200, ZnSe

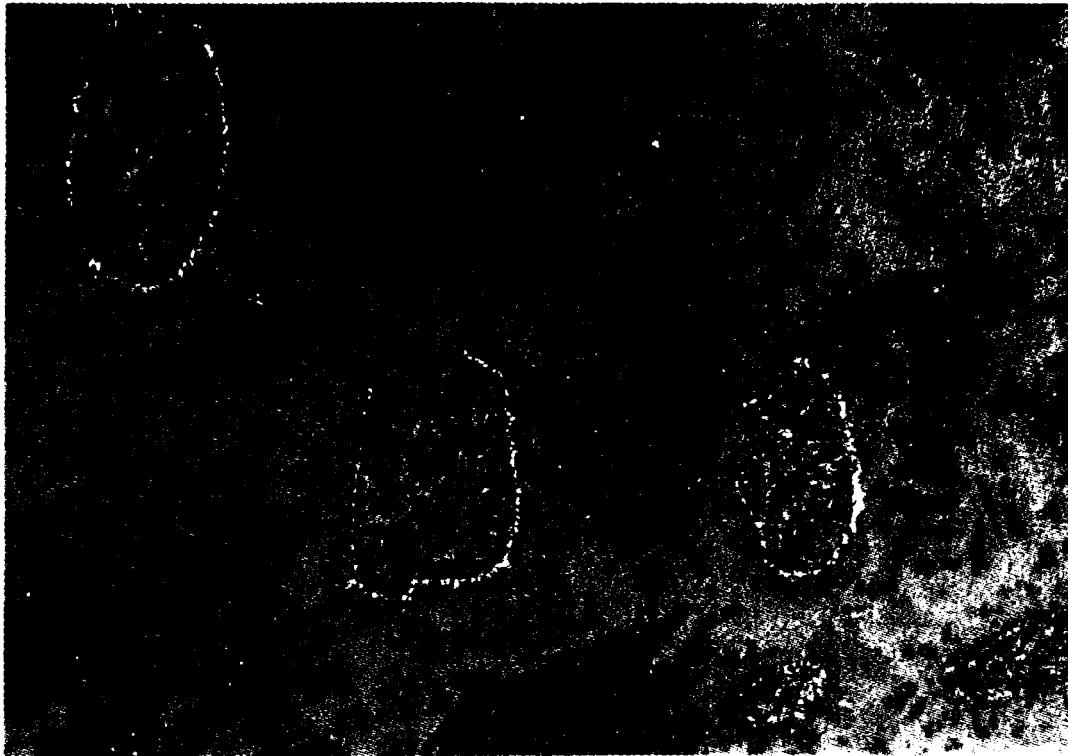


Figura 2.32 b. x500, ZnSe

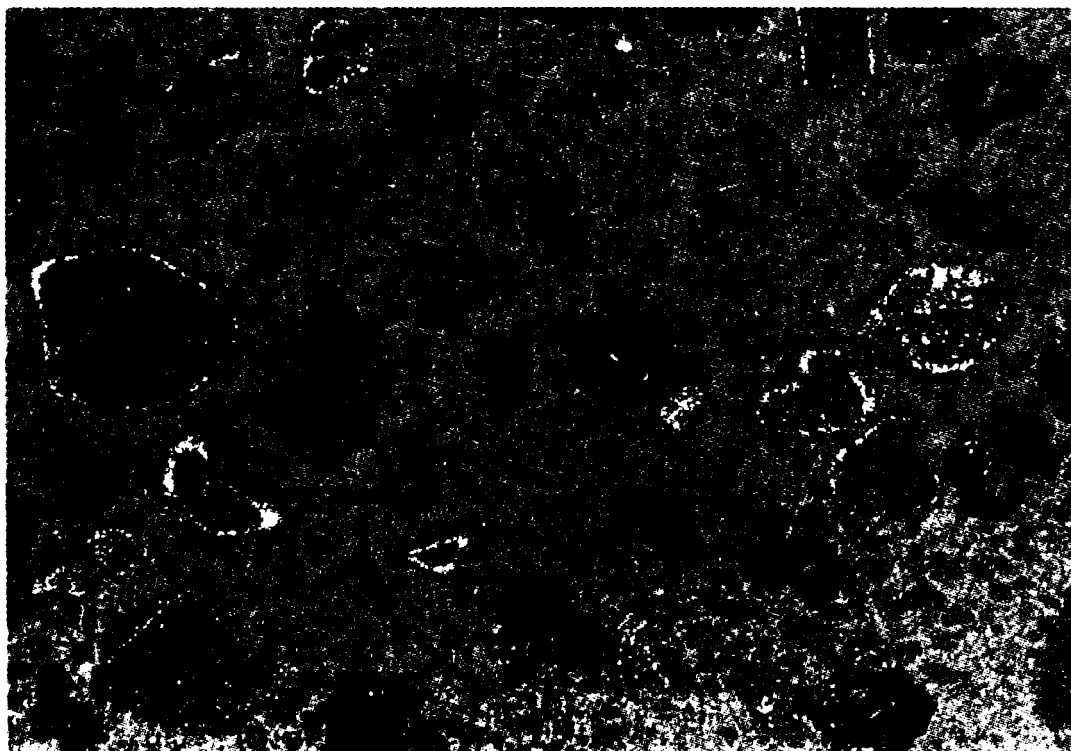


Figura 2.33.a. x200, ZnSe

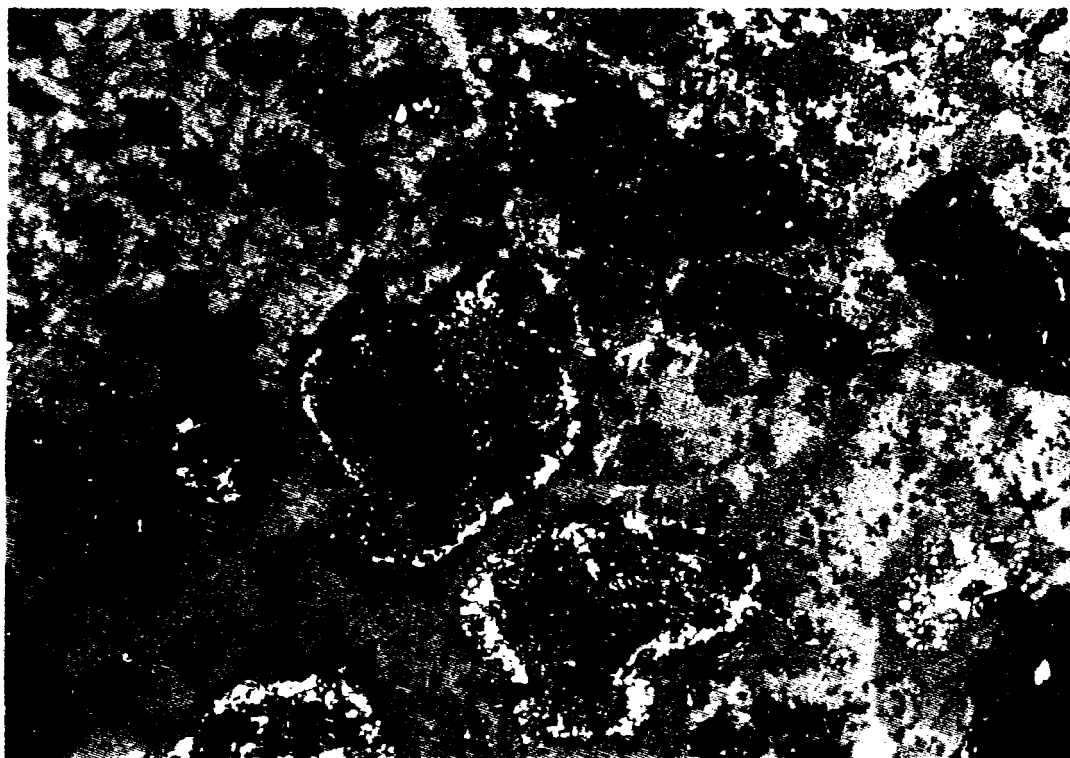


Figura 2.33.b. x500, ZnSe

4.4. Concluzii:

- este posibilă realizarea de depuneri folosind amestecuri de faze dure într-o matrice austenitică cu conținut de carbon
- adaosul de faze dure cu stabilitate ridicată și densitate redusă (în acest caz TiC) limitează fenomenele de segregare a fazelor dure cu densitate ridicată (aici WC) prin apariția unor fenomene de susținere a WSC prin creșterea densității de particule;
- creșterea densității particulelor de faze dure limitează puterea arcului transferat, fapt ce se poate reflecta în apariția de faze dure sau particule de pulbere metalică netopite în volumul depunerii;

creșterea densității particulelor de faze dure mărește probabilitatea formării punților de carburi, cu efecte negative asupra sudabilității (aici - capacitatea de a fi depuse prin sudare) amestecurilor, indiferent de regimul tehnologic.

CAPITOLUL 5. ANALIZA SCLEROMETRICĂ A DEPUNERILOR COMPOZITE REALIZATE PRIN PROCEDEUL PTA

5.1. Introducere

Alegerea unui material antiuzură destinat sistemelor tribologice cu mecanisme de uzare fără șocuri este relativ facilă și are în marea majoritate a cazurilor la bază duritatea ridicată a materialului metalic de rezistență coroborată cu prezența unor faze dure cu grad avansat de precipitare.

Aplicațiile care coroborează șocurile cu uzarea abrazivă severă, așa cum sunt sistemele tribologice prezente în echipamentul minier și terasier, impun realizarea unor matrici metalice tenace care înglobează faze dure cu capacitate ridicată de preluare a presiunilor de contact ce apar în exploatare. Deoarece duritatea aliajelor cu baza fier este în majoritatea cazurilor strâns corelată și proporțională cu proporția de faze dure, cunoașterea intensității topirii fazelor dure (carburi) introduse în amestecul de pulberi și corelarea lor cu duritatea matricei metalice este de mare importanță.

Pentru evidențierea gradului de topire al fazelor dure și corelarea acesteia cu duritatea matricei s-au efectuat măsurători privind proporția fazelor topite din volumul introdus în amestecul de pulberi, precum și măsurători ale durității cu microsarcini, respectiv măsurători ale durității suprafeței depunerilor. S-au utilizat metodele HV 0,5, HV 5 respectiv HV 30.

În programul experimental privind evaluarea gradului de topire al fazelor dure, pornind de la ipoteza general acceptată că proporția volumică a unei faze este egală cu proporția de suprafață într-o secțiune oarecare, s-au efectuat determinări pe un sistem computerizat de analiză a imaginii.

5.2. Încercări privind proporția fazelor dure topite la sudare și efectul lor asupra durității matricei metalice

Încercările privind proporția fazelor dure topite la sudare și efectul lor asupra durității matricei metalice reprezintă un estimator al comportării în exploatare a materialului compozit depus prin sudare și oferă informații privind modificările induse microdurității matricei.

Examinările au urmărit măsurarea durității, deoarece încercări anterioare efectuate de diferite colective de cercetare ale Universității Tehnice din Aachen, Germania (RWTH Aachen) au arătat o tendință evidentă de fragilizare a matricei la îmbogățirea acesteia în carbon.

Încercările de sudare s-au realizat pe o instalație Hättiger (Germania) dotată cu un generator de încărcare de 350 A cu introducere internă a pulberii.

Măsurătorile privind proporția fazelor dure topite la sudare s-au efectuat pe un sistem de analiză a imaginii de tip IBAS 2000 (sistem de operare CPM), aflat în dotarea RWTH Aachen, Germania.

Pentru contrastare în vederea analizei de imagine s-au utilizat probele atacate metalografic cu reactivul MURAKAMI la o mărire de 25x. Măsurătorile privind proporția de carburi au fost efectuate pentru depunerile realizate cu amestecuri având baza pulberile P 40 respectiv W 1.4115, conținând diferite proporții de faze dure. Tabelul 5.1 prezintă rezultatele măsurătorilor efectuate prin analiza imaginii.

Tabelul 5.1. Rezultate privind analiza proporției fazelor dure

| Amestec | Nr. măs. | Val. min. | Val. max. | Media | Medie calcul | σ | Dif. abs. % supr. | Dif. rel. % |
|--------------------|----------|-----------|-----------|-------|--------------|----------|-------------------|-------------|
| P 40 + 25% WSC | 13 | 7,72 | 19,22 | 14,23 | 13,07 | 3,22 | 1,16 | 8,91 |
| P 40 + 40% WSC | 10 | 19,31 | 28,74 | 23,64 | 23,11 | 2,75 | 0,53 | 2,29 |
| P 40 + 55% WSC | 16 | 24,89 | 45,96 | 39,88 | 35,53 | 6,16 | 4,35 | 12,25 |
| P 40 + 65% WSC | 13 | 36,88 | 53,12 | 47,12 | 45,57 | 4,32 | 1,55 | 3,39 |
| W 1.4115 + 25% WSC | 20 | 8,55 | 21,78 | 16,19 | 13,07 | 3,44 | 3,12 | 23,92 |
| W 1.4115 + 40% WSC | 16 | 14,45 | 29,25 | 23,11 | 20,03 | 4,35 | 3,08 | 13,33 |
| W 1.4115 + 55% WSC | 15 | 26,84 | 44,59 | 36,45 | 35,53 | 4,65 | 0,92 | 2,60 |

În evaluarea proporției calculate a fracției volumice a fazelor dure s-a pornit de la valoarea densității fiecărui component al amestecului și a proporției masice în amestecul de pulberi pe baza relației:

$$f_v = \frac{\rho_1}{\rho_2 \left(\frac{1-f_m}{f_m} \right) + \rho_1} \quad (5.1)$$

$$Dif.rel = \frac{Dif.abs.\%supr.}{Media_calcul} \times 100 \quad (5.2)$$

în care: ρ_1 – densitatea pulberilor cu baza fier, $\rho_1=7,8 \text{ g/cm}^3$, ρ_2 – densitatea pulberilor WSC, $\rho_2=17,3 \text{ g/cm}^3$, f_m – fracția masică a carburilor de wolfram, $f_m \in \{25\%, 40\%, 55\%, 65\%\}$.

Elementele statistice prezentate în tabelul 5.1 au la bază histogramele de frecvență obținute prin programul de măsurători pe baza analizei imaginii derulate în cadrul programului experimental - figurile 5.1a – d și 5.2.a – c.

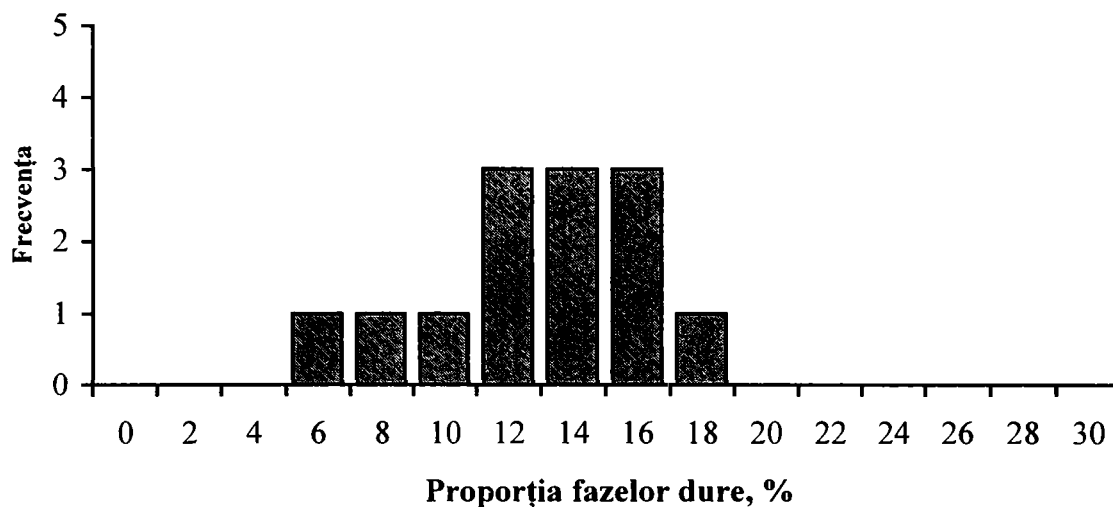


Figura 5.1.a - Histograme de frecvență, amestec P40 + 25% WSC

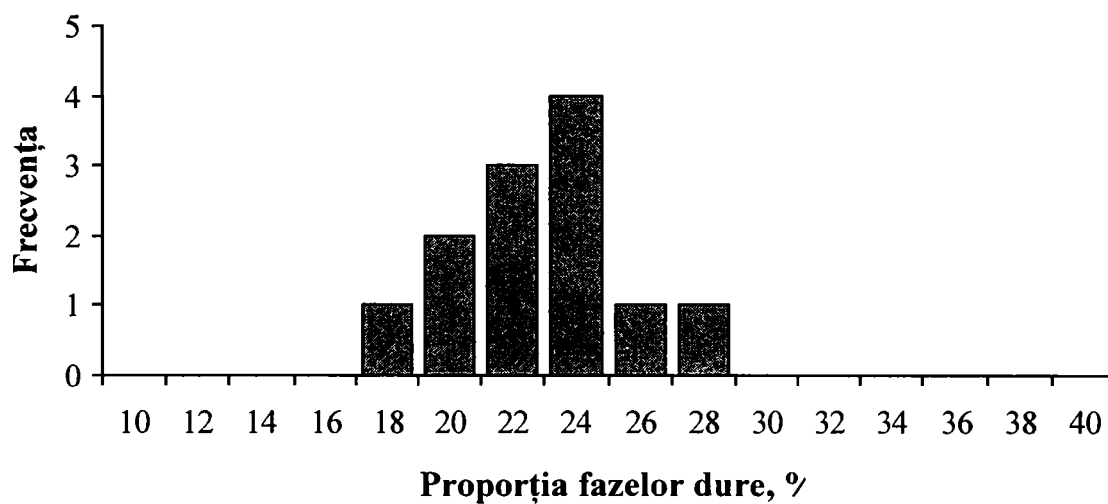


Figura 5.1.b - Histograme de frecvență, amestec P40 + 40% WSC

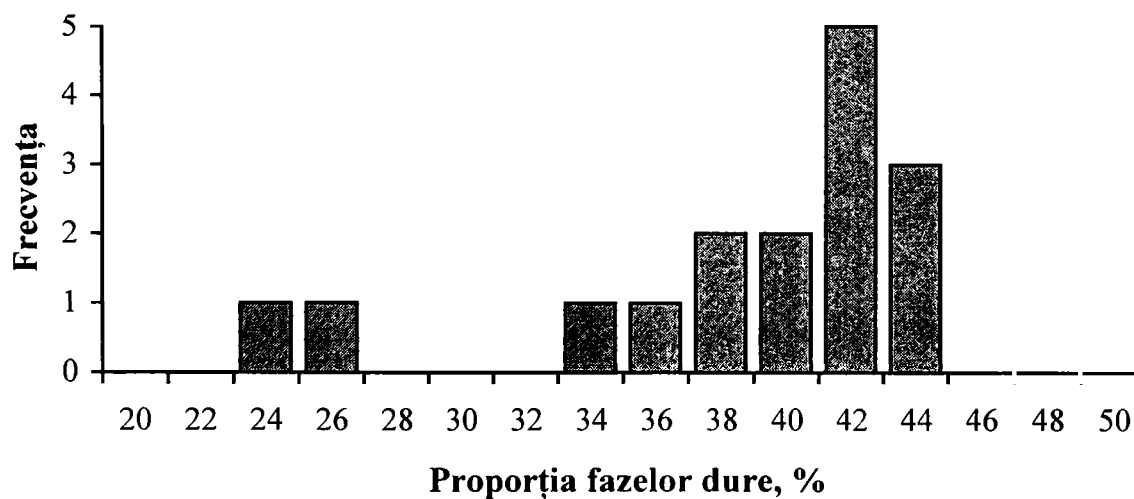


Figura 5.1.c - Histograme de frecvență, amestec P40 + 55% WSC

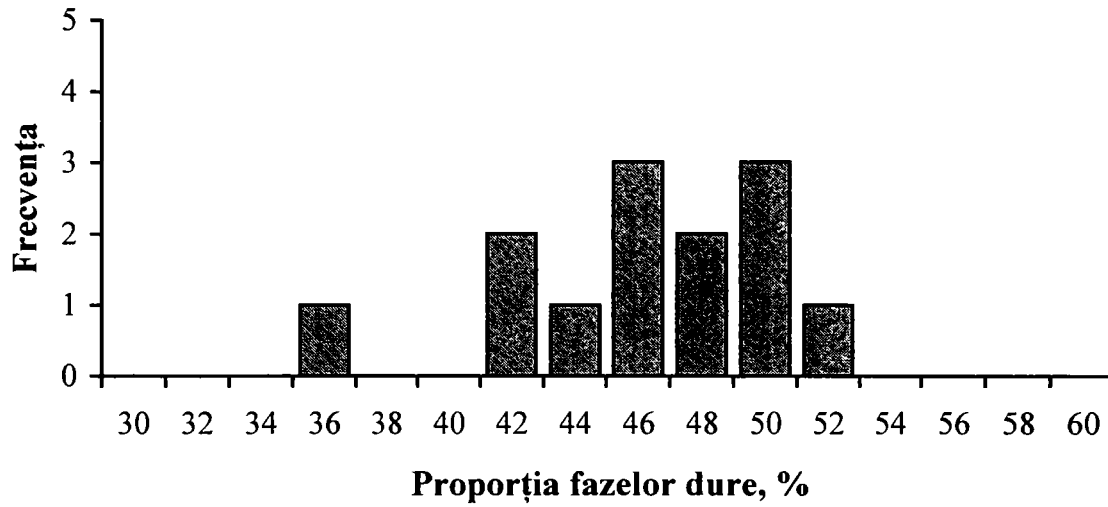


Figura 5.1.d - Histograme de frecvență, amestec P40 + 65% WSC

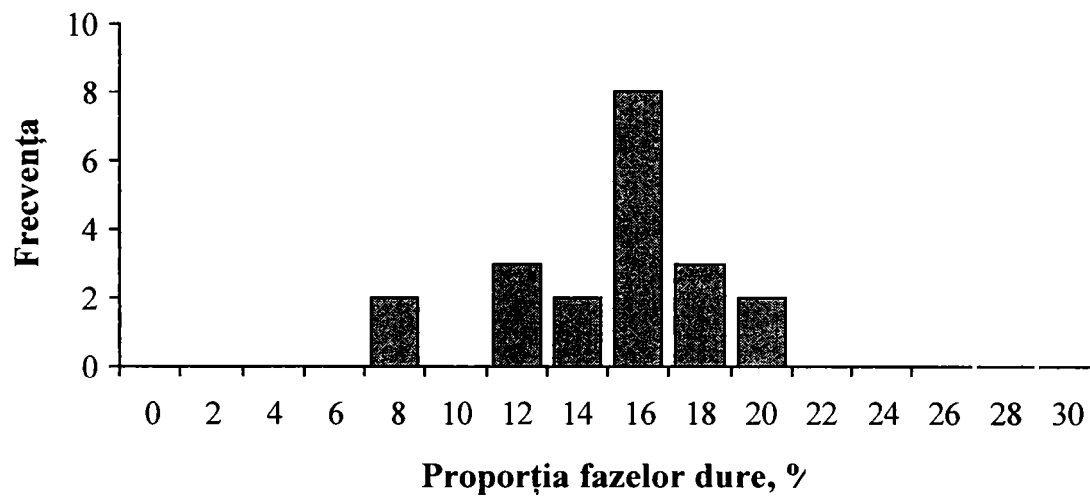


Figura 5.2.a - Histograme de frecvență, amestec W 1.4115 + 25% WSC

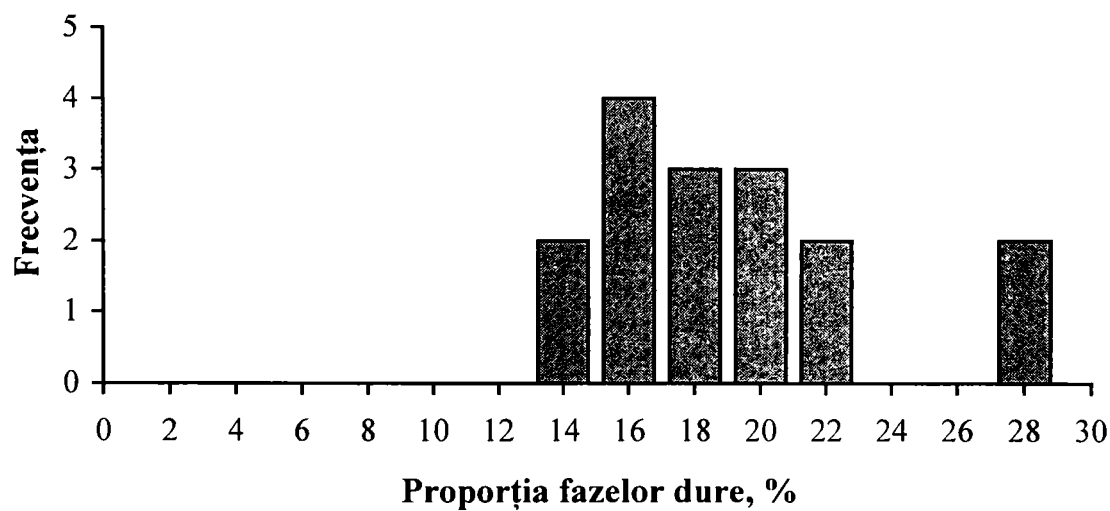


Figura 5.2.b - Histograme de frecvență, amestec W 1.4115 + 40% WSC

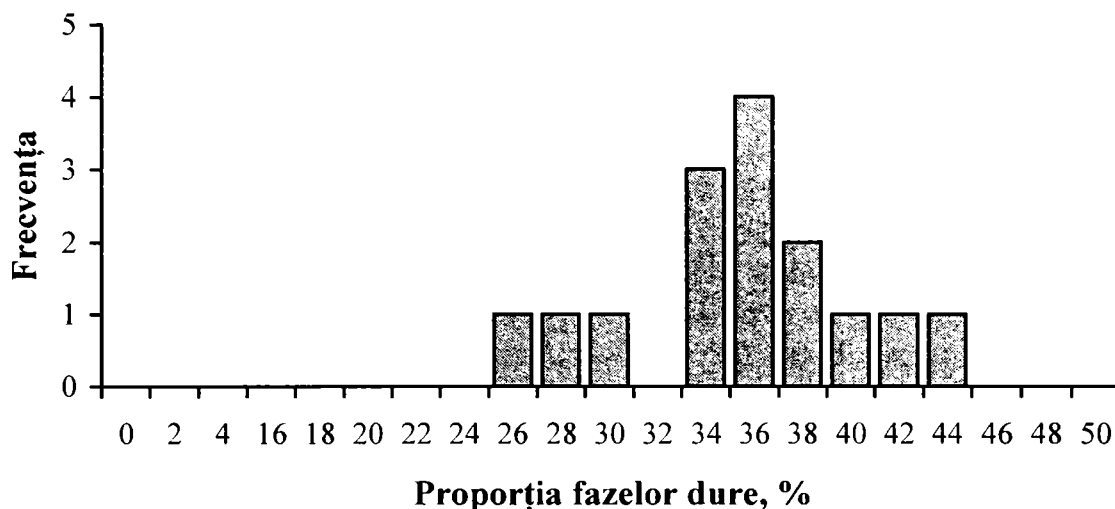


Figura 5.2.c - Histograme de frecvență, amestec W 1.4115 + 55% WSC

După cum se poate observa din analiza datelor prezentate în tabelul 5.1, diferența exprimată în procente de suprafață dintre valorile măsurate și cele calculate este relativ mică și are valori pozitive. Valorile măsurate pot fi însă afectate de erori de măsurare provenind din atacul reactivului Murakami al fazelor dure precipitate provenind din topitură, care măresc artificial proporția fazelor măsurate.

Se poate remarca diferența relativă deosebit de redusă realizată la proporțiile ridicate de faze dure. Această observație are la bază probabil necesitatea reducerii puterii arcului transferat în scopul evitării fisurării depunerilor la proporții ridicate de faze dure, fisurare determinată de fragilizarea matricei metalice prin îmbogățirea în carbon.

Corespunzător acestor rezultate, s-au efectuat măsurători de microduritate asupra matricei, respectiv a fazei metalice din volumul matricei (soluție solidă γ) și a amestecului eutectic care formează matricea metalică. Măsurătorile au fost efectuate cu microsarcini (0,5 gr) folosind un sistem automat din dotarea RWTH Aachen. Tabelul 5.2 redă rezultatele obținute pentru fiecare din componentele decelate după cum urmează:

Tabelul 5.2. Măsurători de microduritate ale matricei depunerilor

| Punct măsurare | Duritatea HV 0,5 | |
|--------------------|------------------|----------|
| | Soluție solidă | Eutectic |
| Amestec pulberi | | |
| P 40 + 25% WSC | 688,25 | |
| P 40 + 40% WSC | 609,33 | 742,25 |
| P 40 + 55% WSC | 683,66 | 853,25 |
| P 40 + 65% WSC | 609,50 | 858,75 |
| W 1.4115 + 25% WSC | 694,00 | |
| W 1.4115 + 40% WSC | 825 | 778,2 |
| W 1.4115 + 55% WSC | 634,8 | 684,8 |
| 316 Lc + 25% WSC | 387,88 | |

| Punct măsurare | Duritatea HV 0,5 | |
|------------------|------------------|----------|
| | Soluție solidă | Eutectic |
| Amestec pulberi | | |
| 316 Lc + 40% WSC | 337,44 | |
| 316 Lc + 55% WSC | 574,5 | |

Rezultatele obținute permit evidențierea efectului adaosului de carburi asupra microdurității matricei metalice, care este o măsură a comportamentului în exploatare al compozitului realizat. Topirea fazelor dure (WSC) trebuie să se regăsească în durificarea depunerilor realizate, respectiv în îmbogățirea în carbon a componentei metalice a matricei și creșterea durității eutecticului ce formează matricea metalică.

5.2.1. Amestecuri cu baze P 40

Din analiza datelor prezentate în tabelul 5.1, reprezentate grafic în figura 5.3 se poate decela o tendință de creștere a durității soluției solide prezente în matricea metalică (componente deschise la culoare, figura 4.7) în funcție de gradul de topire al fazelor dure introduse în amestecul de pulberi P 40 + WSC.

În figura 5.4 s-a reprezentat în mod asemănător dependența dintre proporția fazelor dure topite și durificarea eutecticului din alcătuirea matricei metalice.

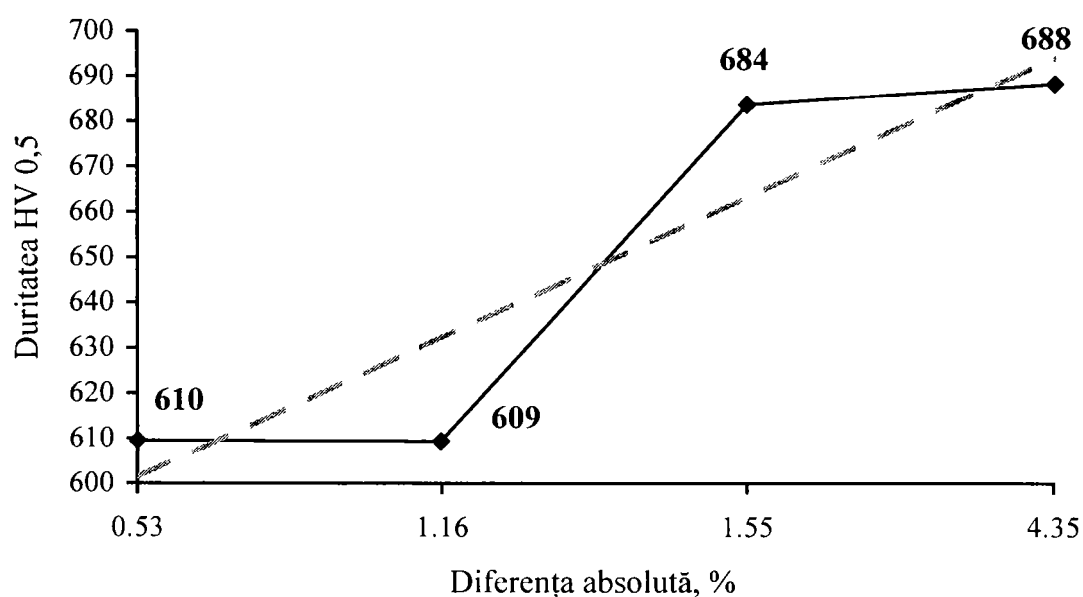


Figura 5.3 - Relația proporție faze dure topite - duritatea soluției solide, P 40 + WSC

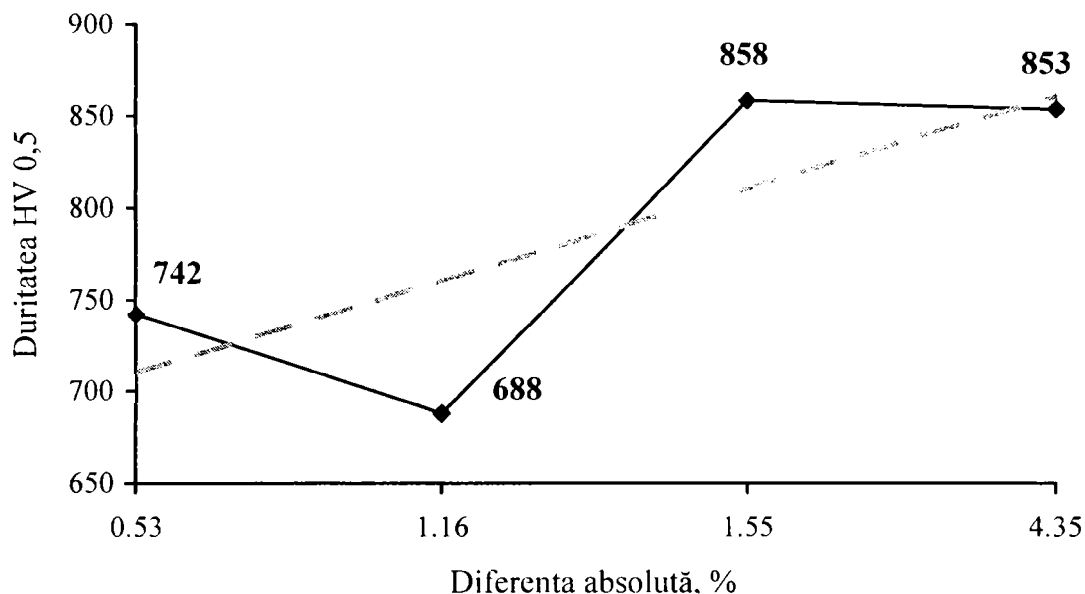


Figura 5.4 - Relația proporție faze dure topite - duritatea eutecticului, P 40 +WSC

Tendința variației durității eutecticului este pozitivă și cunoaște la o primă aproximație același mod de variație ca și duritatea soluției solide. Motivația acestei forme de variație a dependenței se presupune a fi adaptarea parametrilor de regim proporției de carburi din amestec.

Figura 5.5 prezintă în mod sintetic cele două seturi de măsurători, care indică o tendință antagonistă: în timp ce duritatea eutecticului crește cu proporția de faze dure, duritatea soluției solide este cvasiconstantă și are o ușoară tendință decrescătoare.

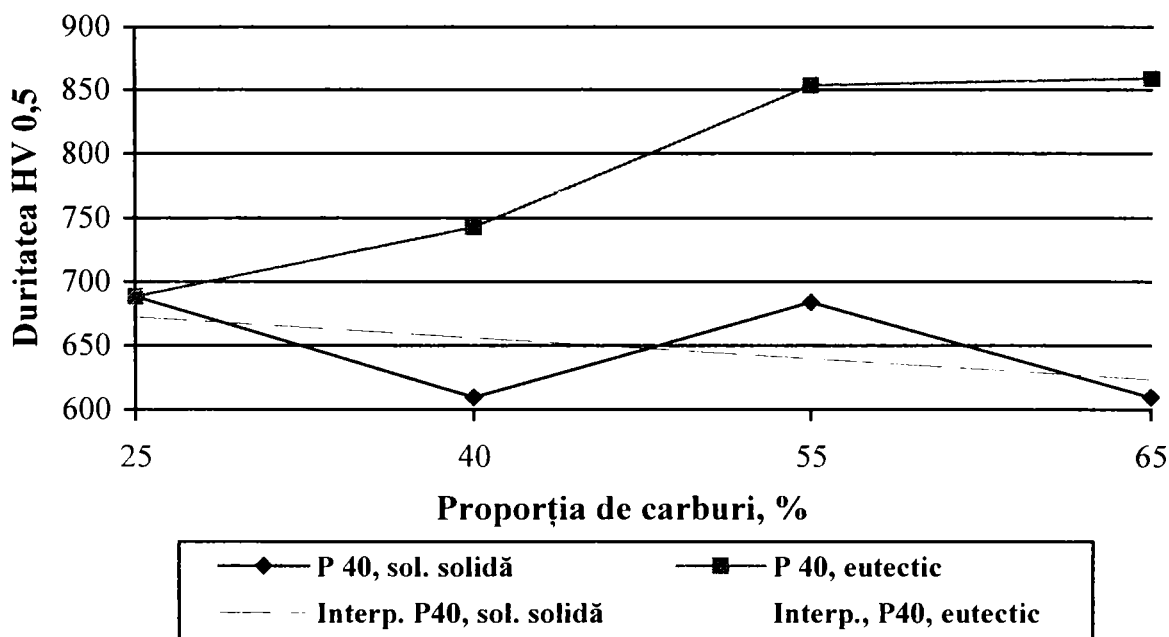


Figura 5.5. Variația microdurității componentelor matricei metalice cu proporția de carburi, stare sudată, P 40

Cu toate că duritatea soluției solide crește - așa cum s-a observat anterior cu proporția fazelor dure topite, creșterea proporției de carburi în amestecul de pulberi nu realizează în mod automat o creștere a durității eutecticului și soluției solide. După cum s-a

menționat, motivația acestui fenomen este posibilă a fi adaptarea parametrilor regimului termic la proporția de carburi.

5.2.2. Depuneri realizate folosind aliaje din clasa W 1.4115 și ANSI 316 Lc.

În ceea ce privește depunerile realizate folosind aliaje din clasa W 1.4115, figurile 5.6 și 5.7 ilustrează variația durității soluției solide și a eutecticului cu proporția de faze dure topite în procesul de încărcare.

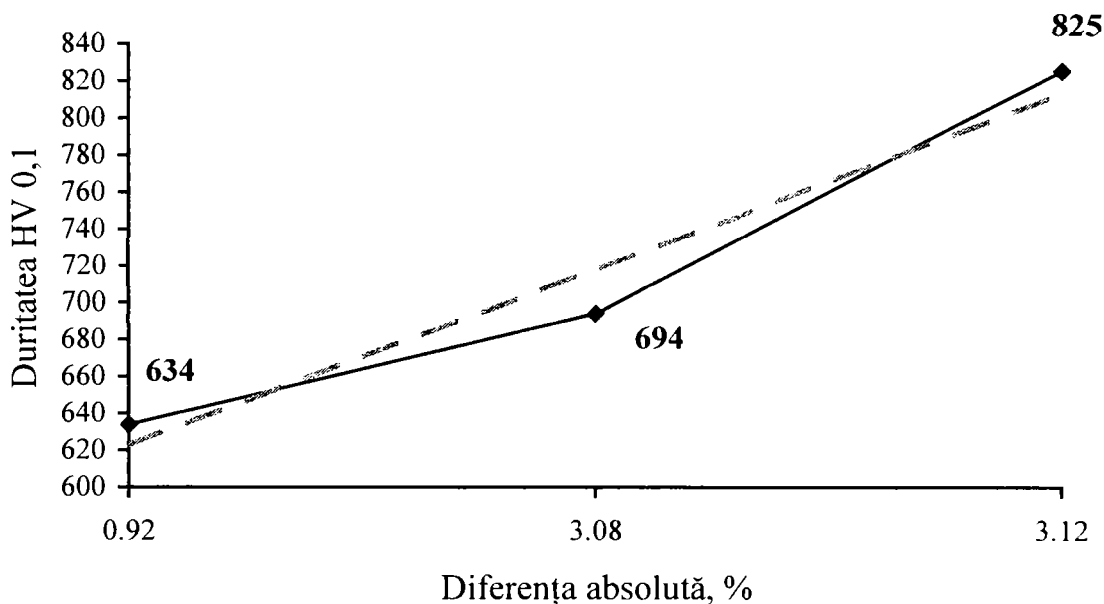


Figura 5.6 - Relația proporție faze dure topite-duritatea soluției solide, W 1.4115+WSC

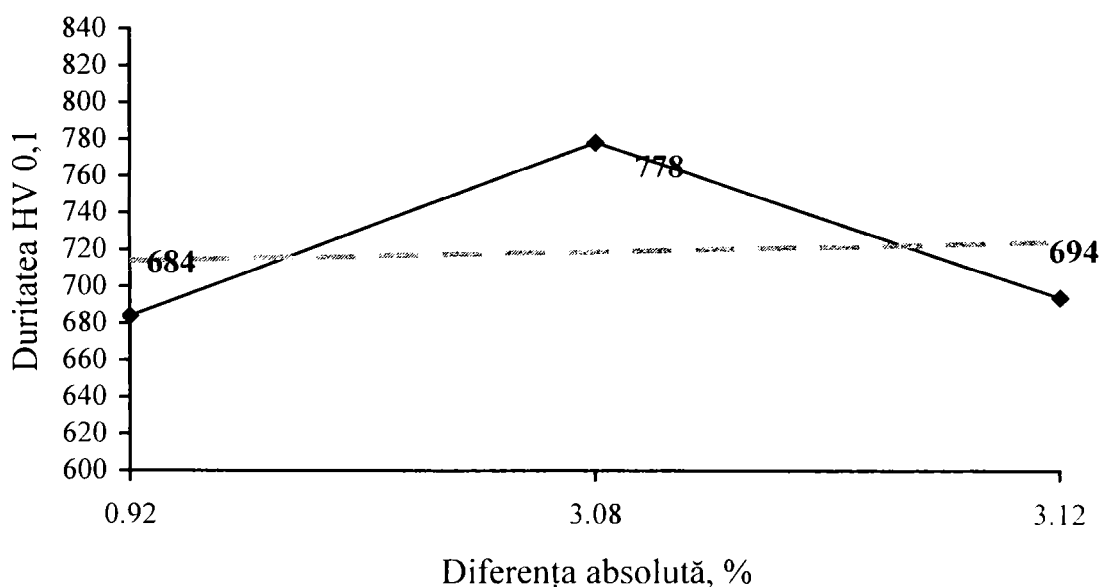


Figura 5.7 - Relația proporție faze dure topite - duritatea eutecticului, W 1.4115+WSC

În timp ce duritatea soluției solide crește continuu cu proporția de faze dure topite pe parcursul procesului de încărcare, nu se poate decela o relație evidentă între proporția fazelor dure topite și duritatea eutecticului.

Alura caracteristică a variației durității soluției solide cu proporția de carburi este aceeași pentru intervalul 25 - 55% WSC atât pentru depunerile realizate folosind aliaj formator de matrice P 40, cât și W 4.4115. Această observație indică faptul că duritatea aparentă a matricei este determinată în primul rând de volumul fazelor dure prezente în matrice provenind din topirea carburilor.

Cu toate că tendința evoluției durității manifestată de pulberea P 40 la îmbogățirea în carbon este evident pozitivă - figura 5.3, 5.4, ea nu este atât de evidentă ca variația durității soluției solide observată la depunerile realizate cu amestecurile având la bază pulberea W 1.4115 - figura 5.6 - unde dependența are un caracter cvasiliniar.

În ceea ce privește duritatea medie a matricei metalice, care integrează duritatea soluției solide și a fazelor dure precipitate primar prin interceptarea lor de către penetratorul aparatului Vickers, s-a procedat și la măsurători de duritate macro, utilizând sarcini de 0,5 și 1 kg.

În acest sens, s-au evaluat atât pulberea P 40, cât și pulberea W 1.4115 și respectiv un aliaj ANSI 316 Lc (X2CrNiMo 19.12). În acest sens, figura 5.8 prezintă valorile măsurate ale microdurității matricei metalice ale depunerilor realizate cu proporții de faze dure variind în intervalul 25% - 55% - aliajul W 1.4115 și ANSI 316 Lc.

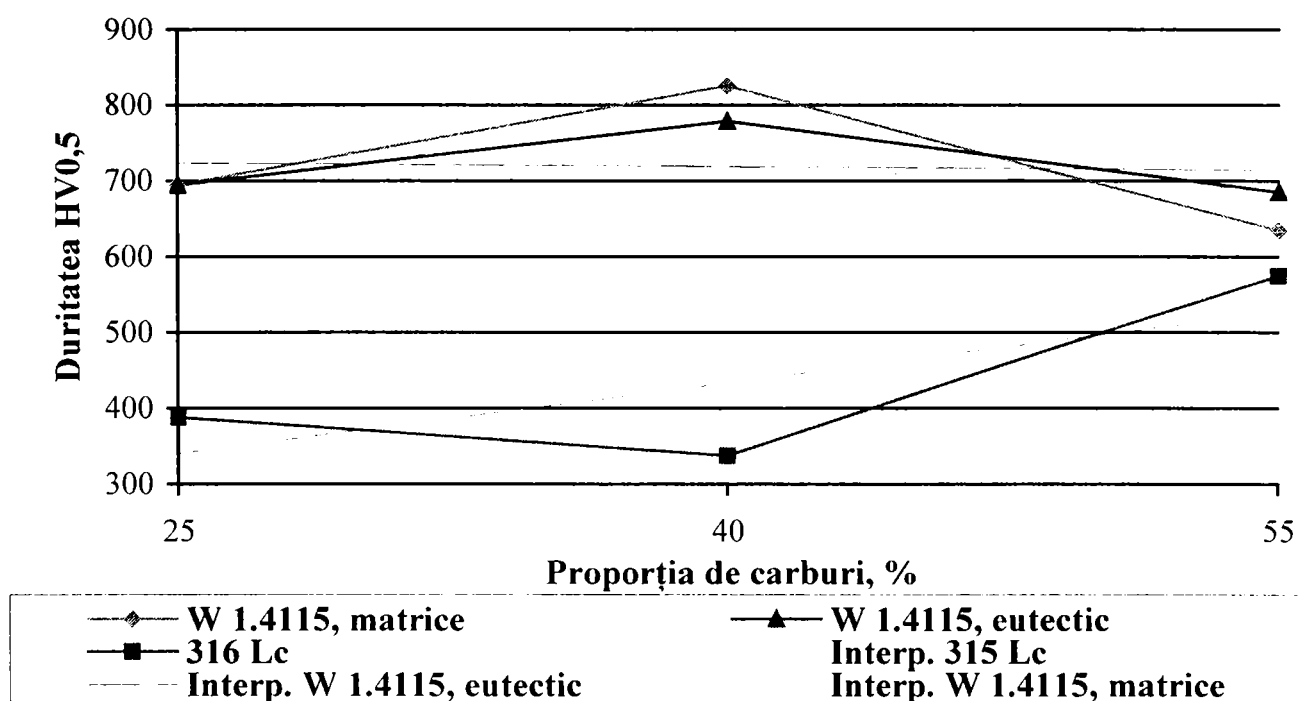


Figura 5.8. Variația microdurității cu proporția de carburi, stare sudată

Se remarcă faptul că nu se poate decela o dependență evidentă între proporția fazelor dure și duritatea matricei metalice. Singurul element care indică o dependență evidentă de proporția de carburi este duritatea eutecticului. Această dependență este determinată de creșterea proporției de faze dure prezente în depunere sub efectul scăderii puterii arcului și probabil de "alunecare" a compoziției eutecticului spre temperaturi mai reduse și proporții mai ridicate de carburi.

De asemenea, în vederea realizării unor analize privind rezistența la uzare s-au efectuat măsurători asupra durității suprafeței depunerilor realizate. Tabelul 5.3 și figura 5.9 prezintă rezultatele măsurătorilor efectuate.

Tabelul 5.3. Duritatea suprafeței, amestecuri cu baza P 40 și W 1.4115

| Aliaj matrice | Proportia de faze dure | | | | |
|---------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 25% | 40% | 55% | 65% |
| P 40 | 400 | 680 | 780 | 840 | 850 |
| W 1.4115 | 450 | 480 | 560 | 720 | |

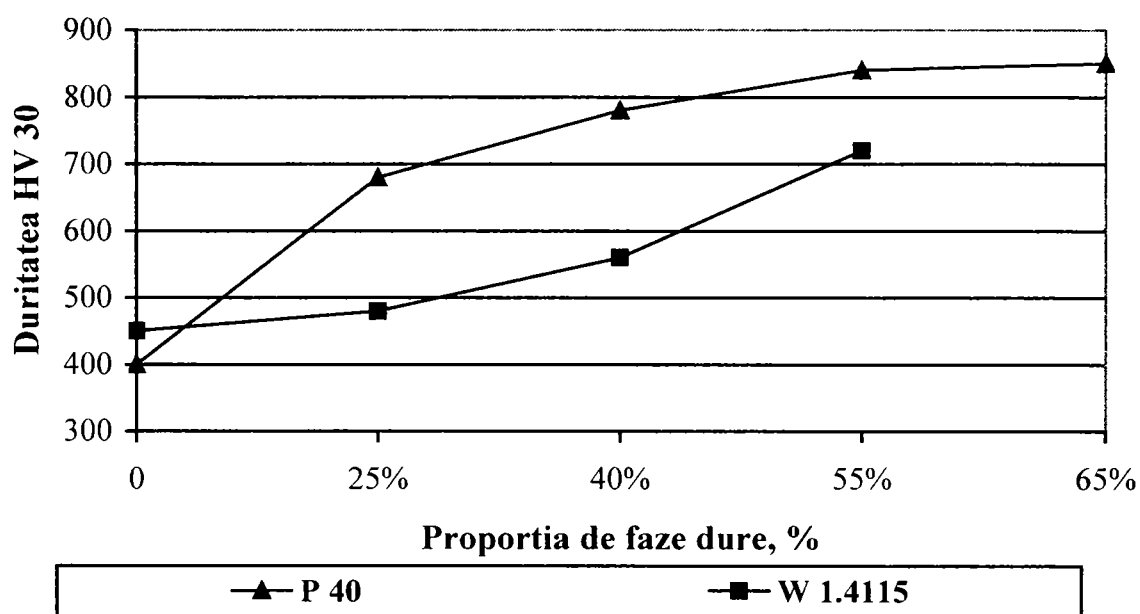


Figura 5.9. Relația proporție faze dure - duritatea suprafeței

Duritatea suprafeței depunerilor realizate cu aliajul formator de matrice P 40 crește continuu cu proporția de carbură de wolfram. Se remarcă totuși o tendință asimptotică de limitare a creșterii durității HV 30 a suprafeței depunerilor la peste 40% WSC.

Cu toate că duritatea depunerilor realizate cu depunerea având ca bază aliajul W 1.4115 pleacă de la valori mai ridicate ale durității, evoluția durității suprafeței depunerilor este corespunzătoare celei a matricei și este probabil determinată de modificările structurale care apar ca rezultat al îmbogățirii matricei în carbon.

5.3. Stabilitatea la "revenire" a straturilor dure depuse prin sudare în plasmă din compozitul oțel inoxidabil - carburi de wolfram.

Stabilitatea termică a materialelor compozite cu matrice metalică armate cu faze dure de tipul carburilor metalice este un element de importanță majoră în predicția comportamentului acestor materiale în condițiile exploatării la temperatură ridicată.

Materialele compozite armate cu carburi sunt susceptibile, la exploatarea la temperaturi ridicate, atât datorită stabilității termice ridicate a carburii de wolfram, cât și datorită

modului de durificare a matricei - la mecanisme de modificare structurală prin precipitare fină din soluție cât și prin faze dure netopite la sudare, cu efect fragilizant.

Încercările prezentate în programul experimental derulat au urmărit evaluarea comportamentului la sensibilizarea termică (tratament termic efectuat în condițiile unor parametri de tratament de tipul revenirii) a unor depuneri realizate cu procedeul PTA prezentat anterior, folosind ca material de adaos amestecul aliaj metalic cu baza fier P 40 cu adaos de carbură de wolfram (carbură topită și sfărâmată mecanic) prezentată anterior.

Utilizând materialele menționate, s-a realizat un set de depuneri utilizând regimuri optimizate cu proporții de fază dură variind în intervalul 5 ÷ 60 WSC (5, 10, 15, 20, 30, 40, 60% WSC). Dintre acestea, depunerile cu proporții de carbură de wolfram de 15, 40 și 60% au fost sensibilizate la temperaturi în intervalul 500 ÷ 900 °C, cu durate ale tratamentului de 1, 5 și 10 ore.

Depunerile obținute (atât în stare sudată cât și revenită) au fost examinate în ceea ce privește duritatea matricei metalice a depunerii (cea mai susceptibilă la modificări sclerometrice semnificative) cât și în ceea ce privește unele aspecte microstructurale.

Importanța durității matricei este relevată de principalul mecanism de uzare al depunerilor realizate folosind faze dure în amestec cu materiale matrice: dezagregarea fazelor dure prin uzarea și extragerea matricei.

Programul experimental a urmărit efectuarea de măsurători sclerometrice și analiza microstructurală, efectuată prin microscopie optică. Ca agent de contrastare s-a utilizat reactivul MURAKAMI la temperatura camerei.

5.3.1. Examinări sclerometrice

Măsurătorile de duritate au urmărit două obiective: determinarea efectului proporției adaosului de carburi și regimului tehnologic de sudare asupra microdurității matricei metalice, respectiv a efectului tratamentului termic de revenire asupra durității matricei.

Variația microdurității matricei pe depunerile în stare sudată corespunzător unei proporții de carburi variabile în intervalul 5 ÷ 60% este prezentată în figura 5.10. Variația microdurității matricei este monotonă în intervalul 5 ÷ 15, respectiv 20 ÷ 50% WSC. Ea este determinată - în condițiile menținerii parametrilor de regim la valori constante - de creșterea proporției căldurii preluate de către fazele dure prin proporția mai ridicată în amestec, ce se reflectă într-o dizolvare mai avansată a acestora.

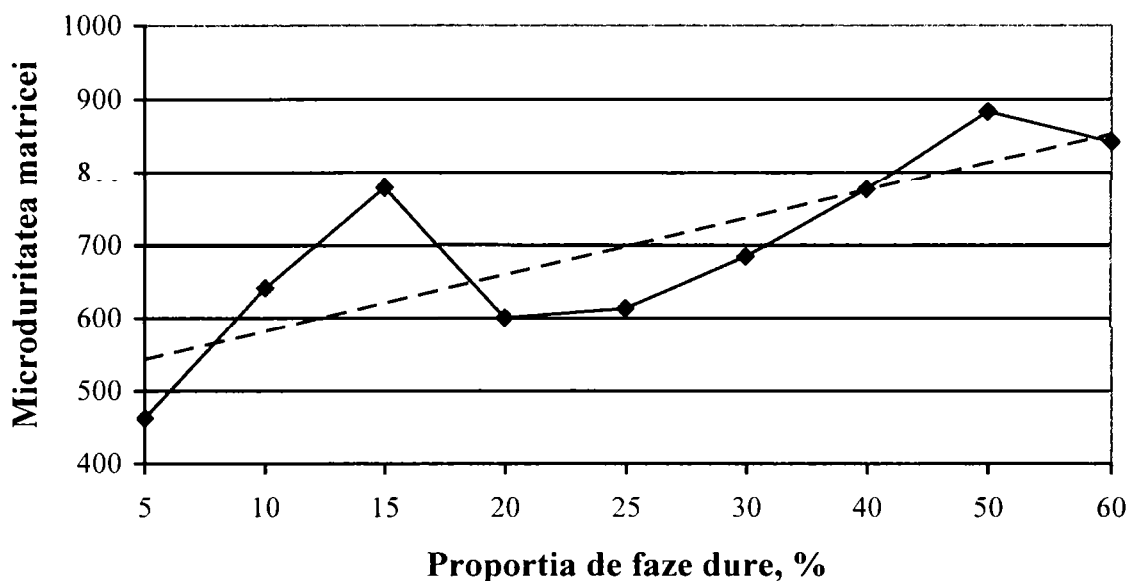


Figura 5.10 Variația microduratei matricei cu proporția de carburi, stare sudată.

Diagrama din figura 5.10 prezintă două salturi (scăderi) evidente.

În timp ce primul salt de duritate (între 15 și 20% WSC) este dificil de explicat cu argumente de natură tehnologică, apariția saltului de duritate ce apare la proporții ridicate de carburi (peste 50%) este determinată de necesitatea reducerii puterii arcului transferat în vederea reducerii și eliminării fenomenelor de fisurare, care are ca și consecință scăderea proporției carburilor topite și reducându-se în consecință proporția de carbon în matrice.

Examinarea microscopică (capitolul 4) a relevat o legătură directă între aspectul microscopic și proporția de carburi introduse în amestec. Este de remarcat creșterea atât a proporției carburilor precipitate în volumul matricei metalice, cât și a extinderii zonei de creștere epitaxială a carburilor din soluție pe limitele particulelor de carburi introduse în amestec și rămase netopite la sudare.

Stabilitatea la revenire a depunerilor s-a evaluat pe baza unui set de tratamente termice de sensibilizare derulate la parametrii prezentați în tabelul 5.4. S-au urmărit două elemente: variația durității matricei, determinată de difuzia elementelor durificatoare dinspre fazele durificatoare și carburile primare și eutectice, precum și modificările microstructurale induse de tratamentul termic de revenire.

Duritatea s-a analizat în funcție de valoarea parametrului de revenire, calculat cu relația clasică:

$$P=T*(20+\log t) \quad (5.3)$$

în care T - temperatura absolută la care s-a efectuat tratamentul termic, iar t - durata tratamentului termic de sensibilizare în ore.

Figura 5.11 prezintă modul de variație al durității în funcție de valoarea parametrului de revenire pentru proporții masice de 25, 40 și 60% carbură de wolfram.

Tabelul 5.4. Valori ale durtății funcție de parametrii tratamentului termic de revenire.

| Temperatura de revenire °C | Timp de revenire h | Parametrul de revenire | Durtatea matricei HV5 Proporția de carburi, % | | |
|----------------------------|--------------------|------------------------|--|-----|-----|
| | | | 25 | 40 | 60 |
| 500 | 1 | 15 640 | 353 | 891 | 880 |
| | 5 | 16 000 | 369 | 792 | 838 |
| | 10 | 16 323 | 679 | 892 | 907 |
| 600 | 1 | 17 460 | 569 | 777 | 766 |
| | 5 | 18 070 | 637 | 821 | 930 |
| | 10 | 18 333 | 562 | 898 | 946 |
| 700 | 1 | 19 460 | 612 | 916 | 925 |
| | 5 | 20 140 | 633 | 732 | 989 |
| | 10 | 20 433 | 601 | 638 | 826 |
| 800 | 1 | 21 460 | 557 | 765 | 880 |
| | 5 | 22 220 | 791 | 805 | 809 |
| | 10 | 22 533 | 610 | 894 | 794 |
| 900 | 1 | 23 460 | 564 | 666 | 836 |
| | 5 | 24 280 | 552 | 780 | 874 |
| | 10 | 24 633 | 511 | 552 | 707 |

Din reprezentarea grafică a datelor centralizate în tabelul 5.4 - figura 5.11 - nu se poate releva o dependență liniară clară a durtății matricei metalice funcție de valoarea parametrului de revenire pentru nici una din proporțiile de carburi.

Spre deosebire însă de variația durtății cu parametrul de revenire, se poate afirma că durtatea matricei metalice (în sensul interceptat de penetratorul Vickers - amestec eutectic de carburi complexe și soluție solidă γ) crește continuu cu creșterea proporției de carburi în amestecul de pulberi, indiferent de valoarea parametrului de revenire. Motivația acestei observații poate fi aceea că proporția de eutectic (alcătuit din carburi și o soluție solidă) în matrice crește cu proporția de carbon dizolvată, respectiv cu proporția de carburi topite provenind din carburile introduse în amestec.

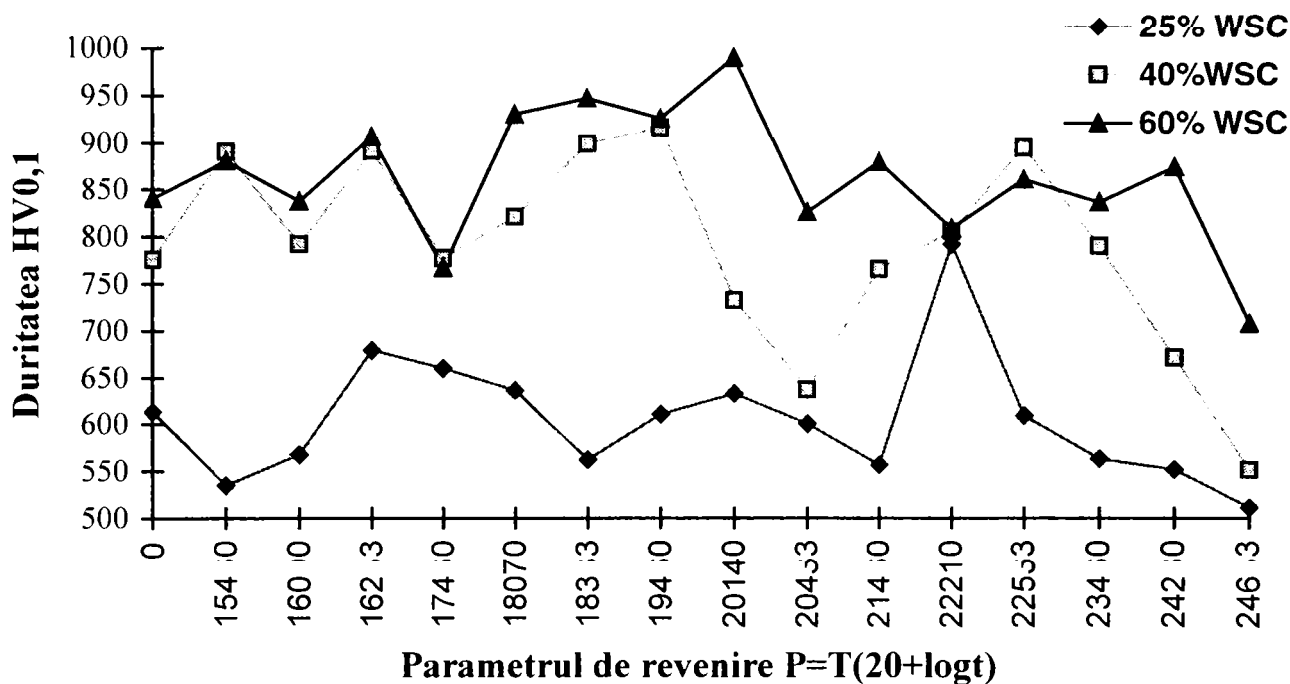


Figura 5.11. Variația microdurității depunerii funcție de valoarea parametrului de revenire

După cum este relevat și de figurile 5.12, 5.13 și 5.14 care reprezintă variația microdurității matricei funcție de proporția de carburi pentru parametri de revenire aleși aleator, gradientul creșterii durității matricei metalice scade (în general) la creșterea proporției de carburi. Principala cauză este probabil legată de creșterea proporției de carbon în matrice la valori ridicate ale proporției de carbură (40, 60%) până în apropierea valorii de saturație încă din momentul sudării, fapt care se reflectă în diferența redusă de duritate.

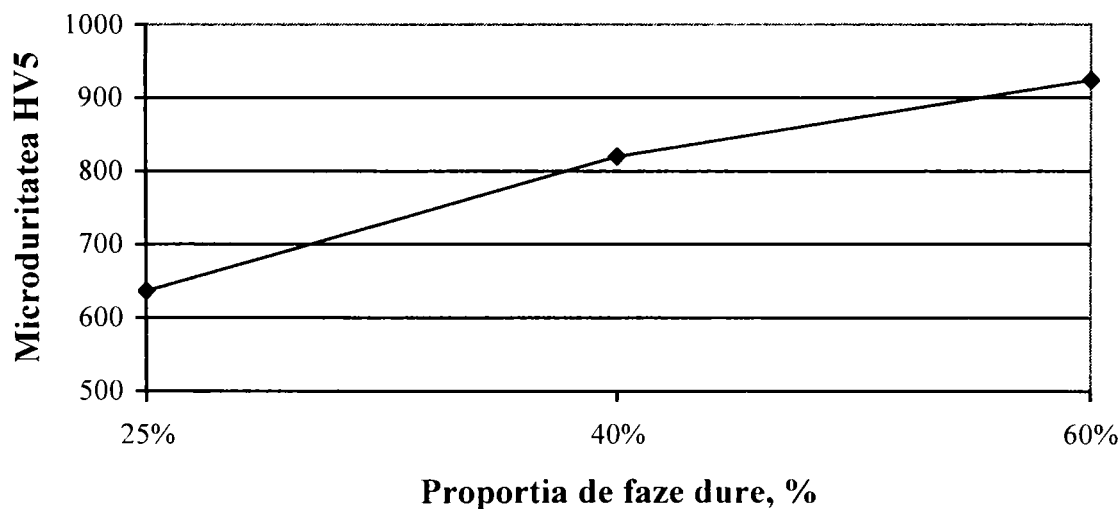
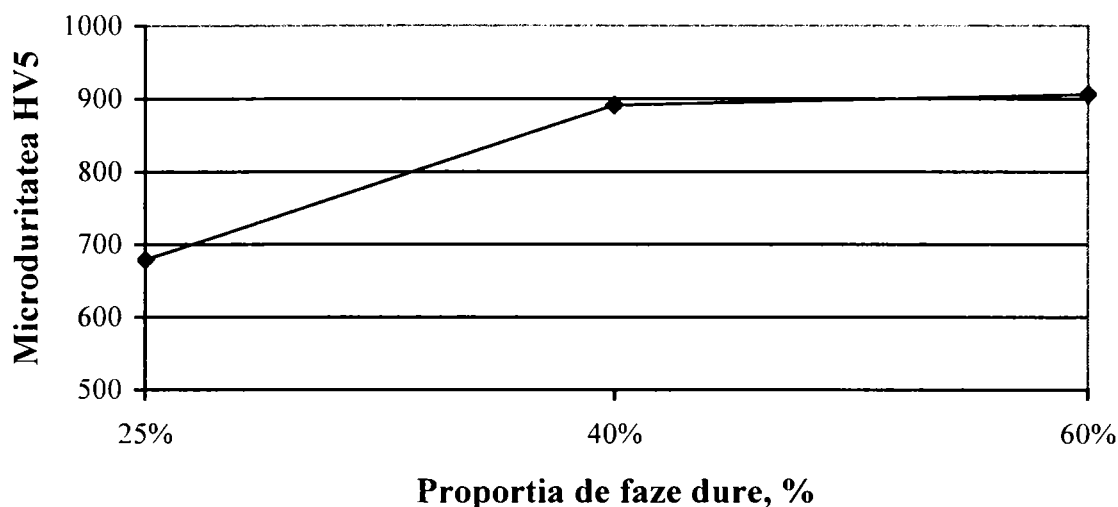
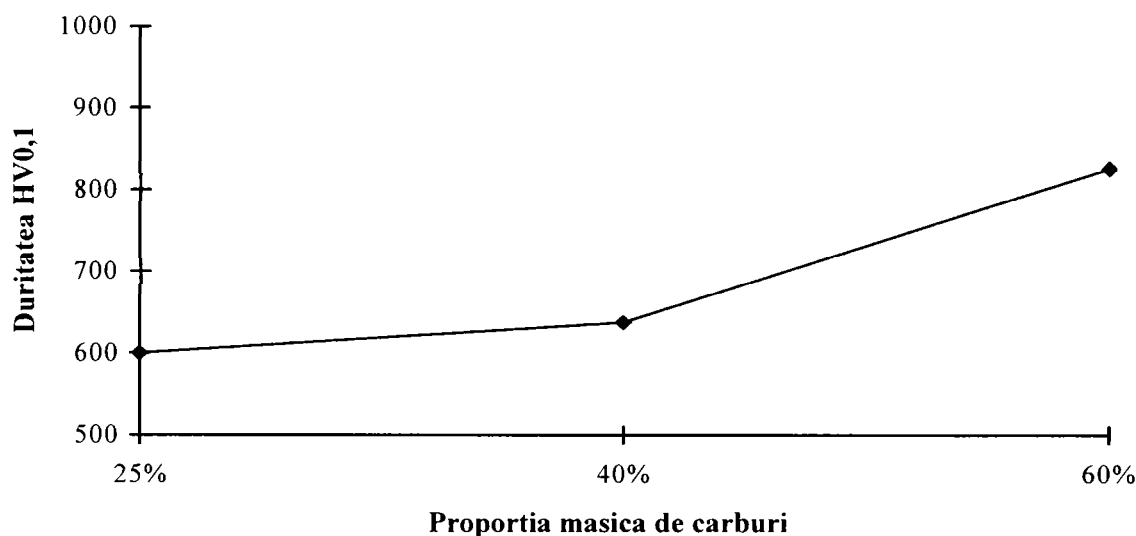


Figura 5.12. t=1h, 500 °C

Figura 5.13. $t = 5 \text{ h}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}$ Figura 5.14. $t=10\text{h}$, $800 \text{ }^\circ\text{C}$

În vederea exprimării analitice a dependenței durității matricei de proporția de carburi și condițiile de revenire s-a încercat evaluarea suprafeței de răspuns sub forma unei funcții polinomiale de grad 3, cu luarea în considerare a efectelor combinate ale variabilelor considerate independente (proporție de carburi, temperatura de sensibilizare, timpul de sensibilizare (figura 5.15)

Nu s-a reușit determinarea unei funcții de răspuns cu grad maxim 3 care să aproximeze cu o confidență de peste 75% suprafața de răspuns. Creșterea gradului funcției de regresie nu mărește semnificativ confidența regresiei. Creșterea gradului ecuației de regresie de la 2 la 3 duce la o creștere a confidenței r^2 cu 2%, iar creșterea în continuare mărește confidența regresiei cu sub 1%.

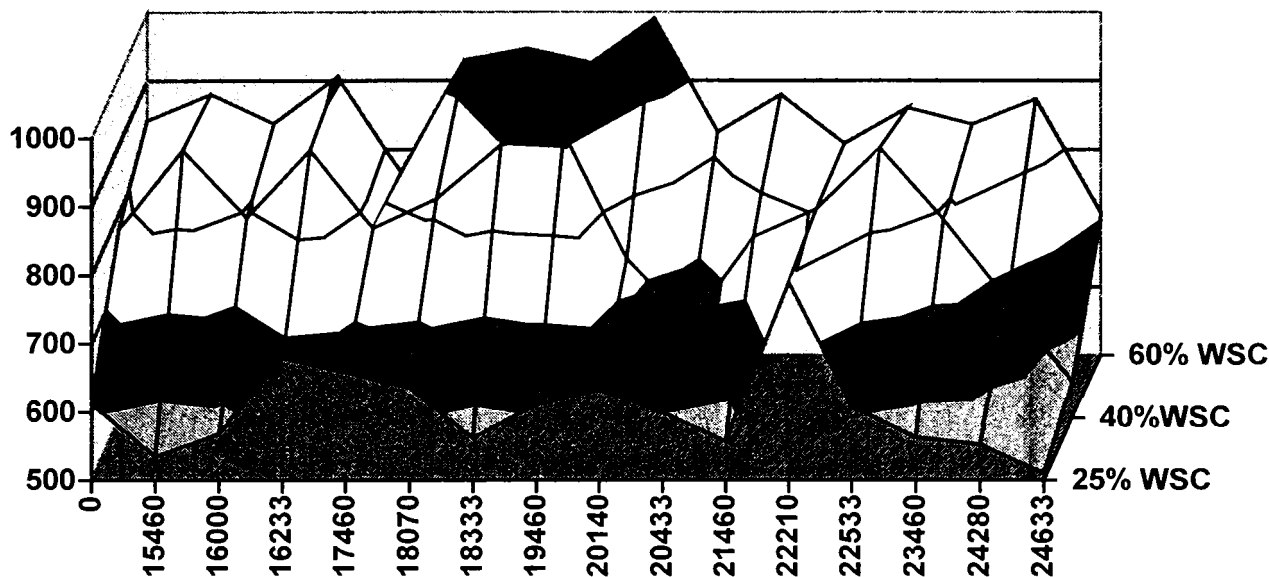


Figura 5.15. Suprafața de răspuns duritate = $f(P, \%WSC)$

Se pot remarca caracteristici generale care descriu fenomenele metalurgice ce au loc:

- tendința de creștere a durității matricei depunerilor cu creșterea proporției de carburi, pentru majoritatea valorilor parametrului de revenire
- nu există o comportare caracteristică la variația valorii parametrului de revenire

5.4. Analiza factorială a efectului principalilor parametri tehnologici de regim asupra durității depunerilor

Deoarece numărul de factori tehnologici de influență care controlează calitatea depunerilor realizate prin procedeul PTA este deosebit de ridicat iar efectele complexe, programul experimental vizând evaluarea efectului parametrilor de material (proporția de faze dure) și de regim asupra durității depunerilor s-a recurs, în vederea simplificării experimentului, la experimentul factorial redus.

5.4.1. Programarea experimentului

În practica curentă, efectele interdependente ale parametrilor de sudare sunt rare, iar efectul lor este redus sau neglijabil. Această constatare permite înlocuirea interdependențelor de parametri cu alți parametri primari de investigat, înlocuire ce reduce semnificativ numărul de încercări.

În acest mod, s-a putut realiza un experiment care să indice dependența durtății straturilor depuse prin procedeul PTA ca funcție liniară a mai multor parametri fundamentali în derularea proceselor și fenomenelor ce au loc la încărcarea prin sudare prin procedeul PTA - tabelul 5.5. Parametrii tehnologici au fost modificați în limitele uzuale ale echipamentului pe care s-a derulat majoritatea experimentelor de încărcare prin sudare - instalația IPP 350, dezvoltată la ISIM Timișoara.

Valoarea durtății a fost determinată prin măsurători sclerometrice. S-au ridicat probleme deosebite la depunerile cu proporții ridicate de carburi, unde grosimea depunerii și precizia metodei sunt reduse.

Tabelul 5.5. Planificarea experimentului factorial parțial și valori determinate ale durtății.

| Nr. experim. | Continut WC, % | I_{pl} A | Q_{pl} l/h | v_s cm/min | Q_{pulp} cm ³ /min | Durit. matrice HV 0,2 | Durit. supraf. HV 30 |
|--------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 25 | 180 | 130 | 6 | 18 | 449,0 | 593,3 |
| 2 | 25 | 160 | 130 | 8,5 | 10 | 435,0 | 672,3 |
| 3 | 25 | 180 | 105 | 6 | 10 | 477,5 | 570,2 |
| 4 | 25 | 160 | 105 | 8,5 | 18 | 440,7 | 646,3 |
| 5 | 65 | 160 | 105 | 6 | 18 | 721,4 | 716,3 |
| 6 | 65 | 160 | 130 | 6 | 10 | 619,0 | 992,0 |
| 7 | 65 | 180 | 130 | 8,5 | 10 | 771,0 | 913,0 |
| 8 | 65 | 180 | 105 | 8,5 | 18 | 935,0 | 1060,8 |

5.4.2. Rezultate

Pe baza ecuației (3.6) s-au pus în evidență o serie de influențe ale parametrilor regimului de sudare asupra mecanismului de durificare a straturilor.

Astfel, s-au determinat parametrii ecuației de regresie ce descrie în mod liniar dependența funcției obiectiv "microdurtate a matricei" în funcție de parametrii de proces și material independenți avuți în vedere la derularea experimentului factorial și indicați în tabelul 5.5. Tabelul 5.6 indică valorile acestor parametri de regresie.

Tabelul 5.6: Valori ale parametrilor de regresie determinați.

| Parametru | Valoare coef. Regresie, durtatea matricei | Valoare coef. regresie, durtatea depunerii |
|------------------------|---|--|
| Proporția de carburi | 6,55 | 4,73 |
| Curent sudare I_s | 5,21 | 1,38 |
| Debit gaz plasmagen | -161,9 | -276,25 |
| Viteza de sudare V_s | 0,05 | 64,17 |

| Parametru | Valoare coef. Regresie, duritatea matricei | Valoare coef. regresie, duritatea depunerii |
|--------------------------|--|---|
| Debit pulbere Q_{pulb} | -48,95 | -30,72 |
| Termen liber | 64,18 | 603,19 |

Pe baza acestor valori, în figurile 5.16 a - h se prezintă efectul proporției de carburi asupra microdurității depunerilor așa cum este el determinat de valoarea coeficienților de regresie.

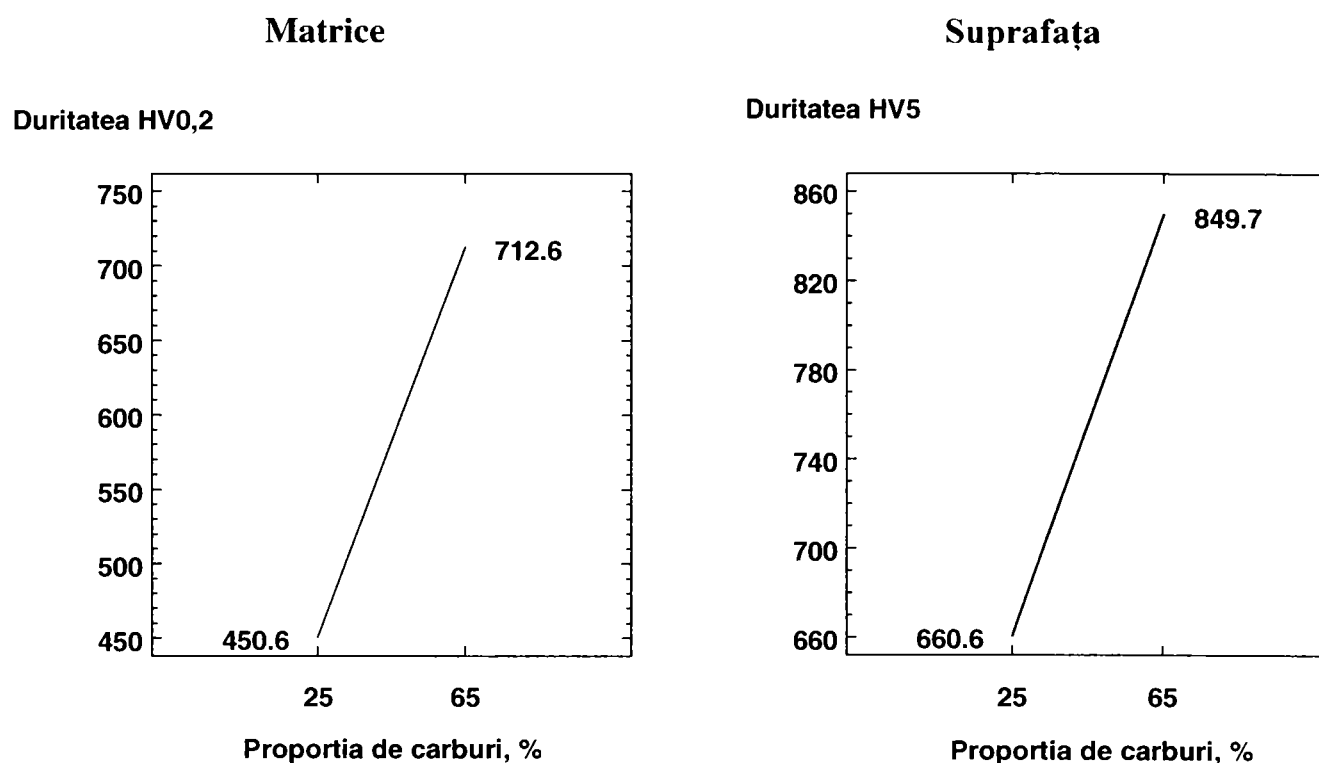


Figura 5.16.a Efectul proporției de carburi,

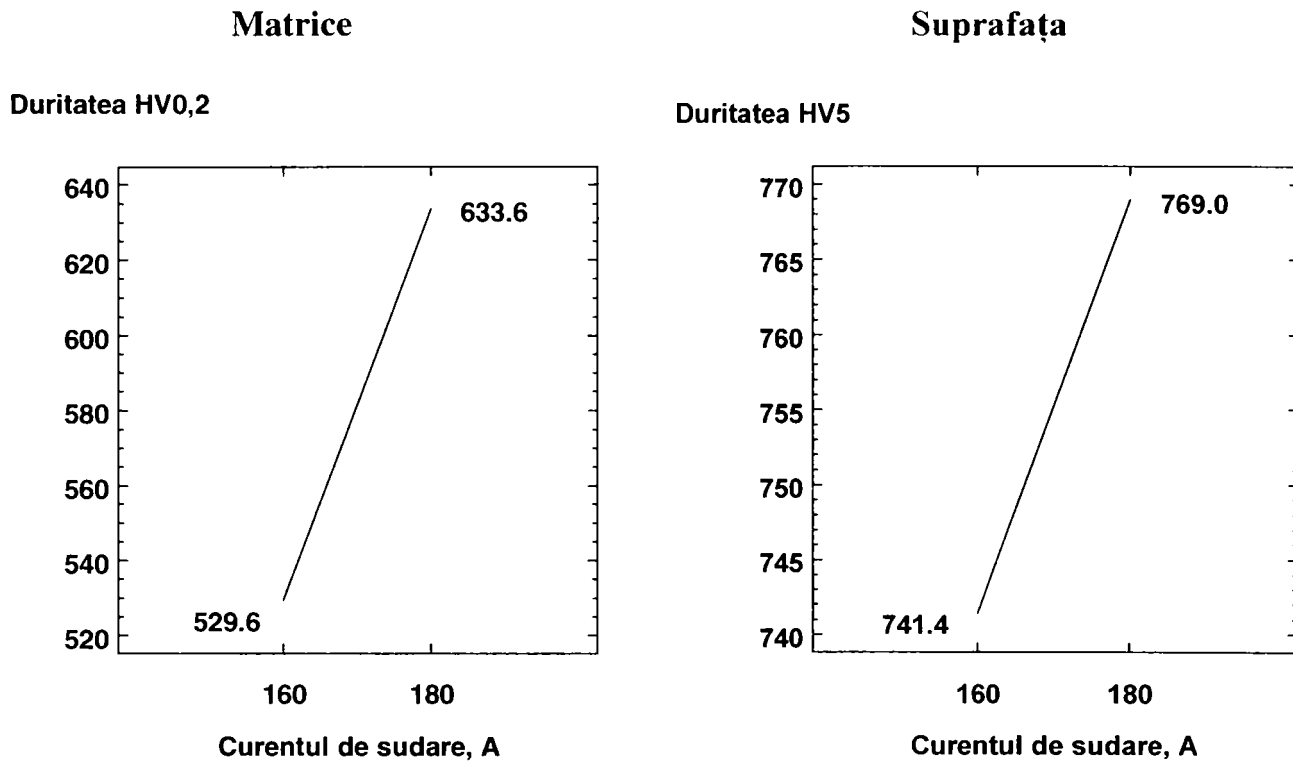


Figura 5.16.b Efectul curentului de sudare

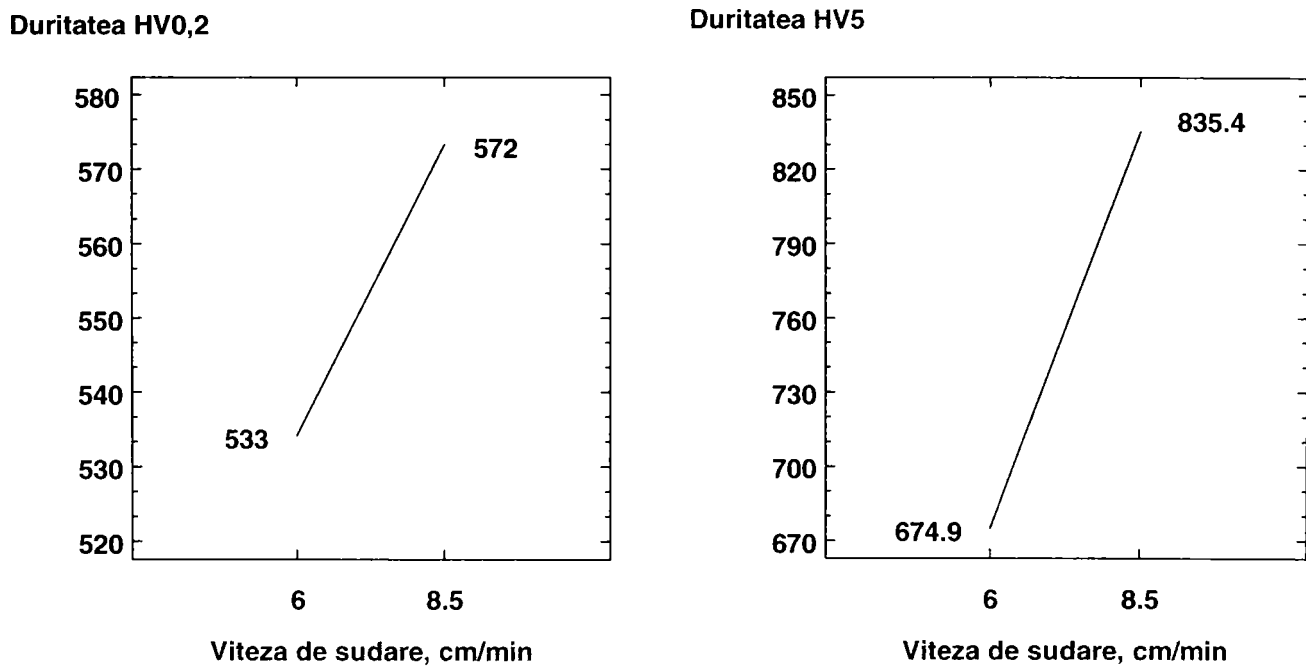


Figura 5.16.c. Efectul vitezei de sudare

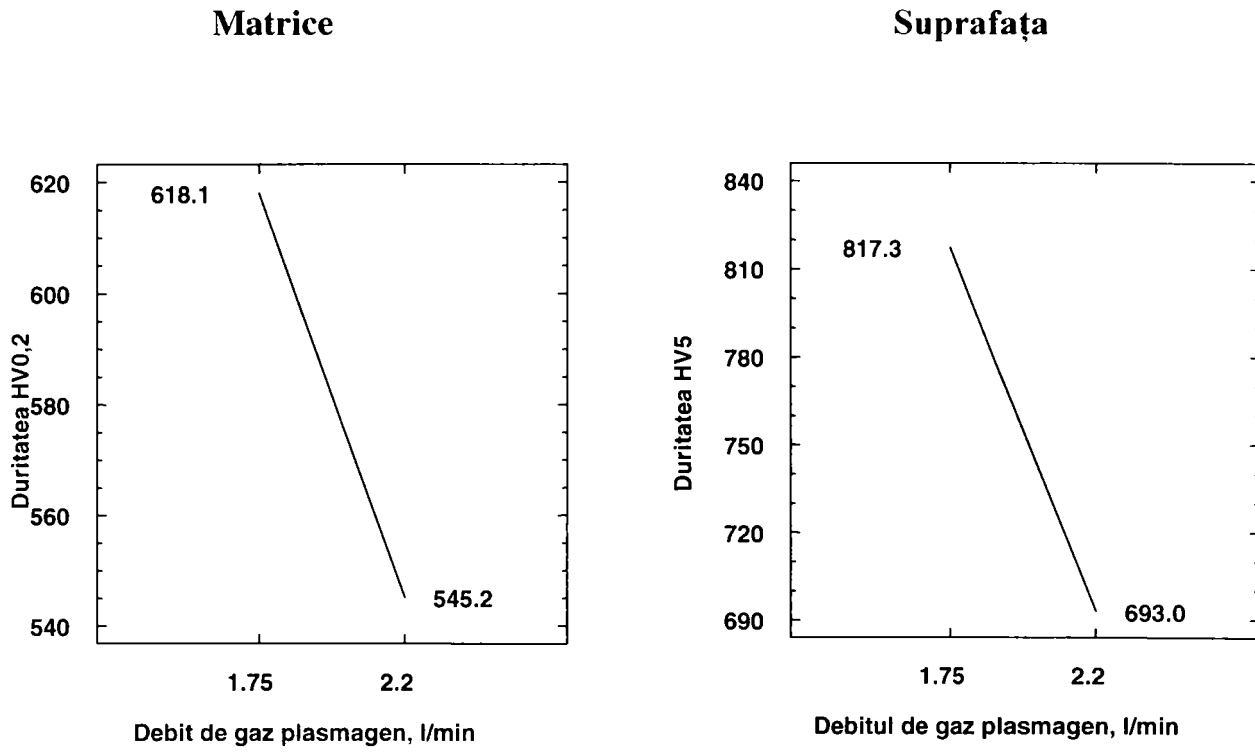


Figura 5.16.c. Efectul debitului gazului plasmagen

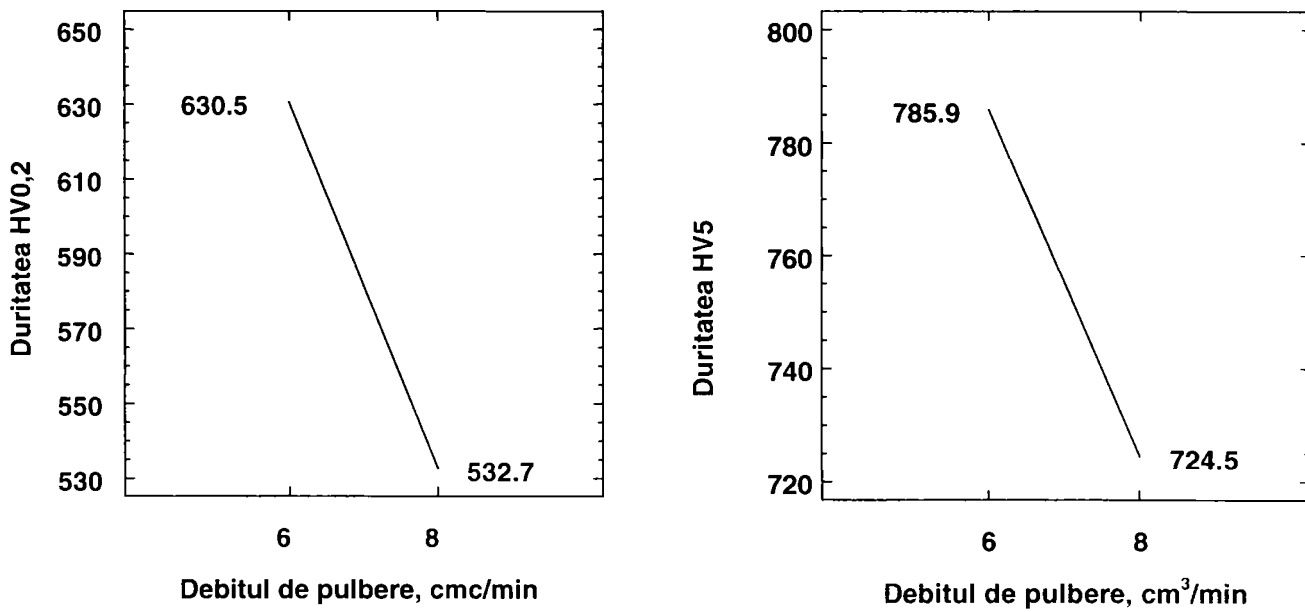


Figura 5.16.d. Efectul debitului de pulbere

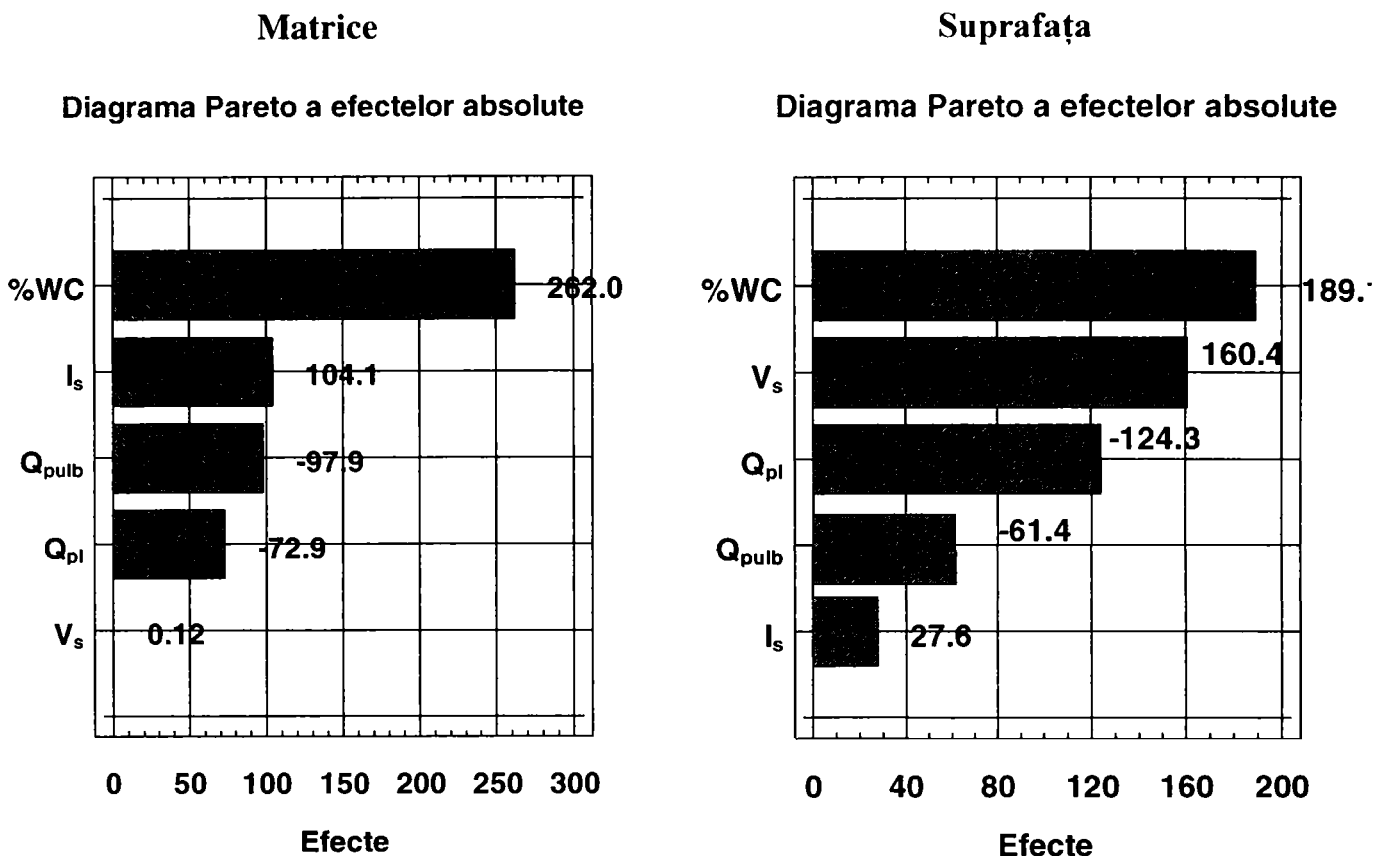


Figura 5.16.e. Efecte globale ale factorilor de influență

Așa cum o prezintă diagramele din figura 5.16 a ÷ e, factorul principal de influență asupra microdurității matricei metalice și durității suprafeței depunerii este proporția de carburi în amestecul de pulberi.

Cu toate acestea, în ceea ce privește microduritatea matricei efectul proporției de faze dure este cu aproximativ 250% mai mare decât efectul următorului parametru, curentul de sudare I_s , în timp ce ceilalți factori de influență semnificativi (Q_{pl} , Q_{pulb}) au o valoare apropiată în modul.

În ceea ce privește duritatea suprafeței depunerilor, diferența dintre primii trei factori de influență: proporția fazelor dure, curentul de sudare și debitul de gaz plasmagen nu este excesivă.

Este de remarcat prezența debitului de gaz de transport în rândul factorilor de influență principali ai microdurității matricei și durității suprafeței depunerilor. Cauza acestui efect este efectuarea probelor de sudare pe o instalație utilizând un generator cu introducere internă a pulberii, la care are loc pe de o parte însumarea valorii debitului gazului de transport cu debitul gazului plasmagen (cele două gaze parcurg împreună parțial orificiul duzei) cât și prezenței hidrogenului în gazul de transport, care are ca efect îmbunătățirea transferului termic dintre arcul de plasmă transferat și pulberi prin recombinația atomilor de hidrogen cu formarea moleculei H_2 .

Din analiza rezultatelor prezentate în tabelul 5.6 se poate observa că semnul efectului principalilor parametri se păstrează la analiza micro- și macrodurității, însă intensitatea efectului se schimbă radical.

Astfel, viteza de sudare este parametrul cu al doilea efect pozitiv asupra durității suprafeței depunerii, fenomen motivat de scăderea duratei de viață a topiturii și limitarea segregării fazelor dure pe grosimea depunerii.

Cu toate că creșterea debitului de gaz plasmagen și de transport au ca efect creșterea puterii arcului, ele au un efect de descreștere a valorilor măsurate ale depunerii. De aceea, efectul cu sens negativ al gazelor tehnologice este dificil de explicat.

În ceea ce privește valorile curentului de sudare, creșterea valorii acestuia se reflectă în extinderea volumului plamei termice parcurse de pulberi și ridicarea temperaturii acesteia (temperatura arcului de plasmă variază după o lege de tipul $T=k \cdot I_s^4$), fenomen reflectat de o topire mai avansată a fazelor dure introduse în arcul transferat.

5.4.3. Discuții privind relația parametru tehnologic - duritate a matricei:

Creșterea durității

- **Proporția de carburi:** este elementul cu cel mai pronunțat efect pozitiv și are ca bază atât îmbogățirea în carbon a matricei metalice și creșterea proporției de faze precipitate din soluție și topitură (duritatea matricei), cât și mărirea densității fazelor dure de pe suprafața depunerii datorate creșterii densității (particule pe unitatea de suprafață) fazelor dure, ce se regăsește în creșterea probabilității (frecvenței) de interceptare a acestora de către penetratorul durimetrului
- **Curentul de sudare:** mărește atât duritatea matricei metalice cât și a amestecului depus, ca efect al creșterii duratei de viață a topiturii metalice, care se regăsește în creșterea gradului de topire al fazelor dure introduse în amestecul de pulberi și deci durificarea semnificativă a matricei
- **Viteza de sudare:** creșterea vitezei de sudare scade gradul de segregare al amestecului de faze dure făcând ca duritatea medie a depunerii la suprafață să scadă la o valoare calculabilă teoretic ca medie ponderată a durității matricei și fazelor dure

Scăderea durității

- **Debitul de pulbere:** creșterea debitului de pulbere în condițiile neadaptării condițiilor termice ale regimului de sudare duce în mod inevitabil la răcirea topiturii și în consecință, la scăderea intensității topirii fazelor dure prezente în amestecul de pulberi;
- **Debitul de gaz plasmagen:** creșterea debitului gazului plasmagen are ca efect imediat creșterea temperaturii arcului transferat. Cu toate acestea, deoarece sistemul utilizat a fost cu introducere internă a pulberilor, timpul de staționare al pulberilor în arcul transferat cunoaște o scădere semnificativă. fapt ce are ca urmare un grad de topire al fazelor dure mai redus, respectiv o duritate mai scăzută a matricei depunerilor;
- **Debitul de gaz de transport:** Deoarece generatorul testat a fost de tipul cu introducere internă a pulberii, pe parcursul comun al gazului plasmagen și de transport debitul celor două gaze se însumează; de aceea, creșterea debitului gazului

de transport are ca efect imediat scăderea timpului de staționare al pulberilor în arc și duce la un grad de topire al fazelor dure mai redus, respectiv o duritate mai scăzută a matricei depunerilor.

5.5. Concluzii:

- a. Duritatea soluției solide și a eutecticului la depunerile realizate cu pulberea P 40 și W 1.4115 în adaos cu faze dure de tipul carburii de wolfram topite și sfărâmate crește cu proporția de faze dure în amestecul de pulberi topite pe parcursul procesului de sudare;
- b. Duritatea suprafeței depunerilor (HV 30) crește cu proporția fazelor dure introduse în amestecul de pulberi;
- c. Independent de aliajul formator de matrice cu baza fier, la creșterea proporției de carbură apare un fenomen de creștere cvasi-continuă a microdurității matricei metalice
- d. Indiferent de valoarea parametrului de revenire la sensibilizarea depunerilor realizate cu aliajul formator de matrice P 40, duritatea matricei metalice crește cu proporția de faze dure în amestecul de pulberi;
- e. Principalii factori de influență ai durității la procedeul PTA sunt proporția de carburi, curentul de sudare, debitul de pulbere și debitul de gaz plasmagen;
- f. Efectul vitezei de sudare este puțin semnificativ;
- g. Parametrii cu efect pozitiv asupra durității sunt curentul de sudare și proporția de carburi;
- h. Parametrii cu efect negativ asupra durității sunt debitul de gaz plasmagen și debitul de pulbere;
- i. Pentru fiecare material dur destinat încărcării este necesară particularizarea experimentului, pentru evaluarea efectului diluției asupra durității depunerii.

CAPITOLUL 6. INVESTIGAȚII ASUPRA STRUCTURII FINE A DEPUNERILOR

6.1. Introducere

Deoarece atât în cursul procesului de sudare cât și în timpul exploatareii de durată la temperaturi ridicate în microstructura stratului depus apar faze noi, care pot influența proprietățile acestuia, s-a recurs la derularea unor investigații prin difracție RX și la microsonda electronică pe depuneri realizate folosind aliajul formator de matrice P 40 și adaos de carbură de wolfram. Programul experimental a avut în vedere depuneri realizate folosind amestecul P 40 + 40% WSC atât în stare sudată cât și în stare de sensibilizare prin tratament termic ("revenire").

După cum s-a concluzionat în capitolul 2, principalele faze ce apar în afara domeniilor de solubilitate nelimitată a elementelor, sunt atât carburile "clasice" de tip MC, M_3C , M_7C_3 , $M_{12}C$ (fără domeniu de omogenitate) și $M_{23}C_7$, dar și carburi mai puțin obișnuite cum este cea instabilă formată în sistemul Fe-W-C de tip M_4C , cu compoziția chimică $(FeW_3)C$. Prezența carburilor de tip M_6C cu compoziția Fe_2W_4C este însă o controversă, fiind contestată de alți autori.

Diagrama W-Cr-C prezintă în secțiunea realizată în planul WC-Cr₃C₂ o carbură tetragonală complexă, determinată de dizolvarea carburii de wolfram în carburile Cr₃C₂ și Cr₇C₃ prin mecanisme substituționale, în timp ce WC nu are capacitatea de a dizolva carburi de crom.

Identificarea fazelor prezente necesită utilizarea unor metode de precizie. În acest sens, s-a recurs la evaluarea efectului sudării asupra compoziției depunerii folosind într-o primă etapă difracția RX, pentru ca mai apoi, datorită lipsei de precizie în interpretarea maximelor de difracție cu abateri de la maximele corespunzătoare unor faze cu compoziție standard, să se recurgă la analiza compozițională folosind microsonda electronică.

6.2. Examinarea prin difracție RX a depunerilor realizate

Programul de examinări prin difracție RX a depunerilor realizate a fost prima etapă a analizei structurale realizate pe depuneri în stare sudată, cu scopul decelării fazelor noi ce se formează în depunerile realizate. Pentru evidențierea mai bună a fenomenelor ce au loc s-a realizat analiza comparativă a depunerilor realizate cu măsurători de difracție RX realizate pe pulberile de plecare, respectiv pulberea metalică P 40 și carbura de wolfram denumită generic WSC.

Pentru a se estima efectul proporției adaosului de carburi asupra unor aspecte microstructurale, s-au efectuat depuneri cu regimuri care au fost optimizate experimental. Depunerile s-au realizat cu 40% carbură de wolfram în matricea formată

de aliajul ledeburitic P40. Pentru fiecare amestec de pulberi parametrii au fost optimizați experimental în vederea obținerii unei distribuții uniforme a carburilor pe secțiunea depunerii și realizării unei diluții minime.

Depunerile au fost examinate în ceea ce privește diluția, macro- și microduritatea, și natura constituenților structurali prin difracție RX pe diferite nivele ale depunerii (distanța linie de fuziune – linie de măsurare).

6.3. Rezultate experimentale privind difracția RX

Pentru a avea o măsură a structurii fazice a materialelor de pornire în realizarea depunerilor și a putea evalua corect natura fazelor formate în urma procesului de încărcare prin sudare, s-a procedat la realizarea unor măsurători de difracție prin radiație RX pe pulberile de plecare în realizarea încercărilor.

Încercările au fost executate cu pulberile în starea de livrare, fără a fi supuse nici unui tratament termic.

Figurile 6.1 și 6.2 prezintă spectrele de difracție realizate pe pulberile P 40 și WSC supuse depunerii înregistrate utilizând radiația α a Co. Tensiunea de accelerare cu care s-a înregistrat spectrul a avut valoarea de 80 kV, la o viteză de 1°/min.

Tabelul 6.1 relevă principalele faze care au fost decelate în urma analizei spectrului de difracție.

Tabelul 6.1. Faze decelate prin difracție RX pe pulberea inițială.

| | WC | W ₂ C | Fe _y | Cr ₂₃ C ₆ |
|------|----|------------------|-----------------|---------------------------------|
| WSC | x | x | - | - |
| P 40 | - | - | x | x |

În încercările ulterioare derulate în cadrul programului experimental s-a vizat determinarea morfologiei stratului prin difracție RX pe o secțiune transversală a depunerilor realizate cu un amestec P40 + 40% WC, realizate în condiții optimizate de regim tehnologic.

Microstructura depunerilor este alcătuită din fazele dure netopite introduse în amestecul de pulberi, matricea metalică - un eutectic format din austenită aliată și carburi metalice, respectiv carburi complexe precipitate în stare lichidă formate de carbura metalică topită la transferul carburilor prin arcul electric. Acestea sunt distribuite atât uniform în volumul matricei, cât și pe limitele carburilor rămase netopite la sudare, care au rol de centru de cristalizare.

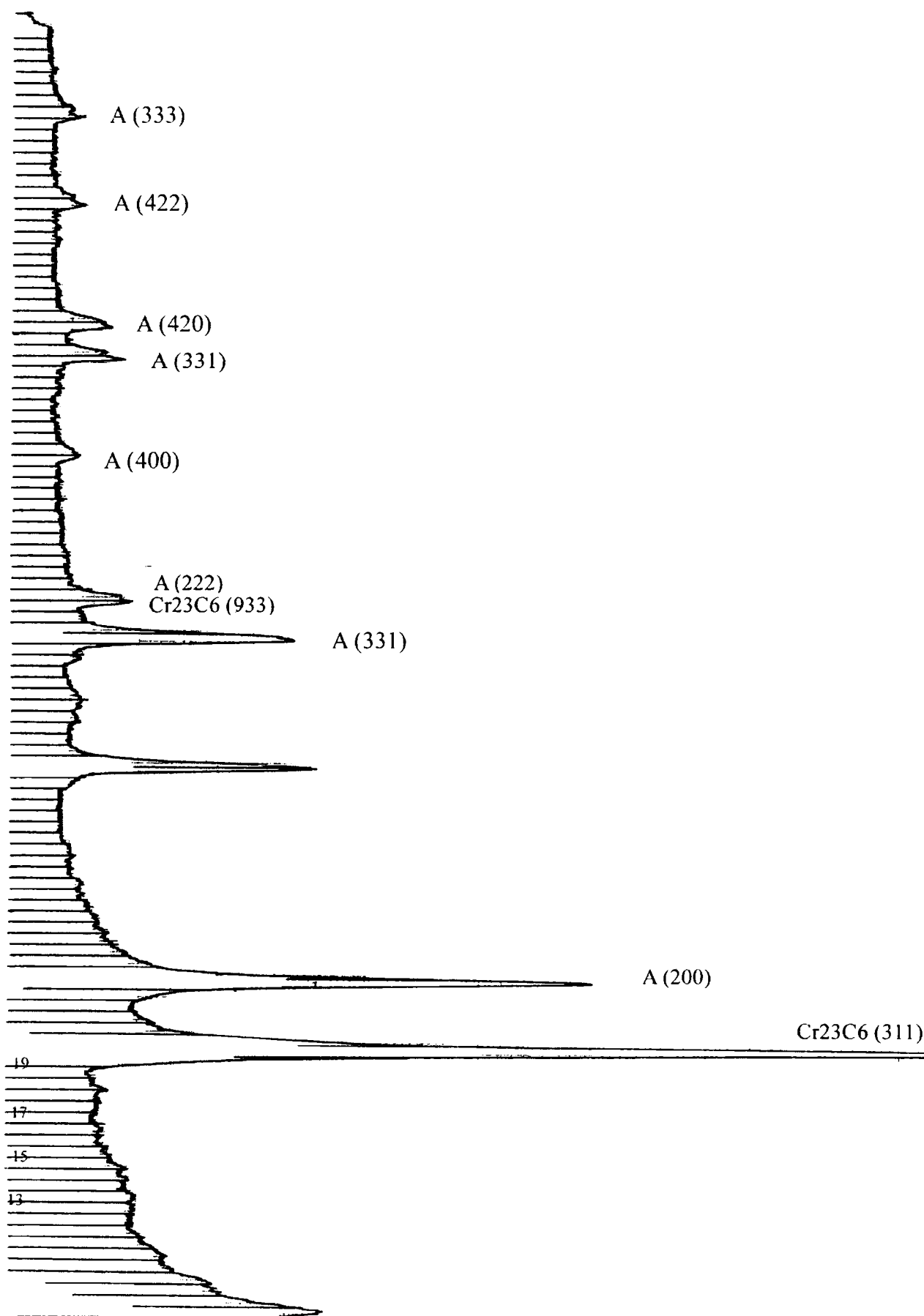


Figura 6.1. Spectru de difracție, pulberea P 40

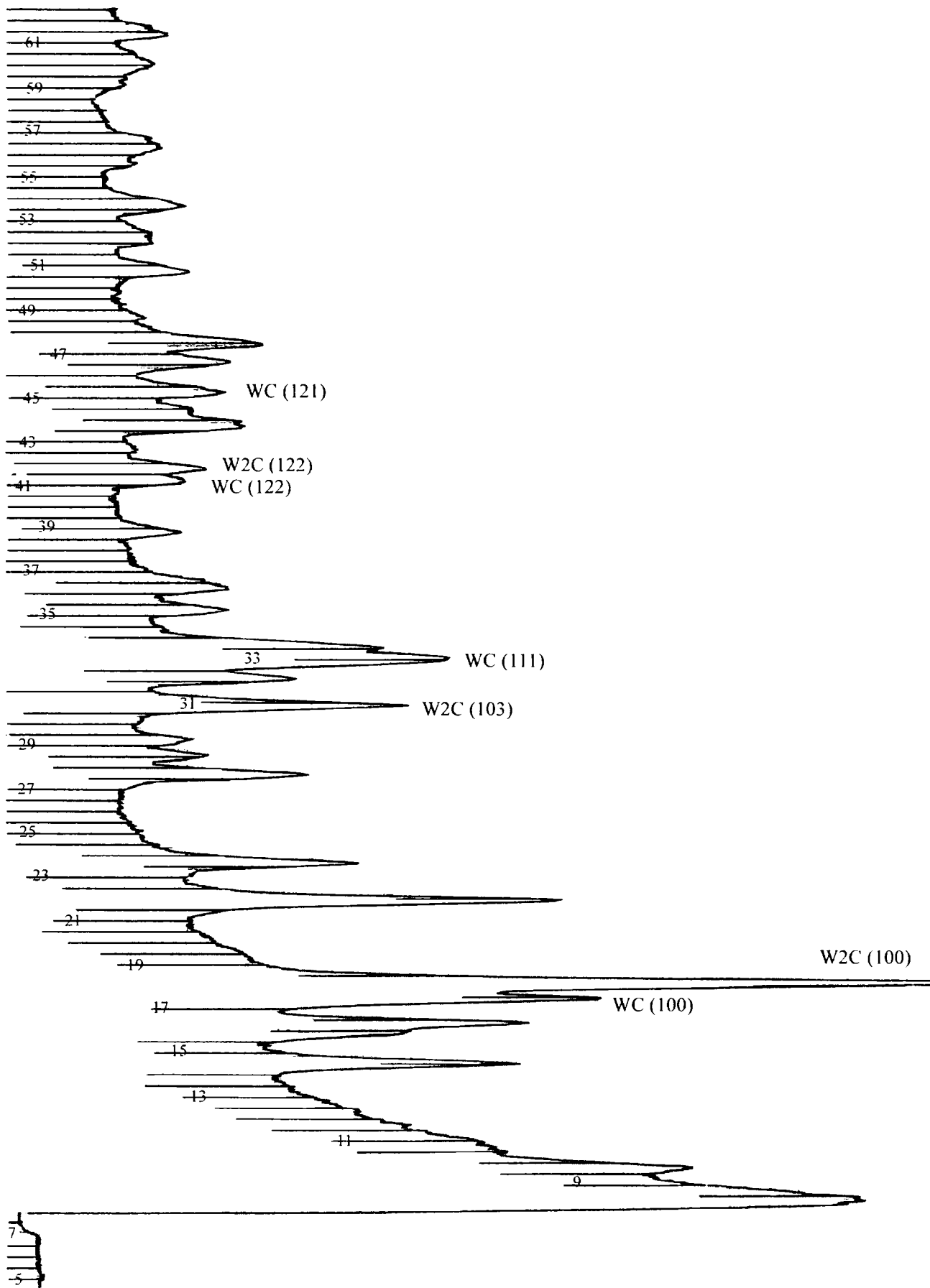


Figura 6.2. Spectru de difracție, pulberea WSC

Figurile 6.3, 6.4 și 6.5 prezintă spectre de difracție determinate în diferite planuri al depunerilor realizate utilizând parametri de regim optimizați experimental.

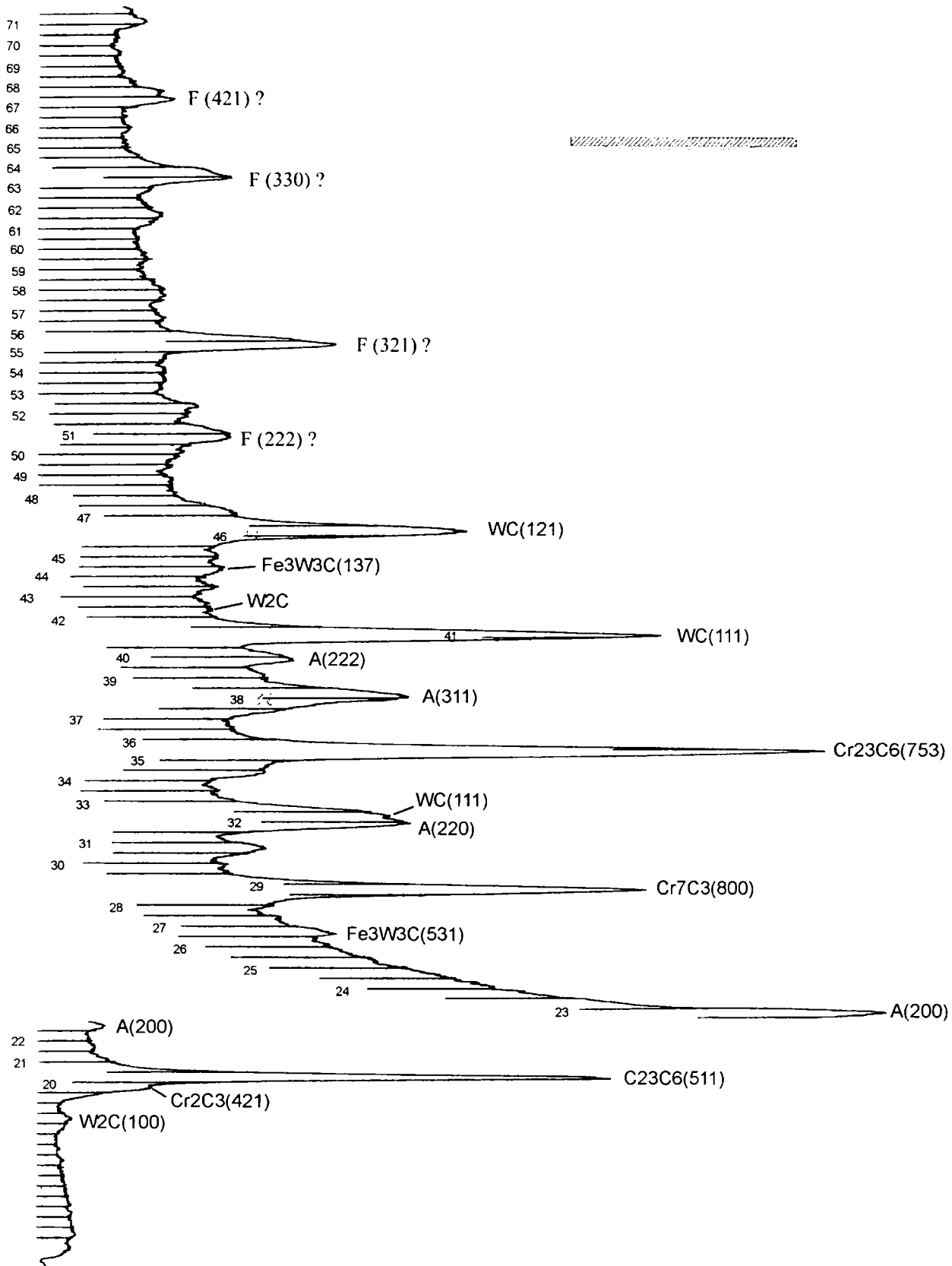


Figura 6.3. Spectru de difracție, secțiune inferioară

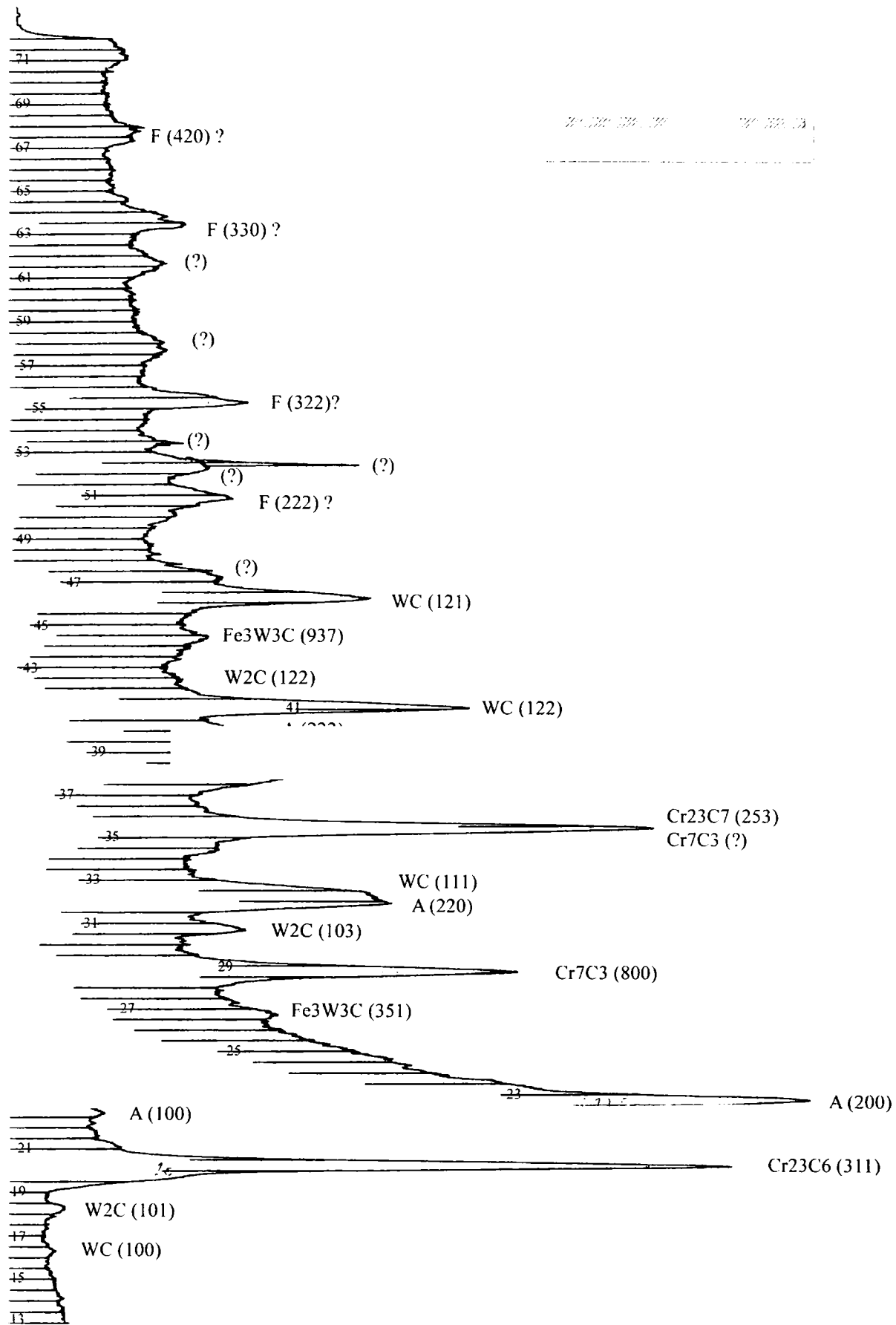


Figura 6.4. Spectru de difracție, secțiune mediană

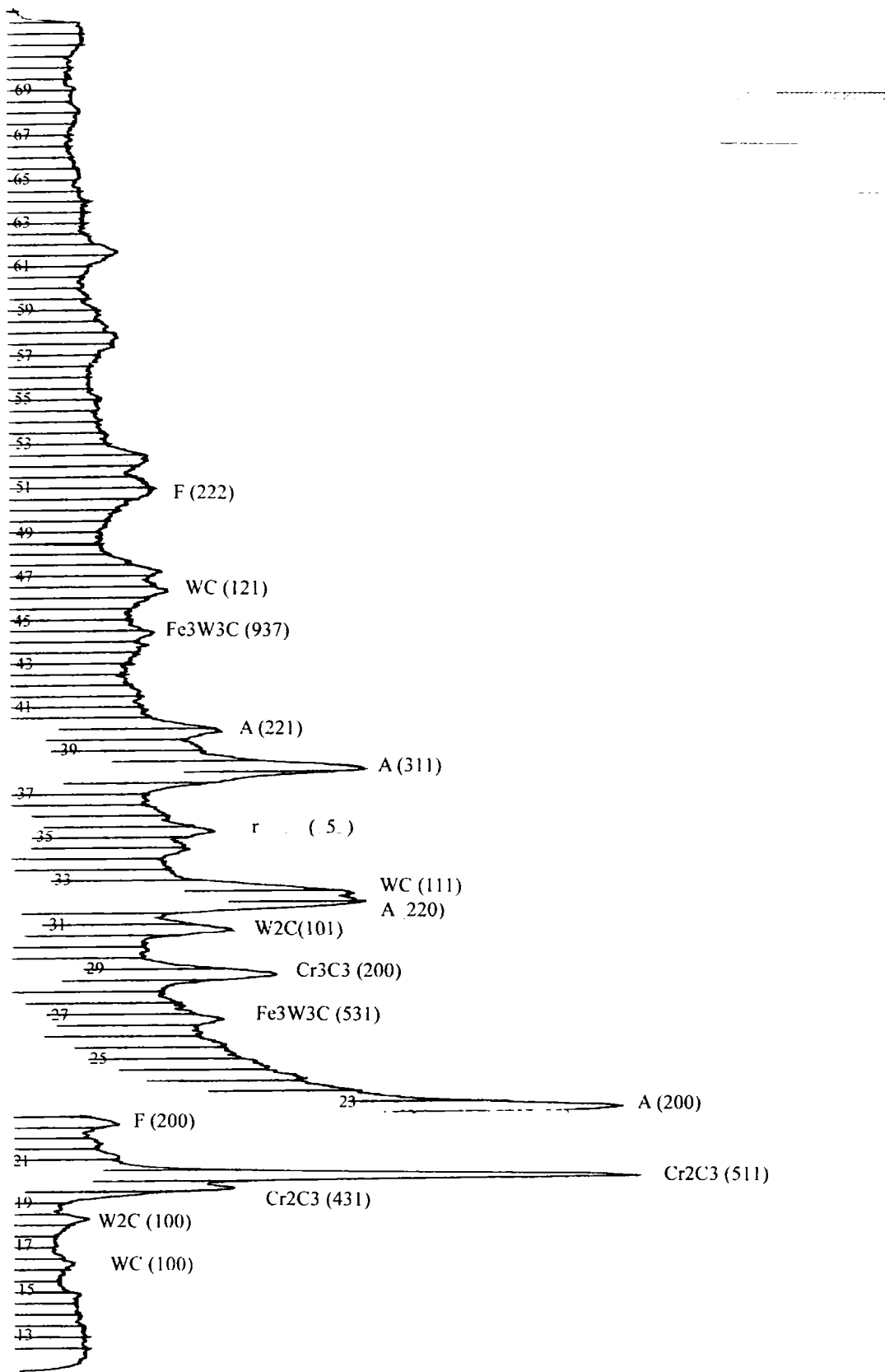


Figura 6.5. Spectru de difracție, secțiune superioară

Spre deosebire de fazele prezente în depunerea realizată cu aliajul formator de matrice P 40, în toate depunerile realizate cu amestecuri de pulberi și examinate la diferite nivele ale secțiunii stratului se remarcă apariția de faze noi.

Principalele faze prezente în depunere, așa cum sunt relevate de interpretarea spectrelor de difracție provin din aliajul de formare al matricei și sunt de tipul carburilor elementelor de formare a matricei (Cr_7C_3 , Cr_{23}C_7), respectiv faze noi identificate ca o fază comună $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ și altele neidentificate.

S-au identificate plane cristalografice corespunzătoare feritei, respectiv maxime neidentificate, provenind probabil de la faze complexe, precipitate ca urmare a fenomenelor metalurgice ce au loc la depunere.

Cu toate că poziția maximelor de difracție corespunde celor două tipuri de carbură indicate, există uşoare abateri ale peak-urilor care ne fac să afirmăm că aceste carburi au caracter complex. Noii constituenți structurali formați sunt carburi complexe de tip M_7C_3 respectiv M_{23}C_6 rezultate din precipitarea carburilor dizolvate de wolfram sub formă complexă. Singura fază complexă identificată în mod explicit este faza M_6C având compoziția $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$.

Este necesară însă identificarea fazelor ce se regăsesc (suprapun) cu anumite caracteristici ale feritei (Fe_α), respectiv a maximelor neidentificate în secțiunea depunerii, pentru a verifica atât natura lor, cât și modul lor de distribuție (în volum sau pe limitele carburilor rămase netopite) în secțiunea transversală a depunerii.

Pentru identificarea modificărilor ce apar în urma procesului de sudare, s-a recurs la analiza comparativă a difractogramelor fazelor realizate în depunerile primare, pulberile P 40 și respectiv WSC, într-o analiză comparativă cu depunerile realizate cu amestecurile de pulberi.

6.4. Examinări folosind microsonda electronică

Microsonda electronică este un mijloc modern de investigație folosit în metalografie pentru analize calitative și cantitative ale structurii fine și compoziției chimice.

Pentru decelarea fazelor prezente în depunerile realizate s-a recurs la realizarea unui set de depuneri realizate folosind aliajul P 40 (tabelul 3.1) cu un adaos de 40% (procente masice) carbură de wolfram (tabelul 3.2). Unele dintre depunerile realizate au fost sensibilizate prin tratament termic la temperaturi în intervalul $500 \div 900$ °C, cu durate de 1, 5 și 10 ore, în timp ce un set de probe s-a analizat în stare sudată (vezi capitolul 5).

Depunerile obținute (atât în stare sudată cât și sensibilizată) au fost examinate la microsonda electronică atât în ceea ce privește morfologia matricei și fazelor matricei depunerilor (capitolul 3) cât și în ceea ce privește structura compozițională a fazelor prezente în depunerile aflate în stare sudată și sensibilizată. Menționez că această parte experimentală a fost condusă pe o microsondă electronică cu 4 spectrometre de raze X existentă în dotarea Universității Tehnice (RWTH) din Aachen.

6.5. Rezultate experimentale folosind microsonda electronică

Examinările efectuate la microsonda electronică au urmărit două obiective: determinarea naturii compoziției fazelor dure prezente în depuneri, respectiv a mecanismului de formare a fazelor dure. Pentru fiecare din faze s-a efectuat un set de 10

măsurători, care s-au prelucrat statistic. S-au luat în considerare numai măsurătorile cu o confidență de peste 95%.

Tabelul 6.2 prezintă valorile medii rezultate la analiza chimică atomică folosind microsonda electronică pe diferite faze prezente în microstructura probelor depuse și netratate termic, indicând faza pe care au fost efectuate măsurătorile (proba 17 - P40 + 40% WC, netratat), iar tabelul 6.3 - valorile medii la analiza chimică atomică pe diferite faze prezente în microstructura probelor depuse și tratate termic (proba 1770 - P40+40% WC, 700 °C/10h/aer).

Se indică și tipul fazelor presupuse a fi fost examinate, pe baza primelor observații privind compoziția chimică exprimată în procente atomice de masă sau a aspectului microscopic (poligonal, dendrite etc.).

Pe baza proporțiilor atomice prezentate în tabelele 6.2 și 6.3 s-a calculat raportul dintre suma proporțiilor atomice a principalelor elemente carburigene (Fe, Cr, W) și proporția atomică a carbonului în punctele care s-a făcut măsurătoarea, în vederea determinării prin calcul a tipului de carbură examinat.

Anexa 3 - Măsurătorile cantitative folosind microsonda electronică indică valorile individuale măsurate pentru fiecare punct examinat pe suprafața probelor.

Tabelele 6.4 și 6.5 prezintă aceste valori precum și tipurile de carbură identificate pe baza raportului metal/carbon folosind această metodă.

Tabelul 6.2. Examinări compoziționale, probe nesensibilizate

| Nr. proba | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|-----------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | 17,23 | 0,107 | 5,228 | 30,561 | 0,196 | 11,66 | 0,594 | 31,04 | 3,374 | 99,990 |
| 2 | 34,20 | 0,136 | 0,059 | 0,487 | 0,019 | 0,016 | 0,097 | 64,66 | 0,245 | 99,920 |
| 3 | 53,31 | 0,123 | 0,004 | 0,194 | 0,001 | 0,037 | 0,045 | 46,207 | 0,074 | 100,001 |
| 4 | 5,126 | 0,011 | 10,030 | 68,837 | 0,417 | 10,873 | 0,094 | 2,147 | 2,464 | 100,001 |
| 5 | 5,471 | 0,019 | 7,306 | 73,267 | 0,405 | 9,219 | 0,079 | 2,208 | 1,988 | 99,960 |
| 6 | 15,985 | 0,091 | 6,661 | 39,096 | 0,242 | 12,789 | 0,702 | 22,163 | 3,450 | 100,140 |
| 7 | 31,281 | 0,077 | 4,273 | 32,683 | 0,441 | 20,193 | 0,645 | 18,801 | 2,729 | 100,001 |

Tabelul 6.3. Examinări compoziționale, probe sensibilizate 700 °C, 10 h

| Nr. proba | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|-----------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | 28,362 | 0,021 | 5,052 | 32,776 | 0,366 | 31,267 | 0,256 | 0,634 | 1,266 | 100,000 |
| 2 | 34,167 | 0,181 | 0,132 | 0,559 | 0,018 | 0,175 | 0,066 | 64,249 | 0,122 | 99,669 |
| 3 | 53,258 | 0,109 | 0,021 | 0,237 | 0,027 | 0,055 | 0,063 | 45,883 | 0,059 | 99,711 |
| 4 | 16,425 | 0,100 | 6,451 | 28,663 | 0,192 | 15,461 | 0,861 | 27,479 | 4,368 | 100,000 |
| 5 | 3,243 | 0,012 | 14,576 | 62,164 | 0,465 | 14,090 | 0,121 | 1,847 | 3,492 | 100,010 |
| 6 | 15,160 | 0,165 | 7,340 | 42,602 | 0,450 | 20,945 | 0,736 | 9,209 | 3,393 | 100,000 |

Tabelul 6.4. Compoziții calculate ale fazelor dure, probe nesensibilizate

| Nr. crt. | C % | Fe % | Cr % | W % | Total metal % | Raport Me/C |
|----------|--------|---------|---------|--------|------------------|-------------|
| 1 | 15,985 | 39,096 | 12,789 | 22,163 | 74,048 | 4,632 |
| 2 | 17,231 | 30,562 | 11,660 | 31,040 | 73,265 | 4,269 |
| 3 | 31,281 | 32,683 | 20,193 | 18,801 | 71,677 | 2,290 |
| 4 | 34,203 | 0,487 | 0,016 | 64,660 | 65,163 | 1,904 |
| 5 | 53,312 | 0,194 | 0,037 | 46,207 | 42,260 | 0,868 |
| 6 | 5,471 | 73,267 | 9,219 | 2,208 | 84,694 | 15,480 |
| 7 | 5,126 | 68,837 | 10,873 | 2,147 | 81,857 | 15,968 |

Tabelul 6.5. Compoziții calculate ale fazelor dure, probe sensibilizate, 700 °C, 10 h

| Nr. crt. | C % | Fe % | Cr % | W % | Total metal % | Raport Me/C |
|----------|--------|---------|---------|--------|------------------|-------------|
| 1 | 15,160 | 42,602 | 20,945 | 9,209 | 72,757 | 4,937 |
| 2 | 16,425 | 28,663 | 15,461 | 27,479 | 71,602 | 4,369 |
| 3 | 28,362 | 32,776 | 31,267 | 0,634 | 64,677 | 2,328 |
| 4 | 34,167 | 0,559 | 0,175 | 64,249 | 64,984 | 1,902 |
| 5 | 53,258 | 0,237 | 0,055 | 45,883 | 46,174 | 0,867 |
| 6 | 3,243 | 62,164 | 14,090 | 1,847 | 78,101 | 24,738 |

Pe baza valorilor prezentate în tabelele 6.4 și 6.5 pentru raportul metal/carbon (ipoteza în care se consideră ca elemente carburigene doar fier, crom și wolfram), în tabelele 6.6 și 6.7 se prezintă compozițiile chimice calculate ale carburilor formate pe baza proporțiilor atomice. S-au luat în considerare măsurătorile cu raportul $Me/C < 12$, prag considerat de autori ca limită superioară pentru formarea de carburi în sistemul cuaternar Fe-Cr-W-C.

Tabelul 6.6. Tipul carburilor formate, probe nesensibilizate.

| Nr. crt. | Raport Me/C | Tip carbură aproximată | Compoziția calculată |
|----------|-------------|-------------------------------|---|
| 1.1 | 4,269 | M ₄ C | (Fe _{1,666} Cr _{0,634} W _{1,692})C |
| 1.2 | 4,632 | M ₄ C | (Fe _{2,112} Cr _{0,691} W _{1,197})C |
| 1.3 | 2,148 | M ₇ C ₃ | (Fe _{3,192} Cr _{1,973} W _{1,835})C ₃ |
| 1.4 | 1,905 | M ₂ C | (Fe _{0,015} W _{1,985})C |
| 1.5 | 0,871 | MC | (Fe _{0,015} W _{0,985})C |

Tabelul 6.7. Tipul carburilor formate, probe sensibilizate, 700 °C, 10 h.

| Nr. crt. | Raport Me/C | Tip carbură aproximată | Compoziția calculată |
|----------|-------------|------------------------|--|
| 2.1 | 4,937 | M ₆ C | (Fe _{3,513} Cr _{1,728} W _{0,759})C |
| 2.2 | 4,369 | M ₄ C | (Fe _{1,085} Cr _{1,893} W _{1,021})C |

| Nr. crt. | Raport Me/C | Tip carbură aproximat | Compoziția calculată |
|----------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 2.3 | 2,328 | M_7C_3 | $(Fe_{3.548}Cr_{3.383}W_{0.069})C_3$ |
| 2.4 | 1,902 | M_2C | $(Fe_{0.017}Cr_{0.005}W_{1.978})C$ |
| 2.5 | 0,867 | MC | $(Fe_{0.005}Cr_{0.001}W_{1.994})C$ |

Abaterea de la compoziția calculată a compoziției chimice a carburilor este în majoritatea cazurilor în limita a 15% (mai puțin cazul cu nr. 2.1, tab. 6.7), iar raportul Me/C indică în majoritatea cazurilor cu precizie relativ ridicată tipul de carbură.

Singurele ambiguități pot apărea la interpretarea unor rapoarte Me/C în intervalul 2 - 2,33, care pot caracteriza atât carbura M_2C , cât și carbura M_7C_3 . Cu toate că carbura M_4C este mai apropiată funcțional, s-a preferat interpretarea raportului $Me/C=4,9$ (nr. 2.1, tab 6.7) sub forma unei carburi de tip M_6C .

La o analiză a compoziției fazelor prezente înaintea și după tratamentul termic de revenire, se pot constata următoarele:

- Este probabilă creșterea prin tratamentul termic de sensibilizare a limitei superioare de solubilitate a carbonului în matricea metalică;
- Carburile complexe precipitate pe limitele carburilor de wolfram netopite (1.2) au în stare sudată o proporție redusă de Cr comparativ cu cele identificate în probele tratate termic (2.2), constatându-se o creștere a proporției de Cr de peste 20% pe seama celorlalte două elemente carburigene (Fe, W). Creșterea raportului Me/C în stare sensibilizată poate indica începutul transformării fazei instabile M_4C într-o fază mai stabilă termodinamic de tip M_6C ;
- Carburile complexe instabile precipitate în stare sudată de tip M_4C se stabilizează în unele cazuri la o formă mai stabilă de tipul M_6C (1.1, tabelul 6.6 în comparație cu 2.3, tabelul 6.7). Se remarcă creșterea semnificativă a proporției Cr în carbură de la 17% la 47% a componentei metalice;
- Carbura M_7C_3 se transformă în urma tratamentului de sensibilizare în carbura M_6C , prin creșterea proporției cromului în carbură.

Suplimentar examinărilor efectuate la microsonda electronică care au relevat elemente legate de compoziția chimică a depunerilor, aspectele microstructurale care evidențiază modificările apărute în urma tratamentului termic de sensibilizare sunt de un interes ridicat.

Unele din fazele examinate în tabelele 6.2 și 6.3 se regăsesc ca repere în imaginile de microscopie electronică prin baleiaj obținute pe parcursul efectuării examinărilor compoziționale.

Figurile 6.6. a - f prezintă aspecte microstructurale ale depunerilor realizate pe probe P 40 + 40% WSC în stare sudată (nesensibilizată) la diferite mărimi și poziții pe secțiunea depunerilor.



Fig. 6.6.a. x100, nesensibilizat – segregatii carburi



Fig. 6.6.b, x100, nesensibilizat – matrice metalică



Fig. 6.6.c, x300, nesensibilizat – matrice

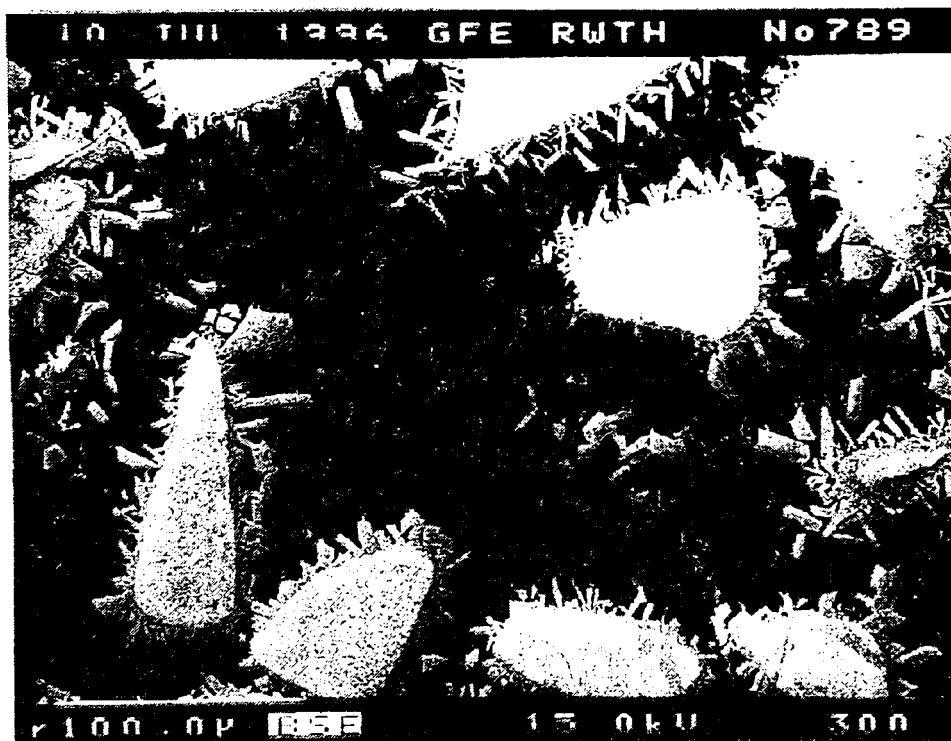


Fig. 6.6.d, x300, nesensibilizat – segregatii carburi

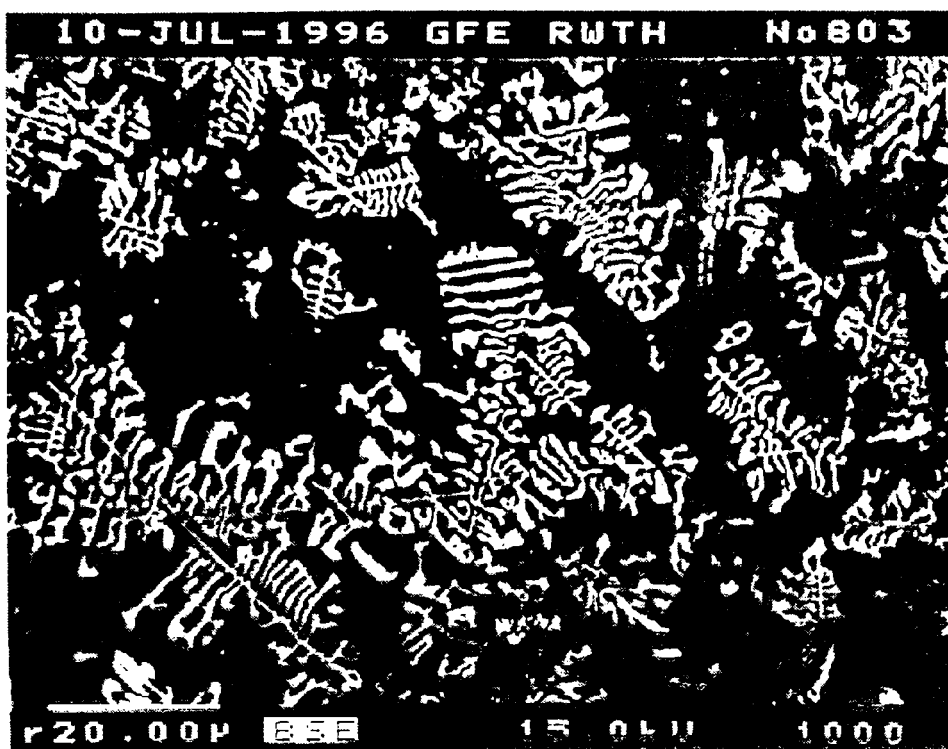


Fig. 6.6.e, x1000, nesensibilizat – matrice metalică



Fig. 6.6.f, x1000, nesensibilizat – limite de faze dure, segregatii

După cum se poate remarca, matricea depunerilor prezintă în urma procesului de sudare faze dure având atât aspect dendritic pronunțat cât și aspect poligonal.

Cum aspectul dendritic al fazelor precipitate în volumul matricei s-a regăsit și în depunerile realizate cu pulberea P 40 fără adaos de carburi, este de așteptat doar o ușoară modificare compozițională acestora.

Fazele dure poligonale sunt însă faze noi, ce se formează în urma procesului de sudare. De aceea, este de așteptat ca acestea să fie carburi complexe de tip $(Fe, Cr, W)_x C_y$, probabil cu o structură compozițională instabilă, care să fie stabilizate de tratamentele termice de sensibilizare.

Figura 6.7. a - f prezintă aspecte microstructurale ale depunerilor în stare tratată termic (sensibilizate) indicând modificările microstructurale ce se înregistrează la tratamentul de sensibilizare la 700 °C pe durata de 10 ore.



Figura 6.7.a, x100, Sensibilizat 700 °C, 10 h

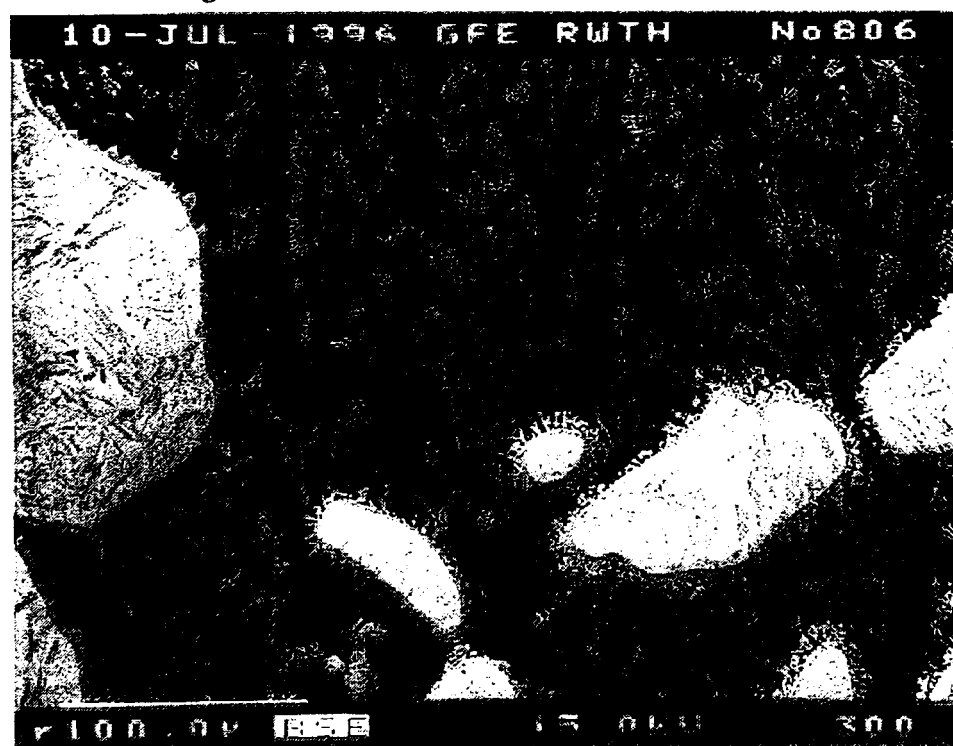


Figura 6.7.b, x300, Sensibilizat 700 °C, 10 h



Figura 6.7.c, x500, Sensibilizat 700 °C, 10 h



Figura 6.7.d, x1000, Sensibilizat 700 °C, 10 h

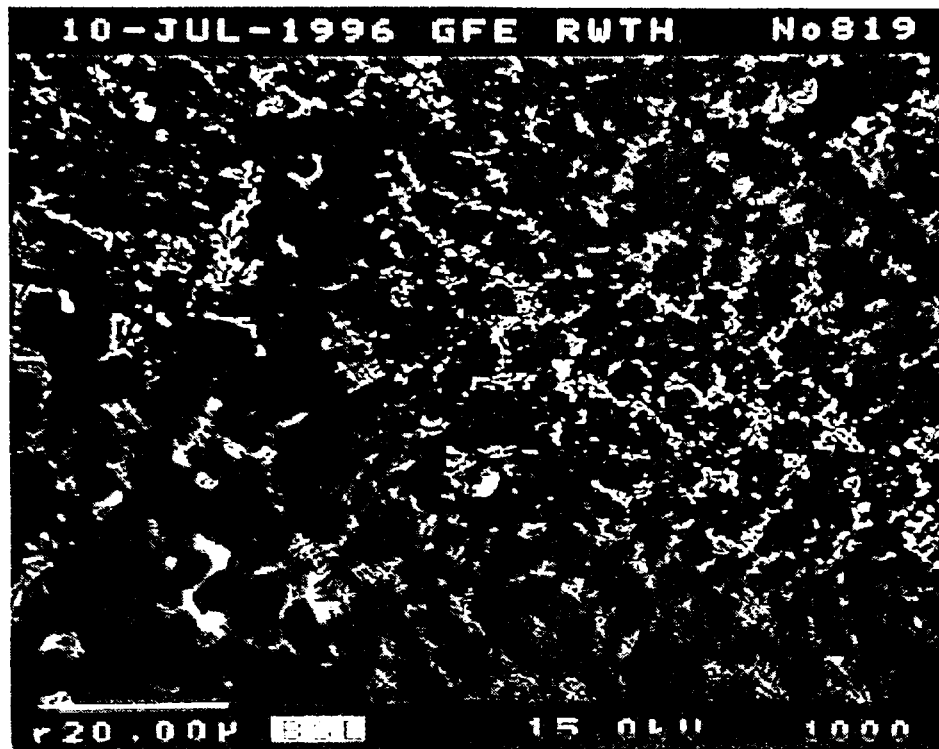


Figura 6.7.e, x1000, Sensibilizat 700 °C, 10 h

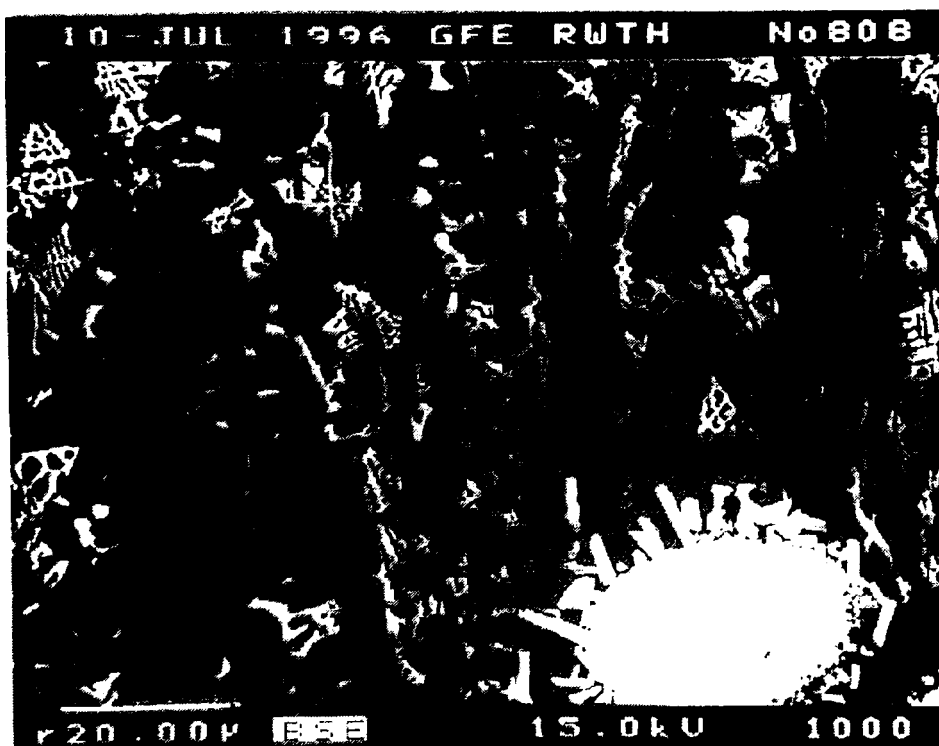


Figura 6.7.f, x1000, Sensibilizat 700 °C, 10 h

Prin analiza imaginilor din figurile 6.6 și 6.7 se remarcă modificări morfologice substanțiale în ceea ce privește aspectul fazelor dure prezente în stare precipitată în soluție, dar și a celor crescute epitaxial pe limitele fazelor dure netopite după cum urmează:

- Finisarea (scăderea dimensiunilor dendritelor) fazelor dure precipitate în matricea depunerilor - figura 6.7.e comparativ cu figura 6.6.e.;
- Lărgirea zonei de creștere epitaxială a fazelor dure pe fazele netopite pe seama fenomenelor difuzionale ce au loc pe parcursul tratamentului de sensibilizare;

- Creșterea proporției fazelor cu aspect poligonal precipitate în volumul depunerii;

6.6. CONCLUZII

- În cazul depunerilor compozite armate cu faze dure nu există o corelație strict liniară între duritatea matricei și proporția de carburi introdusă în amestec
- La un timp de sensibilizare constant, microduritatea matricei crește proporțional cu proporția de carbură metalică;
- Punerea în soluție a carburilor începe la temperatura de 800 °C, la timpi de sensibilizare de peste 5 ore;
- Efectul sensibilizării asupra microdurității matricei depunerilor armate cu faze dure este complex și nu poate fi evaluat printr-o funcție liniară sau de tip polinomial
- Carburile precipitate pe limitele carburilor netopite sunt de tip M_4C ;
- Carburile precipitate din matricea metalică sunt de tip M_4C
- Carburile formate prin precipitare conțin o proporție redusă de crom;
- Proporția de Cr crește întotdeauna în carburile precipitate la tratamentul termic de sensibilizare;
- La tratamentul termic au loc fenomene de transformare a carburilor precipitate din matrice la forme mai stabile de la tipul M_4C la M_6C ;
- Tratamentul termic de sensibilizare induce modificări substanțiale în ceea ce privește aspectul microstructural al depunerilor realizate.

CAPITOLUL 7 - REZISTENȚA LA UZARE ABRAZIVĂ A DEPUNERILOR REALIZATE

7.1. Introducere

Aliajul P40 are o microstructură alcătuită din dendrite de soluție solidă de austenită aliată, carburi precipitate primar și eutectic (austenită + carburi) având o duritate în stare sudată de aproximativ 450 HV 5. Natura austenitică a componentei metalice este aceea care, în ciuda conținutului ridicat de carbon (2,27%) face ca duritatea materialului să fie relativ redusă.

Deoarece caracteristica "rezistență la uzare" este un parametru relativ și este determinată de caracteristicile concrete ale procedurii de examinare al acestei calități de material, încercările de rezistență la uzare au fost efectuate comparativ, raportat la alte familii de materiale consacrate în astfel de aplicații respectiv prin raportarea la alte materiale noi susceptibile la întreg spectrul de valori avute la dispoziție de către autori.

7.2. Mecanismul uzării abrazive a compozitelor armate cu faze dure. Aparatura experimentală

Întrucât mediile abrazive comportă prezența unor materiale cu duritate și fragilitate ridicată, materialele care preiau aceste solicitări trebuie să conțină componente cu duritate ridicate - comparabilă sau mai ridicată ca a elementelor mediului abraziv. Deoarece materialele cu duritate ridicată sunt întotdeauna deosebit de fragile, realizarea unor materiale care să reziste mecanismului uzării abrazive impun în mod organic prezența fazelor dure încastrate într-o matrice ductilă, lucru determinat de natura mecanismului de uzare.

Condiția ca un material compozit cu matrice metalică să poată prelua eficient solicitările abrazive ale mediului de lucru sunt determinate de raportul D_p/D_f - figura 7.1.

Condiția necesară satisfacerii condiției funcționale "rezistență la uzare abrazivă" este o valoare semnificativ supraunitară a raportului D_p/D_f . Valori egale cu unitatea sau subunitare au ca efect erodarea matricei - care în mod caracteristic este moale și ductilă - de către fazele dure și dezagregarea fazelor dure încastrate în matrice.

De aceea, pentru fiecare mediu abraziv în parte (granulația și duritatea fazelor dure) există o valoare minimă a proporției de faze dure existente în volumul matricei care asigură rolul funcțional al stratului depus prin sudare.

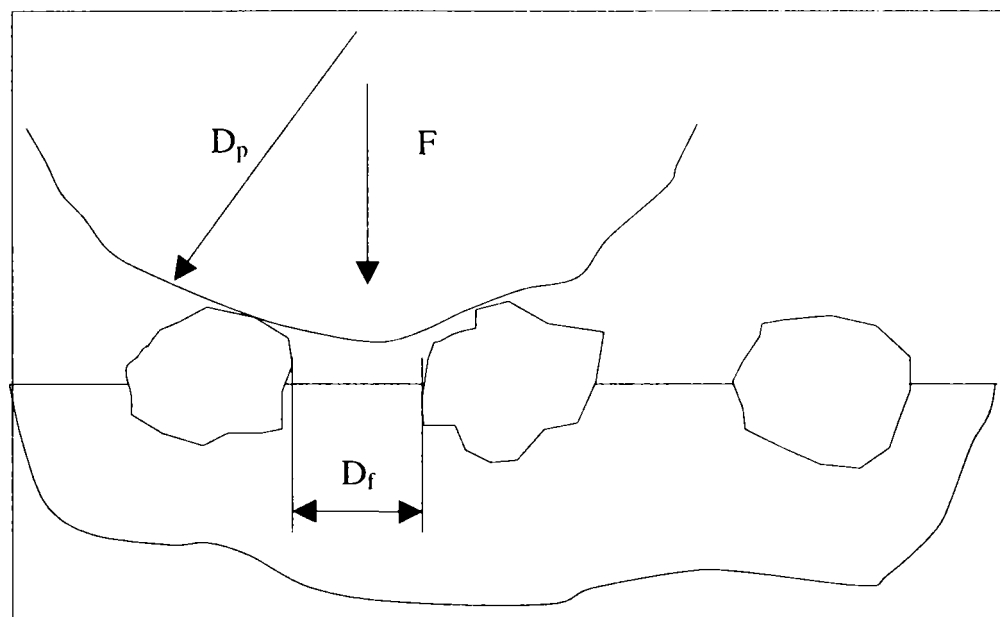


Figura 7.1. Elemente caracteristice în mecanismul uzării abrazive cu trei corpuri

Pentru realizarea analizei comparative, s-au utilizat următoarele clase de materiale (aliaje metalice) pentru realizarea matricei metalice a depunerilor

- P 40;
- 316 Lc (X2 CrNiMo 19.2 – W. nr. 1.4431);
- W 1.4115 (X2 Cr 170);
- W 4.1740 (0,3% C, 7,3% Cr, 3,5% Si, 2,5% Fe, rest Ni)

toate cu granulații cuprinse în intervalul 63 – 210 μm .

Deoarece caracteristicile termofizice ale depunerilor realizate variază cu natura pulberilor ce sunt supuse depunerii, pentru fiecare amestec de pulberi parametrii de sudare au fost optimizați experimental în vederea obținerii unei distribuții uniforme a carburilor pe secțiune în condițiile atingerii unei diluții minim posibile.

Având în vedere că rezistența la uzare este un parametru determinat de condițiile concrete de exploatare (abraziune), depunerile au fost examinate conform normei americane ASTM G 65 - 85 utilizând metoda "RUBBER WHEEL" (figura 7.2) în condiții standard pentru acest tip de încercare:

- Viteza periferică: 4,5 m/s;
- Sarcină: 150 N;
- Parcursul de uzare: 3000 m;
- Mediu abraziv: 2 kg nisip cuarțos cu granulația 0,45-0,65 mm.

Metoda Rubber Wheel realizează simularea unui sistem tribologic cu trei componente și este o încercare tipică de uzare abrazivă uscată fără șocuri mecanice, caracterizând comportarea materialelor în medii uscate necorosive la uzare prin alunecare cu particule dure cu muchii ascuțite.

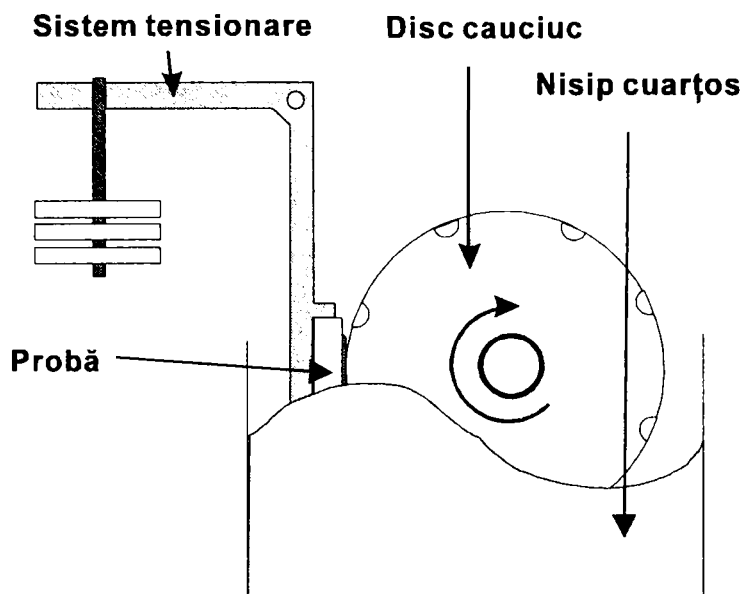


Figura 7.2. Metoda "Rubber Wheel" conf. ASTM G 65 - 85

Date fiind particularitățile depunerilor compozite realizate, apar o serie de particularități de material:

- Mecanice: legate de diferențele de densitate dintre materialul matricei metalice și al fazei dure care generează tendințe de segregare a fazelor dure;
- Metalurgice: determinate de comportarea la îmbogățirea în elemente durificatoare a aliajului formator de matrice și durificarea matricei;
- De exploatare: matricea metalică are duritatea mult diferită de duritatea elementelor de preluare a solicitărilor mecanice abrazive ale mediului.

Ca urmare este de așteptat ca adaosul de carburi în materiale saturate în carbon (P 40) să aibă efecte semnificativ diferite de adaosul de carburi în aliaje cu conținut redus de carbon (316 Lc) sau care vor suferi transformări de fază substanțiale (W 1.4115) prin îmbogățirea matricei metalice cu elemente austenitizante.

Pentru a permite realizarea unor depuneri omogene, cu un gradient minim al proprietăților, este necesară satisfacerea condiției minime de apropiere a densităților specifice ale materialelor supuse depunerii.

În condițiile prezente în cadrul experimentelor derulate, diferența este semnificativă și va avea ca efect o tendință accentuată de segregare a fazelor cu densitate ridicată (aici fazele dure WSC) reflectată în scăderea proporției acestora în porțiunea superioară a depunerii și creșterea densității lor în volumul inferior al depunerii.

Deoarece contactul cu fazele dure abrazive din mediu este preluat de fazele dure din amestecul de pulberi, respectiv din depunere, gradul de expunere al matricei metalice (cu o rezistență la abraziune redusă) este mai mare, având ca consecință creșterea pierderii de masă prin abraziune.

Diametrul mediu al fazelor dure, calculat pe baza distribuției granulometrice (tabelul 7.1) este de 114,7 μm (abatere standard: 17,338, mediana: 115,5) și permite calcularea distanței medii dintre fazele dure pe suprafață în următoarele condiții simplificatoare:

- Particulele aflate pe suprafața depunerii pătrund în grosimea materialului pe o proporție de 50% din diametru;
- Particulele de pe suprafața depunerii au diametrul egal cu diametrul mediu al fazelor dure;
- Fazele dure sunt uniform distribuite pe suprafață..

Deoarece mecanismul predominant de degradare este uzarea matricei și dezagregarea fazelor dure ca efect al pierderii continuității matricei metalice, corelarea densității de particule pe suprafață cu granulația mediului abraziv este deosebit de importantă. Tabelul 7.1. prezintă distribuția granulometrică a particulelor uzate pentru ranforsarea matricei metalice.

Tabelul 7.1. Distribuția granulometrică a fazelor dure

| Fracțiunea μm | Proporția % |
|--------------------------|------------------------|
| >210 | - |
| 180-210 | 5,8 |
| 150-180 | 14,8 |
| 125-150 | 18,1 |
| 106-125 | 27,5 |
| 71-106 | 28,4 |
| 63-71 | 5,4 |
| <63 | - |

Tabelul 7.2 prezintă valoarea distanței dintre particulele dure pe suprafața depunerii în funcție de fracția volumică a depunerilor, în condițiile satisfacerii condițiilor simplificatoare de mai sus.

Cum granulația medie a materialului abraziv utilizat este de 550 μm, este de așteptat ca acestea să nu erodeze matricea metalică (distanța intergranulară a fazelor dure în intervalul 59,77 – 95,47 μm), iar modificările de rezistență la uzare să fie determinate de modificările durtății, respectiv a calității matricei metalice.

Tabelul 7.2. Distanța dintre particule

| Proporție volumică % | Distanța dintre particule μm |
|---------------------------------|---|
| 25 | 95,47 |
| 40 | 84,44 |
| 55 | 70,80 |
| 65 | 59,77 |

7.3. Rezultate experimentale

Diferențele de densitate dintre materialul matricei și cel al fazelor durificatoare conduc - în condițiile nerespectării unor condiții tehnologice bine definite - la fenomene intense de segregare a fazelor dure în cursul solidificării băii metalice. O baie de sudare de dimensiuni ridicate va permite sedimentarea fazelor dure de tipul carburii de W ($\rho \sim 17,4 \text{ kg/dm}^3$) într-o matrice metalică uzuală ($\rho \sim 8 \text{ kg/dm}^3$), lăsând la suprafață un strat sărăcit în faze dure.

În consecință stratul de suprafață al depunerii va avea o rezistență mult redusă la uzare, afectând comportarea în exploatare a produsului căruia îi este destinat. Prin experiment au fost optimizate regimurile tehnologice astfel încât să se asigure o distribuție uniformă a carburilor nedizolvate și precipitate pe secțiunea transversală a straturilor. În tabelul 7.3 se prezintă valorile optime ale parametrilor tehnologici care permit îndeplinirea dezideratelor menționate anterior pentru pulberea P 40.

Tabelul 7.3. Regimuri tehnologice optimizate.

| Amestec | Q_{pl} l/min | Q_{tr} l/min | Q_{prot} l/min | I_a A | I_p A | U_a V | V_s cm/min | m_p g/min | H mm | f_p mm | b_p mm | E_l |
|------------|-------------------|-------------------|---------------------|------------|------------|------------|-----------------|----------------|---------|-------------|-------------|-------|
| P40+25% WC | 4 | 5,0 | 8 | 150 | 30 | 32 | 9 | 60 | 9 | 32 | 23 | 4.800 |
| P40+40% WC | 3,5 | 4,0 | 8 | 140 | 30 | 32 | 9 | 60 | 9 | 32 | 23 | 4.480 |
| P40+55% WC | 3,5 | 3,5 | 8 | 120 | 30 | 32 | 9 | 60 | 9 | 32 | 23 | 3.840 |
| P40+65% WC | 3,5 | 3,0 | 8 | 90 | 30 | 32 | 9 | 60 | 9 | 32 | 23 | 2.880 |

Observații: Q_{pl} - debit de gaz plasmagen; Q_{tr} - debit de gaz de transport; Q_{prot} - debit de gaz de protecție; I_a - curent în arcul transferat; I_p - curent în arcul pilot; v_s - viteza de sudare; m_p - debit masic de pulbere; H - distanța generator - piesă; f_p - frecvența pendulării; b_p - lățimea pendulării; E_l - energia liniară.

Examinările micrografice anterioare realizate asupra secțiunilor transversale ale îmbinărilor sudate cu proporție variabilă de carburi au atestat următoarele observații:

- Dificultatea obținerii unor depuneri omogene din punctul de vedere al distribuției carburilor nedizolvate crește cu proporția de carburi în amestecul de pulberi;
- Fenomenele de stratificare și segregare se accentuează la creșterea proporției de carburi;
- "Duritatea" regimului scade odată cu creșterea proporției de carburi din amestec;
- Proporția de carburi afectează geometria depunerii în condițiile menținerii unui debit constant de pulbere; densitatea aparentă a amestecului crește cu proporția de carburi, scăzând volumul de metal (material) depus la debit masic de pulbere constant.
- Diluția nu este afectată de proporția de carburi

Ca o consecință a modificărilor microstructurale determinate de condițiile de regim optime pentru fiecare proporție de carburi în parte, apar schimbări semnificative de natură sclerometrică. Figura 7.3 indică modul de variație al durității suprafeței

depunerii, iar figura 7.4 sintetizează variația microdurității matricei metalice cu proporția de carburi în comparație cu alte aliaje testate.

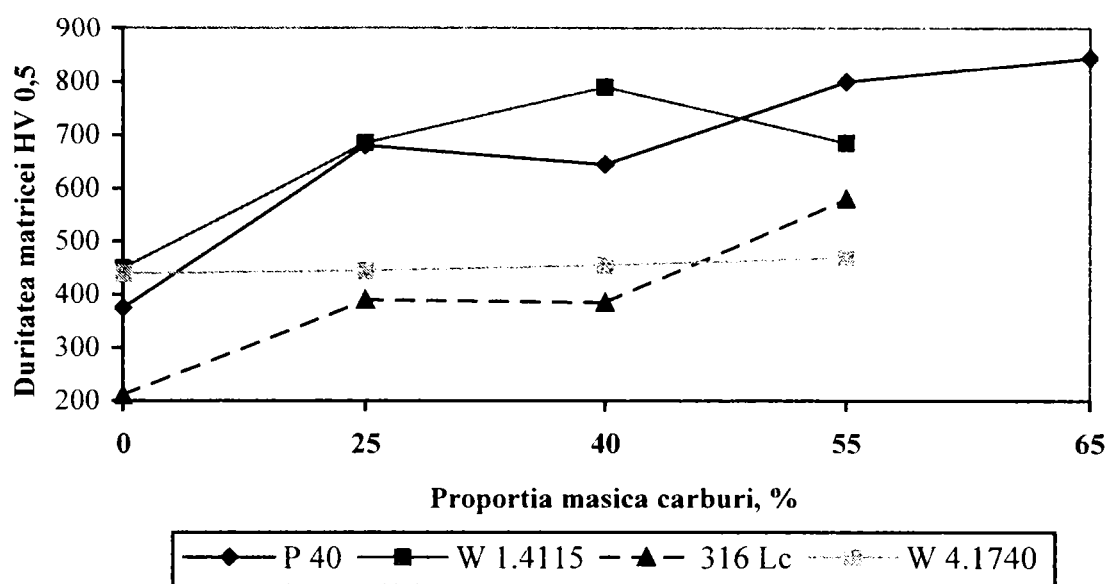


Figura 7.3. Dependența durității matricei de proporția masică de carburi pentru diferite aliaje testate

Indiferent de tipul aliajului cu baza fier formator de matrice, se poate remarca o creștere cvasi-continuă a durității matricei metalice odată cu creșterea proporției de carburi sub efectul intensificării fenomenelor de precipitare fină a fazelor dure în volumul matricei metalice și îmbogățirii continue a matricei în carbon.

Spre deosebire de aliajele cu baza fier, aliajul cu baza nichel testat nu prezintă fenomene de durificare a matricei datorate îmbogățirii în carbon. Fenomenul este datorat insolubilității carbonului în aliajele cu baza nichel și explică stabilitatea durității cu creșterea proporției de carbon în volumul depunerii.

Creșterea microdurității matricei aliajelor cu baza fier încetează în general la adaosuri de carbură de peste 55%. Motivația acestei observații poate fi aceea că matricea metalică atinge limita solubilității în carbon, limită de la care carbonul apare exclusiv sub formă de precipitări.

Cauza acestui fenomen este probabil topirea mai accentuată a carburilor la creșterea proporției de carburi în amestecul mecanic, ce are ca efect creșterea volumului de căldură preluat de acestea. Creșterea microdurității matricei este aproximativ egală și mai redusă la aliajele 316 Lc și W 1.4115 (340 și 350 HV 0,1) în comparație cu aliajul P 40 (475 HV 0,1) datorată probabil atingerii mai rapide a limitei de solubilitate a carbonului în austenită și extinderii rapide a precipitărilor fine, secundare de carburi în volumul matricei.

Acest fapt are ca și consecință - așa cum apare la niveluri prea ridicate ale conținutului de carburi - posibilitatea întreruperii continuității matricei metalice cu formarea de fisuri închise, care reduc semnificativ rezistența la oboseala de contact a depunerilor realizate. Creșterea durității macro- a depunerii cu proporția de carburi, respectiv a capacității de a prelua solicitările de contact cu mediul abraziv prin fazele dure încastrate în matrice duc în mod direct la o mărire a rezistenței la uzare abrazivă.

Rezultatele încercărilor de uzare abrazivă efectuate conform metodei de testare indicate anterior sunt prezentate în figura 7.4., în comparație cu un aliaj clasic antiuzură cu baza Ni, cunoscut ca insensibil la durificarea prin îmbogățirea cu carbon, respectiv în figura 7.5. în comparație cu alte aliaje cu baza fier (de tip 316 Lc).

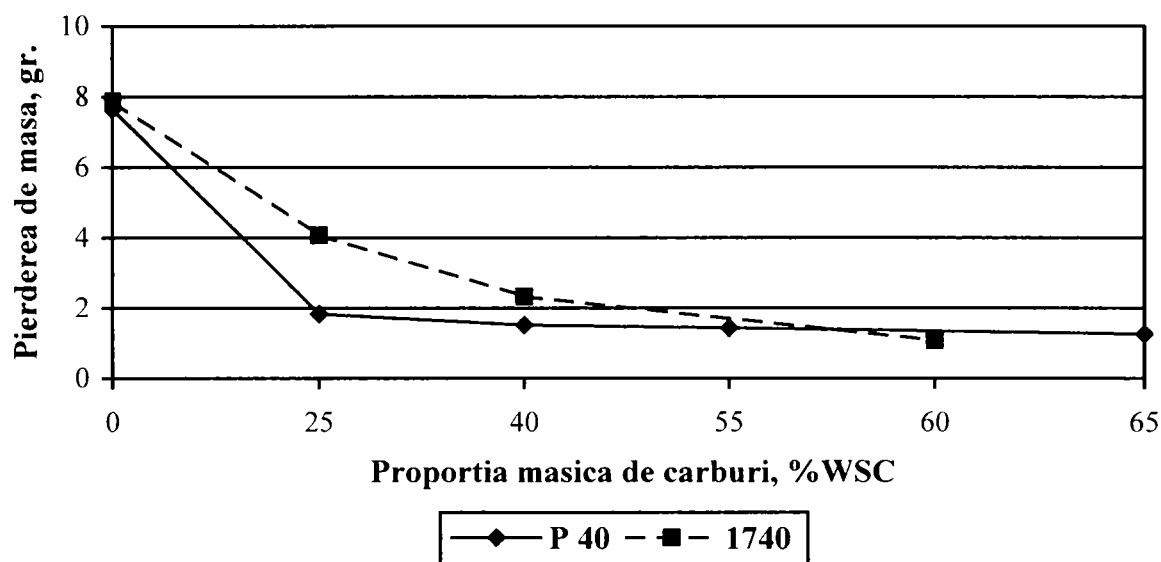


Figura 7.4 Dependența pierderii de masă funcție de proporția masică de carburi

După cum se poate remarca din figura 7.4., scăderea pierderii de masă este mult mai “radicală” la adaosul de faze dure în aliajul formator de matrice cu baza fier decât în cel cu baza nichel, la care rezistența la uzare – așa cum este definită în cadrul încercării “rubber wheel” este cvasi-liniară. Mecanismul ce stă la baza acestui fenomen este acela al durificării rapide a matricei aliajelor cu baza fier prin adaosul de carburi, ce se reflectă în creșterea rapidă a rezistenței la uzare prin întărirea legăturii dintre fazele dure ce preiau solicitarea de uzare. Spre deosebire de aliajele cu baza fier, aliajele cu baza nichel nu suferă fenomene de durificare a matricei, întreaga cantitate de carbon dizolvată regăsindu-se sub formă de carburi precipitate. De aceea, variația durtății are o alură semnificativ diferită (și apropiată de cea liniară) de cea caracteristică aliajelor formatoare de matrice cu baza fier.

După cum se poate remarca, comportarea la uzare la adaosul de carburi este asemănătoare, independent de compoziția chimică sau structurală a depunerilor realizate, respectiv a proporției de carbon în materialul (aliajul) formator de matrice.

Acesta este un indiciu evident al faptului că independent de compoziția materialului matrice (austenită – 316 Lc, ledeburită – P 40, ferită + martensită – W 1.4115) fenomenele ce au loc la adaosul de carburi sunt identice și declanșează mecanisme asemănătoare la nivel microstructural. Acestea se regăsesc în caracteristici macroscopice ca durtatea suprafeței, a matricei respectiv rezistența la uzare a depunerii realizate

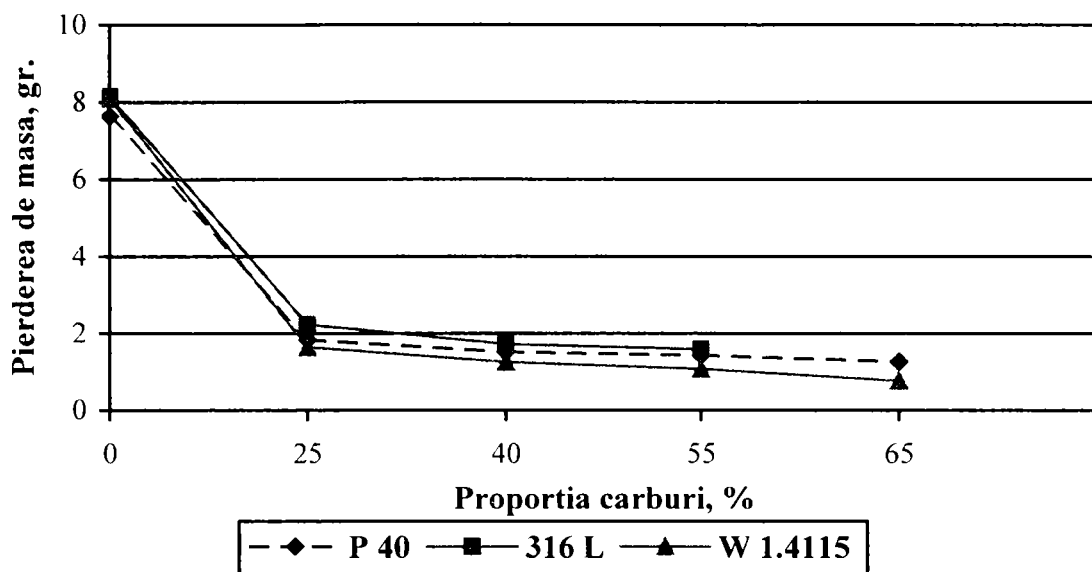


Figura 7.5. Dependența pierderii de masă funcție de proporția masică de carburi diferite aliaje

Comportarea la uzare este și ea dependentă de parametrii de regim prin două mecanisme: durificarea matricei metalice datorate dizolvării particulelor de faze dure, precum și apariția fenomenelor de segregare la baza băii metalice a fazelor dure netopite, care creează un gradient nefavorabil al proprietăților de exploatare. Figura 7.6 prezintă dependența rezistenței la uzare ca funcție de duritatea suprafeței depunerii, în timp ce figura 7.7. prezintă dependența durității soluției solide din alcătuirea matricei depunerilor realizate folosind aliajul formator de matrice P 40.

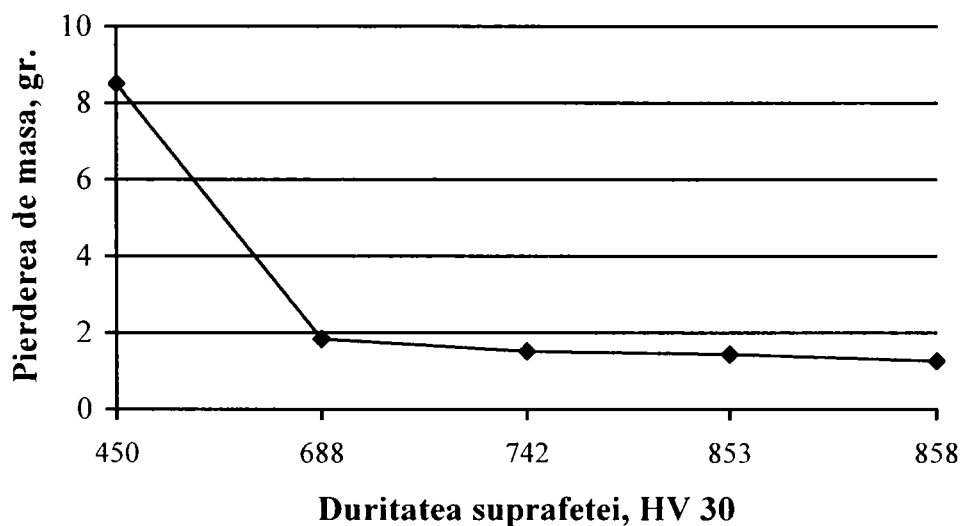


Figura 7.6. Dependența pierderii de masă de duritatea suprafeței

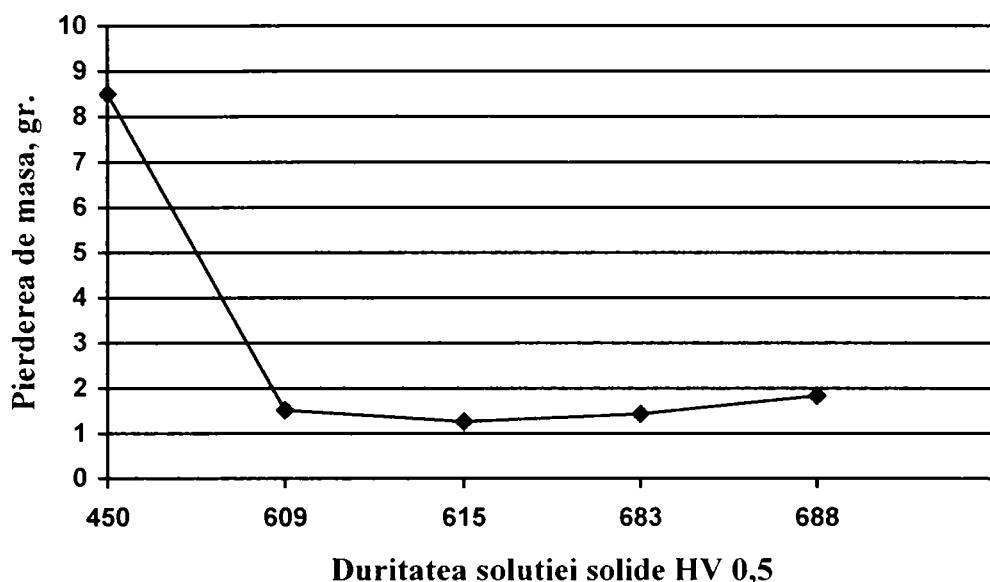


Figura 7.7. Dependența pierderii de masă de duritatea soluției solide

Figura 7.8. prezintă dependența pierderilor de masă ca funcție a durității medii a matricei depunerii.

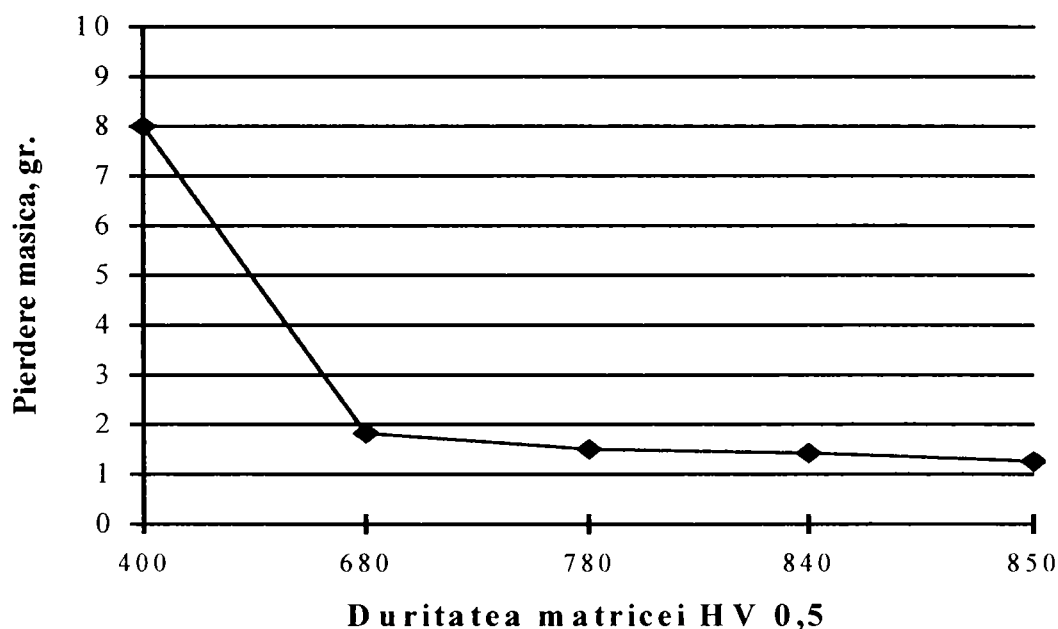


Figura 7.8. Dependența pierderii de masă de duritatea medie a matricei

După cum este de remarcant, efectul durității suprafeței și al matricei sunt comparabile în ceea ce privește efectul asupra pierderii de volum la uzare abrazivă într-un sistem tribologic de tipul celui testat, respectiv pentru materialele testate, pierderea de masă prin procesul de uzare abrazivă scade monoton la creșterea durității.

Nu aceeași afirmație se poate face în ceea ce privește duritatea soluției solide. Creșterea durității soluției solide nu are ca efect creșterea rezistenței la uzare abrazivă conform mecanismului testat.

De aceea, elementele ce pot caracteriza depunerile realizate din punct de vedere tribologic sunt fie duritatea suprafeței HV 30, fie microduritatea medie a matricei metalice ca element ce integrează duritatea soluției solide, a eutecticului și a fazelor dure precipitate primar.

7.4. Concluzii:

- Cu creșterea proporției de carburi depuse în strat are loc o diminuare a fenomenelor de precipitare din fază lichidă sau solidă, fie ca urmare a scăderii duratei de viață a băii metalice fie ca urmare a micșorării timpului de răcire în între 800 și 500 °C;
- În aliajele cu baza nichel are loc o precipitare a unor carburi complexe conținând wolfram care preiau integral carbonul rezultat din topirea carburilor, iar matricea nu suferă în urma îmbogățirii în carbon;
- Rezistența la uzare crește rapid cu creșterea adaosului de carbură de wolfram la aliajele cu baza fier datorită efectului de durificare rapidă a matricei prin îmbogățirea în carbon și nu datorită creșterii densității fazelor dure pe interfața depunere – mediu abraziv;
- Creșterea rezistenței la uzare a aliajelor cu baza nichel este cvasi-proporțională cu adaosul de carburi;
- Rezistența la uzare abrazivă în sisteme tribologice cu trei componente de tipul celor simulate prin încercarea ASTM G 65 a aliajului P 40 este superioară celorlalte aliaje testate, dar tenacitatea depunerilor este mai redusă;
- Se poate constata scăderea pierderilor volumice este bruscă la adaosuri reduse de carbură de wolfram. Cauza pare să fie solubilitatea redusă a carbonului în austenită, fapt ce duce la precipitarea rapidă de faze dure și creșterea în consecință a rezistenței la uzare a depunerilor;
- Pierderea de masă la încercarea de uzare abrazivă scade monoton la creșterea durității suprafeței și durității medii a matricei metalice a depunerilor realizate cu aliajul P 40, în timp ce relația cu duritatea soluției solide nu este evidentă.

CONTRIBUȚII PERSONALE

Contribuțiile personale ale autorului privesc atât elemente teoretice legate de abordarea sistemică a tehnologiei straturilor subțiri, în particular acoperirea cu arc de plasmă transferat cu pulberi (PTA), cât și elemente legate de factorii ce afectează calitatea depunerilor și proprietățile microstructurale și structura fină a unor depuneri compozite cu matrice metalică armate cu faze dure după cum urmează:

Aspecte de ordin funcțional și asigurare a calității depunerilor:

- Dezvoltarea unui algoritm de selecție al procedeelor de realizare al straturilor funcționale pe baze criteriale, pe baza caracteristicilor esențiale ale materialelor de formare a substratului și stratului, efectului termic al procedeelor de acoperire și interacțiunea elementelor care formează sistemul compozit. Algoritmul menționat pornește de la caracteristici funcționale ale principalelor familii de materiale utilizate în practica industrială curentă, de la relațiile cunoscute dintre natura materialului funcțional și proprietățile de exploatare esențiale pe care le asigură acesta, respectiv caracteristici tehnologice esențiale ale procedeelor de acoperire;
- Decelarea și evaluarea principalului factor care controlează calitatea procedurii - diluția - și evaluarea principalilor factori tehnologici asupra evoluției diluției prin utilizarea metodei factoriale reduse, respectiv factorii cu efect pozitiv (debit de pulbere, debit de gaz de transport) și negativ (debitul de gaz plasmagen, curentul în arcul transferat și viteza de sudare). Cunoașterea factorilor de influență primari permite inginerului coordonator al sudării să deceleze rapid cauzele scăderii caracteristicilor compoziționale (modificări datorate diluției) ale straturilor funcționale depuse și să corecteze cu promptitudine erorile apărute, în scopul reducerii costurilor prin reducerea la minim a cantității de material funcțional necesare realizării stratului funcțional;
- Decelarea factorilor ce duc la fenomenele de segregare a fazelor dure și derularea unor experimente în sensul optimizării parametrilor de regim pentru diferite proporții de faze dure în amestecurile de pulberi. Cunoașterea și controlarea factorilor care guvernează mecanismele de segregare a fazelor dure permite stabilirea rapidă a parametrilor care asigură o depunere omogenă, respectiv eliminarea eficientă a cauzelor segregățiilor;
- Este posibilă realizarea de depuneri folosind aliaje ferito-martensitice cu adaosuri de faze dure de tipul carburilor de wolfram. Comportarea la sudare în condițiile adaosului de carbon (rezultat din topirea fazelor dure) a aliajelor ferito-martensitice este excelentă;
- S-au determinat capacitățile diferitelor aliaje formatoare de matrice de a prelua faze dure în amestec. S-a stabilit că aliajele de tip ferito-martensitic au, comparativ cu aliajele crom – nichel cu baza de fier studiate, o capacitate de preluare mai ridicată a carbonului rezultat din topirea fazelor dure, dar nu se ridică la nivelul aliajelor cu baza nichel utilizate în mod tradițional în aceste aplicații;

Aspecte de ordin microstructural:

- Limita maximă a adaosului de WSC în aliajul ledeburitic P 40 este de aproximativ 65% masice; depășirea limitei maxime creează probleme legate de antrenarea amestecului de pulberi, întreruperea continuității matricei metalice în depunerea realizată, tendința de fierbere a băii metalice, precum și pierderi ridicate de pulberi determinate de comportarea aerodinamică a amestecului de pulberi;
- Adaosul de faze dure induce modificări morfologice legate de densitatea și dimensiunile precipitărilor prezente în depunere și precum și extinderea regiunilor cu soluție solidă și eutectic. Cauza acestui fenomen este creșterea proporției de carbon în matricea depunerii, care depășește proporția de carbon prezentă în aliajul matricei inițial și intensifică formarea fazelor și constituenților cu proporție de carbon ridicată;
- Riscul de segregare (sedimentare a fazelor dure) al depunerilor este mai redus la utilizarea aliajelor fero-martensitice decât în cazul depunerilor realizate folosind pulberea matrice ledeburitică P 40 și este coroborată cu o tendința de fisurare a depunerilor mai redusă;
- La realizarea depunerilor folosind aliaje ferito-martensitice are loc o schimbare morfologică care face ca depunerile având ca bază aliaje ferito-martensitice să prezinte un caracter (aspect microscopic) ledeburitic. Modificarea de aspect este pusă pe seama îmbogățirii matricei în carbon, cu un pronunțat efect austenitizant;
- Este posibilă realizarea de depuneri folosind amestecuri a diferite faze dure într-o matrice ledeburitică cu conținut ridicat de carbon. Realizarea unui amestec de faze dure cu densitate mult diferită (aici, TiC - densitate redusă și WC – densitate ridicată) limitează fenomenele de segregare a fazelor dure cu densitate ridicată ($WC+W_2C$) prin apariția unor fenomene de susținere a WSC prin creșterea densității de particule. Densitatea de particule a fost mărită suplimentar de precipitarea primară foarte fină a carburilor de TiC, cu o stabilitate termică ridicată;
- Creșterea proporției particulelor de faze dure în amestecul de pulberi limitează puterea arcului transferat pe considerentul evitării îmbogățirii excesive a matricei în carbon, fapt ce se poate reflecta la extrem în apariția de faze dure sau particule de pulbere metalică netopite în volumul depunerii;
- Creșterea densității particulelor de faze dure mărește probabilitatea formării punților de carburi, cu efecte negative asupra sudabilității amestecurilor (aici - capacitatea de a fi depuse prin sudare) și caracteristicilor de exploatare ale depunerilor, indiferent de regimul tehnologic. Realizarea de punți între fazele dure creează condițiile apariției de zone cu fragilitate ridicată, cu rezistență scăzută la oboseală;

Aspecte de ordin sclerometric

- Duritatea soluției solide și a eutecticului la depunerile realizate cu pulberea P 40 și W 1.4115 în adaos cu faze dure de tipul carburii de wolfram topite și sfărâmate crește cu proporția de faze dure în amestecul de pulberi topite pe parcursul procesului de sudare;
- Duritatea suprafeței depunerilor (HV 30) crește cu proporția fazelor dure introduse în amestecul de pulberi dar nu există o corelație strict liniară între duritatea matricei și proporția de carburi introdusă în amestec;
- Independent de aliajul formator de matrice cu baza fier, la creșterea proporției de carbură apare un fenomen de creștere cvasi-continuu a microdurității matricei

metalice datorat creșterii intensității precipitărilor de faze dure atât sub formă primară, cât și secundară sau în eutectic;

- Indiferent de valoarea parametrului de revenire la sensibilizarea depunerilor realizate cu aliajul formator de matrice P 40, duritatea matricei metalice crește cu proporția de faze dure în amestecul de pulberi la un timp de sensibilizare constant, iar microduritatea matricei crește proporțional cu proporția de carbură metalică;
- Principalii factori de influență ai macrodurității depunerilor realizate prin procedeul PTA sunt proporția de carburi, curentul de sudare, debitul de pulbere și debitul de gaz plasmagen;
- Efectul vitezei de sudare este puțin semnificativ deoarece gradul de topire al fazelor dure este determinat în mod primordial de puterea arcului (topirea carburilor pe parcursul zborului liber în arc transferat) și nu de durata de viață a băii metalice, afectată de viteza de sudare;
- Parametrii cu efect pozitiv asupra durității sunt curentul de sudare și proporția de carburi. Efectul menționat are ca și cauză creșterea puterii arcului transferat, respectiv creșterea cantității de căldură preluate în condiții identice de putere a arcului de către fazele dure, ce se regăsește într-o topire mai avansată a acestora;
- Parametrii cu efect negativ asupra durității sunt debitul de gaz plasmagen și debitul de pulbere și sunt determinați de înrăutățirea condițiilor de transfer termic dintre arc transferat și amestecul de pulberi;

Aspecte privind structura fină a depunerilor

- Principalele faze dure ce se regăsesc în volumul matricei metalice sunt soluția solidă Fe_γ , precum și carburi complexe de tipul MC , M_2C , M_4C , $M_{23}C_6$ și M_6C . Formarea lor este determinată de condițiile de răcire în procesul de sudare și se află în afară de echilibru
- Punerea în soluție a carburilor începe la temperatura de $800\text{ }^\circ\text{C}$, la timpi de sensibilizare de peste 5 ore. Fenomenele de punere în soluție se regăsesc în modificarea aspectului microstructural al secțiunii depunerilor;
- Efectul tratamentului termic de sensibilizare asupra microdurității matricei depunerilor armate cu faze dure este foarte complex și nu poate fi evaluat printr-o funcție matematică de tip liniar sau polinomial;
- Carburile precipitate primar din topitură (baia metalică) și dezvoltate epitaxial pe limitele carburilor netopite sunt de tip M_4C și au o proporție ridicată de wolfram;
- Carburile precipitate secundar din matricea metalică sunt carburi complexe cu stabilitate termică redusă ale elementelor carburigene prezente în topitură de tip M_4C ;
- Carburile formate prin precipitare primară nu conțin sau conțin o proporție redusă de crom;
- Efectul tratamentului de sensibilizare se regăsește în modificarea proporției elementelor carburigene în compoziția fazelor precipitate examinate și se bazează pe mecanismele difuzionale activate de tratamentul termic.
- În urma tratamentului termic de sensibilizare, toate fazele dure examinate au conținut diferite proporții de crom. Valorile înregistrate au fost mai ridicate decât cele

înregistrate la probele în stare sudate, iar cromul și-a făcut apariția în fazele dure care în stare sudată nu conțin acest element;

- La tratamentul termic au loc fenomene de transformare a carburilor instabile termodinamic precipitate din matrice de tipul M_4C la forme mai stabile de tipul M_6C ;
- Suplimentar modificărilor morfologice, tratamentul termic de sensibilizare induce modificări substanțiale în ceea ce privește aspectul microstructural al depunerilor realizate.

Aspecte privind rezistența la uzare abrazivă a depunerilor

- Creșterea proporției de carburi depuse în strat duce la diminuarea fenomenelor de precipitare din fază lichidă sau solidă și este determinată de necesitatea scăderii puterii arcului de plasmă transferat ca urmare a scăderii duratei de viață a băii metalice fie ca urmare a micșorării timpului de răcire între 800 și 500 °C;
- În aliajele cu baza nichel are loc o precipitare a unor carburi complexe conținând wolfram care preiau integral carbonul rezultat din topirea carburilor, iar matricea nu suferă fenomene de durificare în urma îmbogățirii în carbon. Cauza fenomenului menționat este solubilitatea deosebit de redusă a carbonului în aliajele nichelului, precum și absența unor mecanisme de formare a carburilor de către componenta de formare a matricei metalice – nichelul;
- La aliajele cu baza fier, rezistența la uzare abrazivă cu trei corpuri crește rapid cu creșterea adaosului de carbură de wolfram pe seama efectului pronunțat de durificare rapidă a matricei metalice prin creșterea intensității precipitării primare și secundare de carburi complexe pe seama îmbogățirii în carbon, și mai apoi, la proporții ridicate de faze dure în amestec datorită creșterii densității fazelor dure pe interfața depunere – mediu abraziv;
- Creșterea rezistenței la uzare a aliajelor cu baza nichel este cvasi-proportională cu adaosul de carburi și este determinată de creșterea durității suprafeței acestora (interfața depunere – mediu abraziv) și nu de durificarea matricei metalice prin creșterea extinderii zonelor cu aspect eutectic;
- Rezistența la uzare abrazivă (pierderea de masă) în sisteme tribologice cu trei componente de tipul celor simulate prin încercarea ASTM G 65 a aliajului P 40 este superioară celorlalte aliaje cu baza de fier testate, dar tenacitatea depunerilor este mai redusă și este determinată probabil de gradul deosebit de ridicat de extindere al precipitărilor de faze dure în volumul matricei metalice;
- Scăderea pierderilor volumice este bruscă la adaosuri reduse de carbură de wolfram datorită solubilității reduse a carbonului în austenită, ceea ce duce la precipitarea rapidă de faze dure (carburi complexe) și creșterea rezistenței la uzare a depunerilor prin durificarea matricei metalice a depunerii;
- Pierderea de masă la încercarea de uzare abrazivă scade monoton la creșterea durității suprafeței și durității medii a matricei metalice a depunerilor realizate cu aliajul P 40, în timp ce relația cu duritatea soluției solide nu este evidentă.

ANEXA 1. MATERIALE UTILIZATE ÎN PROGRAMUL EXPERIMENTAL

1. Pulbere P 40

Producător: Höganäs AB, Suedia

Granulație: 63 – 210 mm

Compoziția chimică pe șarjă:

| Analiza chimică | Rezultatele măsurătorilor |
|-----------------|---------------------------|
|-----------------|---------------------------|

| | |
|------------------|---------|
| C | 2,27 % |
| Si | 1,06 % |
| B | <0,01 % |
| Fe | Rest % |
| Cr | 24,42 % |
| Ni | 10,97 % |
| Co | 0,03 % |
| Mo | 0,62 % |
| Mn | 0,31 % |
| S | 0,016 % |
| P | 0,010 % |
| N | 0,042 % |
| O _{tot} | 0,008 % |

Proprietăți fizice

| | |
|--------------------|------|
| Densitate aparentă | 3,98 |
|--------------------|------|

| | |
|-----------------|--------------|
| Curgerea (Hall) | 18 sec/50 gr |
|-----------------|--------------|

| Analiza granulometrică | |
|------------------------|--|
|------------------------|--|

| | |
|-----------|--------|
| +300 | 0,0 % |
| +250 | 0,0 % |
| +208 | 1,7 % |
| 180 – 208 | 16,7 % |
| 150 – 180 | 20,0 % |
| 125 – 150 | 18,0 % |
| 106 – 125 | 9,7 % |
| 71 – 106 | 27,2 % |
| 63 – 71 | 6,0 % |
| 53 – 63 | 0,7 % |
| 45 – 53 | 0,0 % |
| 36 – 45 | 0,0 % |
| 20 – 36 | 0,0 % |
| - 20 | 0,0 % |

2. Pulbere: W 1.4115

Producător: Höganäs AB. Suedia

Granulație: 53 – 200 mm

Compoziția chimică pe șarjă:

| Analiza chimică | Rezultatele măsurătorilor | |
|------------------|---------------------------|---|
| C | 0,20 | % |
| Si | 0,46 | % |
| B | <0,01 | % |
| Fe | Rest | % |
| Cr | 16,91 | % |
| Ni | 0,76 | % |
| Mo | 1,13 | % |
| Mn | 0,62 | % |
| S | 0,003 | % |
| P | 0,018 | % |
| O _{tot} | 0,043 | % |

Proprietăți fizice

Densitate aparentă 4,31

Curgerea (Hall) 14 sec/50 gr

| Analiza granulometrică | | |
|------------------------|------|---|
| +200 | 0,0 | % |
| 180 – 200 | 1,0 | % |
| 150 – 180 | 10,4 | % |
| 125 – 150 | 21,8 | % |
| 106 – 125 | 17,2 | % |
| 71 – 106 | 42,4 | % |
| 63 – 71 | 6,3 | % |
| 53 – 63 | 0,7 | % |
| -53 | 0,2 | % |

3. Pulberea WSC

Producător: WOKA GmbH, Germania

Granulație: 63 – 180 mm

Compoziția chimică pe șarjă:

| | | |
|------------|------|---|
| C | 3,93 | % |
| Fe | 0,20 | % |
| W | Rest | % |
| impurități | 0,25 | % |

Proprietăți fizice

| | |
|-------------------------------|----------------|
| Densitate aparentă | 7,71 |
| Densitate aparentă compactată | 9,09 |
| Curgerea (Hall) | 9,84 sec/50 gr |
| Distribuția granulometrică | |

| | | |
|-------|-------|---|
| + 180 | 0,0 | % |
| + 160 | 0,10 | % |
| + 63 | 99,47 | % |
| - 63 | 0,43 | % |

ANEXA 2. PARAMETRI DE REGIM LA ÎNCĂRCAREA PRIN SUDARE ÎN ARC DE PLASMĂ CU PULBERI

1. Depuneri realizate pe generatoare cu introducere internă a pulberilor

| Proba | Gaze | | | Arc | | Pendulare | | | Altele | | | Observații | |
|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------|----------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|------------|-----------------------|
| | V _{plasma} l/min | V _{transp} l/min | V _{prot} l/min | I _{pil} A | I _{pl} A | U _a V | H mm | b _p mm | f _p min ⁻¹ | vs cm/min | mp gr/min | | T _{pr} °C |
| | | | | | | | | | | | | | |
| P 40 | 3 | 6 | 6 | 30 | 140 | 27,5 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 65 | - | 1, 2 |
| P 40 | 4 | 6 | 6 | 30 | 140 | 27,5 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 65 | - | |
| P 40 | 2,5 | 6 | 6 | 30 | 150 | | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | 1 |
| P 40 | 3 | 6 | 6 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 50 | - | |
| P 40 | 3,5 | 3 | 8 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 50 | - | 1 |
| P 40+25%WSC | 4 | 6 | 6 | 30 | 150 | 30 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | 3 |
| P 40+25%WSC | 2,5 | 6 | 6 | 30 | 150 | 30 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | 200 | |
| P 40+25%WSC | 2,5 | 4 | 6 | 30 | 120 | 30 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | |
| P 40+40%WSC | 4 | 6 | 6 | 30 | 150 | 30 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | 3 |
| P 40+40%WSC | 2,5 | 6 | 6 | 30 | 150 | 30 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | 200 | |
| P 40+40%WSC | 2,5 | 6 | 6 | 30 | 150 | 30 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | |
| P 40+40%WSC | 2,5 | 6 | 6 | 30 | 150 | 30 | 10 | 23 | 29 | 10,14 | 50 | - | 3 |
| P 40+40%WSC | 4 | 6 | 6 | 40 | 150 | 30 | 10 | 23 | 35 | 7,8 | 50 | - | 2 |
| P 40+40%WSC | 2 | 4 | 6 | 40 | 120 | 30 | 10 | 23 | 35 | 7,8 | 50 | - | 2 |
| P 40+40%WSC | 2 | 4 | 6 | 40 | 120 | 30 | 10 | 23 | 35 | 7,8 | 50 | - | 2 |
| P 40+55%WSC | 4 | 6 | 6 | 40 | 150 | 30 | 10 | 23 | 35 | 7,8 | 50 | - | 3 |
| P 40+55%WSC | 2 | 4 | 6 | 40 | 120 | 30 | 10 | 23 | 35 | 7,8 | 50 | - | 2 |
| P 40+55%WSC | 2 | 4 | 6 | 40 | 120 | 30 | 10 | 23 | 35 | 7,8 | 50 | - | 2 |
| P 40+65%WSC | 3,5 | 3 | 8 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 50 | - | 3,4 |
| P 40+65%WSC | 2 | 3 | 8 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 62 | - | 5 |
| P 40+65%WSC | 2,5 | 2 | 8 | 30 | 110 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 62 | - | |

| Proba | Gaze | | | Arc | | | Pendulare | | | | Altele | | | Observații |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------|----------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|---|------------|
| | V _{plasma} l/min | V _{transp} l/min | V _{prot} l/min | I _{pil} A | I _{pl} A | U _a V | H mm | b _p mm | f _p min ⁻¹ | vs cm/min | mp gr/min | T _{pr} °C | | |
| | W 1.4115 | 4 | 8 | 6 | 30 | 150 | 36 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 65 | - | |
| W 1.4115 | 4 | 8 | 6 | 30 | 140 | 36 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 65 | - | | |
| W 1.4115 | 3 | 8 | 6 | 30 | 140 | 36 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 65 | - | | |
| W 1.4115+25%WSC | 3 | 6 | 10 | 30 | 140 | 38 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | | |
| W 1.4115+25%WSC | 3 | 6 | 10 | 30 | 140 | 38 | 10 | 23 | 39 | 10,14 | 50 | - | | |
| W 1.4115+25%WSC | 2,5 | 6 | 8 | 30 | 120 | 38 | 10 | 23 | 33 | 7,8 | 50 | - | | |
| W 1.4115+40%WSC | 3 | 6 | 10 | 30 | 140 | 38 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | | |
| W 1.4115+40%WSC | 3 | 6 | 10 | 30 | 140 | 38 | 10 | 23 | 39 | 10,14 | 50 | - | | |
| W 1.4115+40%WSC | 2,5 | 6 | 8 | 30 | 120 | 38 | 10 | 23 | 33 | 7,8 | 50 | - | | |
| W 1.4115+40%WSC | 4 | 6 | 8 | 30 | 120 | 38 | 10 | 23 | 33 | 7,8 | 50 | - | | |
| W 1.4115+55%WSC | 3 | 6 | 10 | 30 | 140 | 38 | 10 | 23 | 32 | 7,8 | 50 | - | | |
| W 1.4115+55%WSC | 3 | 6 | 10 | 30 | 140 | 38 | 10 | 23 | 39 | 10,14 | 50 | - | | |
| W 1.4115+55%WSC | 2,5 | 6 | 8 | 30 | 120 | 38 | 10 | 23 | 33 | 7,8 | 50 | - | | |
| Mix 1 | 2,5 | 2,5 | 8 | 30 | 110 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 62 | - | | |
| Mix 1 | 2,5 | 2,5 | 8 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 44,3 | - | | |
| Mix 1 | 2,5 | 2,5 | 8 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 8 | 44,3 | - | | |
| Mix 2 | 2,5 | 2,5 | 8 | 30 | 100 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 47 | - | | |
| Mix 2 | 2,5 | 2,5 | 8 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 9 | 47 | - | | |
| Mix 2 | 2,5 | 2,5 | 8 | 30 | 120 | | 10 | 23 | 32 | 11 | 47 | - | | |

2. Depuneri realizate pe generatoare cu introducere externă a pulberilor

| Proba | Gaze | | | Arc | | | Pendulare | | | Altele | | | Observații |
|----------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------|----------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|------------|
| | V _{plasma} l/min | V _{transp} l/min | V _{prot} l/min | I _{pil} A | I _{pl} A | U _a V | H mm | b _p mm | f _p min ⁻¹ | vs cm/min | mp gr/min | T _{pr} °C | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| P 40+25%WSC | 6 | 5 | 8 | 5 | 160 | 34 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+25%WSC | 6 | 5 | 8 | 5 | 220 | 36 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F, 5 |
| P 40+25%WSC | 5 | 6 | 8 | 5 | 240 | 34 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+25%WSC | 5 | 6 | 8 | 5 | 180 | 34 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F, 2, 5 |
| P 40+25%WSC | 6 | 6 | 8 | 5 | 250 | 38 | 14 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+25%WSC | 6 | 6 | 8 | 5 | 250 | 35 | 14 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+25%WSC | 6 | 5 | 8 | 5 | 250 | 34 | 14 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+25%WSC | 6 | 4 | 8 | 5 | 250 | 34 | 14 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+25%WSC | 6 | 4 | 8 | 5 | 300 | 32 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | S |
| P 40+25%WSC | 6 | 4 | 8 | 5 | 300 | 32 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+40%WSC | 6 | 4 | 8 | 5 | 250 | 32 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+40%WSC | 6 | 4 | 8 | 5 | 250 | 32 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F, 5 |
| P 40+40%WSC | 6 | 4 | 8 | 5 | 250 | 34 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| P 40+40%WSC | 6 | 6 | 8 | 5 | 240 | 32 | 10 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F, 2, 5 |
| P 40+40%WSC | 4 | 6 | 8 | 5 | 240 | 32 | 14 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| W1.4115+40%WSC | 4 | 6 | 8 | 5 | 240 | 30 | 14 | 23 | 23 | 10 | 50 | - | F |
| W1.4115+40%WSC | 4 | 6 | 8 | 5 | 160 | 30 | 14 | 23 | 23 | 7 | 50 | - | S |
| W1.4115+40%WSC | 4 | 5 | 8 | 5 | 160 | 30 | 14 | 23 | 23 | 6 | 50 | - | F |
| W1.4115+40%WSC | 5 | 5 | 8 | 5 | 190 | 29 | 14 | 23 | 23 | 6 | 50 | - | S |
| W1.4115+40%WSC | 5 | 5 | 8 | 5 | 190 | 29 | 8 | 23 | 23 | 6 | 50 | - | S, 2 |
| P 40+55%WSC | 4 | 6 | 8 | 5 | 210 | 28 | 8 | 23 | 26 | 8 | 65 | - | S, 2 |
| P 40+55%WSC | 4 | 6 | 8 | 5 | 220 | 29 | 12 | 23 | 28 | 8 | 65 | - | S, 3 |
| P 40+55%WSC | 3 | 4 | 8 | 5 | 220 | 27 | 12 | 23 | 28 | 9 | 65 | - | S, 5 |
| W1.4115+55%WSC | 4 | 4 | 8 | 5 | 220 | 27 | 10 | 23 | 19 | 9 | 65 | - | F, 5 |
| W1.4115+55%WSC | 4 | 6 | 8 | 5 | 220 | 27 | 10 | 23 | 19 | 9 | 65 | - | S, 5 |

| Proba | Gaze | | | Arc | | | Pendulare | | | Altele | | | Observații |
|----------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------|----------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------|------------|
| | V _{plasma} l/min | V _{transp} l/min | V _{prot} l/min | I _{pil} A | I _{pl} A | U _a V | H mm | b _p mm | f _p min ⁻¹ | vs cm/min | mp gr/min | T _{pr} °C | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| W1.4115+55%WSC | 5 | 4 | 8 | 5 | 220 | 27 | 10 | 23 | 22 | 7 | 65 | - | F, 5 |
| W1.4115+25%WSC | 4 | 4 | 8 | 5 | 260 | 30 | 12 | 23 | 22 | 7 | 50 | - | S |
| W1.4115+25%WSC | 4 | 6 | 8 | 5 | 230 | 30 | 12 | 23 | 22 | 5 | 50 | - | S, 2 |
| W1.4115+25%WSC | 5 | 4 | 8 | 5 | 230 | 28 | 10 | 23 | 22 | 7 | 50 | - | F, 6 |
| W1.4115+25%WSC | 3 | 4 | 8 | 5 | 260 | 28 | 10 | 23 | 22 | 8 | 50 | - | S, 6 |

- 1: Topitură vâscoasă
- 2: Pătrundere exagerată
- 3: Baia metalică fierbe
- 4: Fisuri
- 5: Pierderi ridicate de pulbere
- 6: Porozitate

ANEXA 3 MĂSURĂTORI CANTITATIVE FOLOSIND MICROSONDA ELECTRONICĂ

Fază intermetalică pe limita carburii netopite, procente masice

| nr, crt | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|---------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 1 | 2,322 | 0,042 | 3,608 | 18,501 | 0,122 | 6,547 | 0,791 | 65,701 | 1,108 | 98,750 |
| 2 | 2,313 | 0,047 | 4,134 | 19,656 | 0,103 | 8,577 | 0,663 | 62,145 | 1,296 | 98,939 |
| 3 | 2,174 | 0,042 | 3,644 | 19,624 | 0,104 | 6,997 | 0,698 | 64,881 | 1,072 | 99,236 |
| 4 | 2,612 | 0,033 | 2,822 | 20,146 | 0,178 | 5,574 | 0,380 | 66,123 | 0,887 | 98,755 |
| 5 | 2,355 | 0,032 | 3,286 | 19,276 | 0,106 | 6,885 | 0,746 | 66,025 | 1,041 | 99,752 |

Fază intermetalică pe limita carburii netopite, procente atomice

| nr, crt | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|---------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | 17,317 | 0,177 | 5,480 | 29,543 | 0,198 | 11,228 | 0,735 | 31,685 | 3,513 | 100,00 |
| 2 | 13,398 | 0,126 | 6,008 | 29,969 | 0,160 | 14,045 | 0,588 | 28,782 | 3,929 | 100,00 |
| 3 | 16,009 | 0,115 | 5,490 | 31,081 | 0,167 | 11,903 | 0,643 | 31,215 | 3,376 | 99,999 |
| 4 | 19,197 | 0,090 | 4,243 | 31,840 | 0,287 | 9,462 | 0,350 | 31,745 | 2,787 | 100,001 |
| 5 | 17,249 | 0,088 | 4,924 | 30,370 | 0,170 | 11,651 | 0,648 | 31,600 | 3,263 | 99,999 |

Fază dură pe limită, carbură poligonală gri, media a patru măsurători

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab, std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0,3084 | 0,0110 | 1,18 | 0,05 | 2,239 | 0,081 | 16,743 | 0,644 |
| S | 0,0006 | 0,0001 | 7,78 | 0,46 | 0,041 | 0,006 | 0,113 | 0,016 |
| Ni | 0,0454 | 0,0040 | 2,75 | 0,10 | 3,669 | 0,352 | 5,474 | 0,441 |
| Fe | 0,2258 | 0,0055 | 1,32 | 0,05 | 19,264 | 0,537 | 30,241 | 0,654 |
| Mn | 0,0012 | 0,0001 | 4,90 | 0,08 | 0,109 | 0,009 | 0,174 | 0,017 |
| Cr | 0,0828 | 0,0100 | 2,28 | 0,13 | 7,252 | 0,904 | 12,207 | 1,257 |
| Mo | 0,0047 | 0,0003 | 5,22 | 0,13 | 0,725 | 0,056 | 0,663 | 0,062 |
| W | 0,5467 | 0,0191 | 1,00 | 0,00 | 64,688 | 1,762 | 30,866 | 1,415 |
| Si | 0,0108 | 0,0010 | 2,00 | 0,08 | 1,129 | 0,115 | 0,520 | 0,291 |
| | | | | | 99,169 | | 99,999 | |

Mijlocul WSC, faza de nuanță deschisă, procente masice

| | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | 3,359 | 0,035 | 0,000 | 0,144 | 0,000 | 0,003 | 0,056 | 96,185 | 0,028 | 99,814 |
| 2 | 3,315 | 0,032 | 0,000 | 0,074 | 0,000 | 0,000 | 0,042 | 96,115 | 0,013 | 99,591 |
| 3 | 3,270 | 0,016 | 0,000 | 0,097 | 0,027 | 0,010 | 0,153 | 96,829 | 0,023 | 100,425 |
| 4 | 3,340 | 0,037 | 0,140 | 0,705 | 0,000 | 0,020 | 0,092 | 94,904 | 0,015 | 99,253 |
| 5 | 3,280 | 0,058 | 0,000 | 0,531 | 0,015 | 0,000 | 0,033 | 95,262 | 0,062 | 99,241 |

Mijlocul WSC, faza de nuanță deschisă, procente atomice

| | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | 34,603 | 0,134 | 0,000 | 0,318 | 0,000 | 0,008 | 0,072 | 64,743 | 0,122 | 100,000 |
| 2 | 34,416 | 0,123 | 0,000 | 0,166 | 0,000 | 0,000 | 0,054 | 65,184 | 0,057 | 100,000 |
| 3 | 33,850 | 0,061 | 0,000 | 0,215 | 0,061 | 0,024 | 0,198 | 65,489 | 0,102 | 100,000 |
| 4 | 34,232 | 0,140 | 0,293 | 1,555 | 0,000 | 0,049 | 0,198 | 63,546 | 0,067 | 100,000 |
| 5 | 33,803 | 0,003 | 0,000 | 1,180 | 0,031 | 0,000 | 0,043 | 64,336 | 0,076 | 100,000 |

Media a cinci măsurători

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab, std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0,4304 | 0,0051 | 1,00 | 0,00 | 3,313 | 0,038 | 34,202 | 0,323 |
| S | 0,0005 | 0,0002 | 8,04 | 0,38 | 0,036 | 0,015 | 0,136 | 0,058 |
| Ni | 0,0004 | 0,0009 | 6,18 | 0,22 | 0,028 | 0,063 | 0,059 | 0,131 |
| Fe | 0,0040 | 0,0037 | 6,44 | 1,24 | 0,310 | 0,289 | 0,687 | 0,638 |
| Mn | 0,0001 | 0,0001 | 5,14 | 0,11 | 0,008 | 0,012 | 0,0149 | 0,028 |
| Cr | 0,0001 | 0,0001 | 11,86 | 0,45 | 0,007 | 0,009 | 0,016 | 0,021 |
| Mo | 0,0005 | 0,0003 | 9,32 | 0,15 | 0,075 | 0,049 | 0,097 | 0,063 |
| W | 0,9438 | 0,0109 | 0,90 | 0,00 | 95,860 | 0,772 | 64,660 | 0,761 |
| Si | 0,0003 | 0,0002 | 6,96 | 0,61 | 0,028 | 0,020 | 0,125 | 0,088 |
| | | | | | 99,665 | | 100,000 | |

Mijlocul WSC, faza de nuanță închisă, procente masice

| | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | 6,745 | 0,034 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 0,049 | 0,042 | 92,705 | 0,022 | 99,615 |
| 2 | 7,069 | 0,062 | 0,000 | 0,152 | 0,002 | 0,000 | 0,053 | 92,256 | 0,015 | 99,609 |
| 3 | 6,966 | 0,033 | 0,014 | 0,020 | 0,000 | 0,045 | 0,000 | 91,613 | 0,024 | 98,715 |
| 4 | 7,239 | 0,057 | 0,000 | 0,257 | 0,000 | 0,010 | 0,039 | 92,400 | 0,031 | 100,033 |
| 5 | 6,834 | 0,030 | 0,000 | 0,152 | 0,000 | 0,000 | 0,103 | 93,302 | 0,021 | 100,442 |

Mijlocul WSC, faza de nuanță închisă, procente atomice

| | C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | 55,534 | 0,098 | 0,000 | 0,024 | 0,000 | 0,088 | 0,088 | 47,144 | 0,073 | 100,002 |
| 2 | 53,695 | 0,176 | 0,000 | 0,249 | 0,004 | 0,004 | 0,000 | 45,779 | 0,047 | 100,000 |
| 3 | 53,618 | 0,096 | 0,022 | 0,033 | 0,000 | 0,000 | 0,080 | 46,070 | 0,080 | 99,999 |
| 4 | 54,132 | 0,160 | 0,000 | 0,414 | 0,000 | 0,000 | 0,018 | 45,140 | 0,100 | 100,000 |
| 5 | 52,591 | 0,085 | 0,000 | 0,252 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,904 | 0,069 | 100,000 |

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab, std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0,9265 | 0,0267 | 0,80 | 0,00 | 6,971 | 0,193 | 53,314 | 0,714 |
| S | 0,0006 | 0,0002 | 7,90 | 0,43 | 0,043 | 0,015 | 0,123 | 0,042 |
| Ni | 0,0000 | 0,0001 | 6,48 | 0,28 | 0,003 | 0,006 | 0,004 | 0,010 |
| Fe | 0,0015 | 0,0013 | 7,30 | 0,57 | 0,119 | 0,103 | 0,194 | 0,166 |
| Mn | 0,0000 | 0,0000 | 5,48 | 0,19 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,002 |
| Cr | 0,0002 | 0,0003 | 11,34 | 0,48 | 0,021 | 0,024 | 0,037 | 0,043 |
| Mo | 0,0003 | 0,0002 | 10,04 | 0,48 | 0,047 | 0,037 | 0,045 | 0,036 |
| W | 0,8993 | 0,0081 | 0,90 | 0,00 | 92,455 | 0,619 | 46,207 | 0,822 |
| Si | 0,0002 | 0,0001 | 7,50 | 0,20 | 0,023 | 0,006 | 0,074 | 0,019 |
| | | | | | 99,683 | | 100,000 | |

Matrice, respectiv dendrite deschise și închise la culoare, procente masice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total | Obs, |
|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|--------------------|
| 1,036 | 0,007 | 8,503 | 74,188 | 0,387 | 9,391 | 0,055 | 7,154 | 1,074 | 101,795 | zona trecere |
| 1,165 | 0,025 | 8,041 | 73,275 | 0,332 | 8,481 | 0,133 | 7,014 | 1,014 | 99,480 | |
| 1,084 | 0,009 | 7,346 | 75,801 | 0,461 | 8,307 | 0,176 | 5,653 | 1,030 | 99,867 | |
| 1,135 | 0,009 | 8,174 | 71,382 | 0,407 | 8,706 | 0,156 | 9,005 | 0,972 | 99,946 | |
| 1,171 | 0,012 | 7,272 | 74,092 | 0,406 | 7,512 | 0,087 | 8,336 | 0,975 | 99,803 | |
| 1,185 | 0,013 | 7,585 | 73,087 | 0,379 | 8,364 | 0,206 | 7,758 | 1,062 | 99,639 | zona |
| 1,519 | 0,002 | 7,464 | 74,334 | 0,438 | 9,751 | 0,137 | 6,202 | 0,979 | 100,826 | tranz inf |
| 0,951 | 0,005 | 14,233 | 65,571 | 0,435 | 11,382 | 0,211 | 5,567 | 1,420 | 99,775 | mijloc dendrite |
| 0,938 | 0,005 | 14,148 | 64,225 | 0,422 | 12,353 | 0,109 | 5,821 | 1,418 | 99,439 | |
| 0,788 | 0,008 | 14,391 | 62,820 | 0,396 | 12,151 | 0,238 | 6,450 | 1,664 | 98,906 | |
| 0,689 | 0,000 | 14,914 | 64,163 | 0,405 | 11,128 | 0,157 | 5,999 | 1,678 | 99,133 | zona tranz sup |
| 0,943 | 0,010 | 13,468 | 63,976 | 0,424 | 12,246 | 0,215 | 5,970 | 1,494 | 98,746 | |
| 0,876 | 0,000 | 13,157 | 63,426 | 0,405 | 11,701 | 0,123 | 7,023 | 1,583 | 98,294 | lîngă |
| 0,935 | 0,000 | 13,231 | 63,868 | 0,400 | 11,490 | 0,181 | 7,081 | 1,545 | 98,731 | zona tranz |
| 1,157 | 0,000 | 8,060 | 71,940 | 0,376 | 7,972 | 0,179 | 8,424 | 1,017 | 99,125 | |
| 1,146 | 0,010 | 7,558 | 72,611 | 0,425 | 7,514 | 0,156 | 9,686 | 0,961 | 100,056 | |

Matrice, respectiv dendrite deschise și închise la culoare, procente atomice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total | Obs, |
|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|------|
| 4,725 | 0,012 | 7,936 | 71,786 | 0,386 | 9,896 | 0,032 | 2,132 | 2,096 | 99,001 | |
| 5,415 | 0,043 | 7,645 | 73,234 | 0,337 | 9,104 | 0,077 | 2,130 | 2,016 | 100,001 | |
| 4,986 | 0,016 | 6,911 | 74,973 | 0,463 | 8,825 | 0,102 | 1,698 | 2,026 | 99,001 | |
| 5,332 | 0,015 | 7,856 | 72,124 | 0,418 | 9,448 | 0,092 | 2,764 | 1,952 | 99,001 | |
| 5,482 | 0,022 | 6,962 | 74,569 | 0,416 | 8,120 | 0,051 | 2,546 | 1,831 | 99,001 | |
| 5,519 | 0,022 | 7,230 | 73,242 | 0,386 | 9,003 | 0,120 | 2,362 | 2,115 | 99,999 | |
| 4,987 | 0,003 | 6,971 | 71,910 | 0,421 | 10,135 | 0,033 | 1,822 | 1,893 | 98,175 | |
| 4,385 | 0,008 | 13,425 | 65,022 | 0,438 | 12,123 | 0,122 | 1,677 | 2,800 | 100,000 | |
| 9,318 | 0,000 | 11,046 | 60,366 | 0,485 | 14,222 | 0,127 | 2,055 | 2,380 | 99,999 | |
| 4,343 | 0,008 | 13,405 | 63,969 | 0,427 | 13,215 | 0,063 | 1,761 | 2,808 | 99,999 | |
| 3,669 | 0,015 | 13,821 | 63,424 | 0,406 | 13,177 | 0,140 | 1,978 | 3,340 | 99,97 | |
| 3,231 | 0,000 | 14,305 | 64,701 | 0,415 | 12,053 | 0,092 | 1,838 | 3,365 | 100,000 | |
| 4,399 | 0,017 | 12,852 | 64,179 | 0,432 | 13,195 | 0,126 | 1,815 | 2,981 | 99,996 | |
| 4,143 | 0,000 | 12,726 | 64,493 | 0,418 | 12,799 | 0,073 | 2,169 | 3,200 | 100,021 | |
| 4,396 | 0,000 | 12,728 | 64,593 | 0,412 | 12,481 | 0,107 | 2,175 | 3,108 | 100,000 | |
| 5,453 | 0,000 | 7,775 | 72,951 | 0,388 | 8,683 | 0,106 | 2,595 | 2,050 | 100,001 | |
| 5,405 | 0,001 | 7,239 | 73,660 | 0,436 | 8,187 | 0,092 | 2,985 | 1,938 | 99,943 | |

Pct. 16-22, 31-32, matrice, zona de tranziție pe substrat (fără carburi), analiza a 9 puncte

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0,1658 | 0,0197 | 1,48 | 0,07 | 1,178 | 0,136 | 5,462 | 0,579 |
| S | 0,0001 | 0,0001 | 10,11 | 0,39 | 0,009 | 0,008 | 0,015 | 0,013 |
| Ni | 0,0757 | 0,0043 | 2,27 | 0,05 | 7,778 | 0,427 | 7,387 | 0,425 |
| Fe | 0,7429 | 0,0116 | 0,90 | 0,00 | 73,412 | 1,354 | 73,275 | 1,010 |
| Mn | 0,0041 | 0,0004 | 4,26 | 0,09 | 0,401 | 0,038 | 0,407 | 0,037 |
| Cr | 0,0980 | 0,0087 | 2,12 | 0,10 | 8,444 | 0,763 | 9,045 | 0,694 |
| Mo | 0,0011 | 0,0004 | 8,42 | 0,26 | 0,143 | 0,047 | 0,083 | 0,028 |
| W | 0,0496 | 0,0087 | 2,34 | 0,18 | 7,692 | 1,313 | 2,337 | 0,429 |
| Si | 0,0073 | 0,0004 | 2,46 | 0,05 | 1,003 | 0,051 | 1,190 | 0,096 |
| | | | | | 100,060 | | 100,000 | |

Pct. 23, 25 – 30: matrice, dendrite albe: mijlocul și porțiunea superioară

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0.1194 | 0.0141 | 1.66 | 0.008 | 0.874 | 0.100 | 4.085 | 0.453 |
| S | 0.0001 | 0.0001 | 10.49 | 0.29 | 0.004 | 0.004 | 0.007 | 0.007 |
| Ni | 0.1354 | 0.0063 | 1.74 | 0.05 | 13.935 | 0.661 | 13.323 | 0.600 |
| Fe | 0.6476 | 0.0081 | 0.90 | 0.00 | 64.007 | 0.845 | 64.340 | 0.530 |
| Mn | 0.0087 | 0.0001 | 1.11 | 0.11 | 0.113 | 0.115 | 6.131 | 0.617 |
| Cr | 0.1337 | 0.0052 | 1.84 | 0.05 | 11.779 | 0.476 | 12.718 | 0.507 |
| Mo | 0.0013 | 0.0004 | 8.29 | 0.37 | 0.176 | 0.049 | 0.103 | 0.029 |
| W | 0.0400 | 0.0039 | 2.54 | 0.11 | 6.273 | 0.594 | 1.917 | 0.196 |
| Si | 0.0111 | 0.0008 | 2.01 | 0.09 | 1.543 | 0.106 | 3.086 | 0.233 |
| | | | | | 99.003 | | 100.000 | |

Pct. 33 – 42, puncte albe, mici, în matrice, procente masice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total | Obs. |
|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------------------|
| 2.355 | 0.032 | 2.297 | 23.706 | 0.145 | 6.701 | 0.557 | 64.519 | 0.758 | 101.070 | Zona trecere inf. |
| 2.453 | 0.022 | 2.806 | 24.653 | 0.112 | 8.554 | 0.733 | 59.957 | 1.119 | 100.409 | |
| 2.403 | 0.031 | 2.355 | 23.370 | 0.191 | 7.338 | 0.755 | 63.397 | 0.858 | 100.698 | |
| 2.459 | 0.066 | 4.870 | 21.172 | 0.177 | 9.620 | 1.051 | 60.230 | 1.502 | 101.147 | mijloc |
| 2.392 | 0.052 | 4.106 | 26.104 | 0.171 | 8.504 | 1.427 | 55.691 | 1.373 | 99.820 | |
| 2.453 | 0.049 | 4.675 | 21.315 | 0.148 | 9.982 | 1.040 | 59.978 | 1.513 | 101.153 | |
| 2.472 | 0.043 | 3.764 | 20.603 | 0.157 | 8.967 | 0.962 | 61.133 | 1.287 | 99.388 | Zona trece sup. |
| 2.265 | 0.034 | 5.829 | 29.945 | 0.183 | 10.656 | 1.009 | 49.656 | 1.700 | 101.277 | |
| 2.473 | 0.027 | 3.917 | 20.794 | 0.142 | 9.435 | 1.057 | 60.458 | 1.268 | 99.571 | |
| 2.512 | 0.043 | 4.741 | 26.517 | 0.206 | 10.078 | 1.215 | 53.711 | 1.606 | 100.629 | |

Pct. 33 – 42, puncte albe, mici, în matrice, procente atomice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 16.674 | 0.084 | 3.328 | 36.097 | 0.225 | 10.960 | 0.494 | 29.843 | 2.296 | 100.001 |
| 16.546 | 0.056 | 3.873 | 35.763 | 0.166 | 13.328 | 0.619 | 26.420 | 3.229 | 100.000 |
| 16.848 | 0.081 | 3.379 | 35.349 | 0.292 | 11.885 | 0.633 | 29.039 | 2.573 | 100.001 |
| 16.391 | 0.166 | 6.640 | 30.349 | 0.259 | 14.811 | 0.877 | 29.226 | 4.282 | 100.001 |
| 15.660 | 0.127 | 5.500 | 36.764 | 0.244 | 12.864 | 1.170 | 23.825 | 3.846 | 100.000 |
| 16.306 | 0.122 | 6.357 | 30.468 | 0.215 | 15.325 | 0.866 | 26.042 | 4.300 | 100.001 |
| 17.094 | 0.112 | 5.326 | 30.644 | 0.237 | 14.325 | 0.833 | 27.621 | 3.806 | 100.000 |
| 13.720 | 0.078 | 7.223 | 39.088 | 0.242 | 14.910 | 0.765 | 19.649 | 4.404 | 99.999 |
| 16.948 | 0.070 | 5.492 | 30.648 | 0.213 | 14.936 | 0.907 | 27.067 | 3.718 | 99.999 |
| 15.775 | 0.100 | 6.092 | 35.821 | 0.288 | 14.622 | 0.955 | 22.039 | 4.313 | 100.000 |

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0.3296 | 0.0093 | 1.12 | 0.04 | 2.424 | 0.072 | 16.196 | 0.988 |
| S | 0.0006 | 0.0002 | 8.00 | 0.25 | 0.040 | 0.013 | 0.100 | 0.033 |
| Ni | 0.0470 | 0.0132 | 2.82 | 0.36 | 3.936 | 1.163 | 5.321 | 1.371 |
| Fe | 0.2729 | 0.0318 | 1.26 | 0.05 | 23.818 | 3.050 | 34.080 | 3.220 |
| Mn | 0.0018 | 0.0003 | 4.86 | 0.12 | 0.163 | 0.028 | 0.238 | 0.036 |
| Cr | 0.1016 | 0.0135 | 2.09 | 0.15 | 8.984 | 1.244 | 13.797 | 1.478 |
| Mo | 0.0065 | 0.0017 | 4.80 | 0.51 | 0.981 | 0.250 | 0.815 | 0.191 |
| W | 0.4858 | 0.0468 | 1.01 | 0.03 | 58.873 | 4.545 | 25.777 | 3.132 |
| Si | 0.0121 | 0.0027 | 1.95 | 0.24 | 1.298 | 0.311 | 3.677 | 0.750 |
| | | | | | 100.516 | | 100.000 | |

Pct. 43 – 51, puncte albe, W₂C în volumul WSC, procente masice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total | Obs. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|-------------------------|
| 3,354 | 0,061 | 0,000 | 0.235 | 0.000 | 0.188 | 0.017 | 95.607 | 0.034 | 99.426 | Zona trecere inf. |
| 3,364 | 0,059 | 0,000 | 0.188 | 0.000 | 0.010 | 0.059 | 95.244 | 0.024 | 98.948 | |
| 3,267 | 0,012 | 0,000 | 0.266 | 0.047 | 0.035 | 0.000 | 95.419 | 0.022 | 99.068 | |
| 3,297 | 0,040 | 0.199 | 1.609 | 0.011 | 0.284 | 0.006 | 94.580 | 0.053 | 100.079 | mijloc |
| 3,405 | 0,050 | 0.062 | 0.406 | 0.000 | 0.076 | 0.161 | 95.242 | 0.026 | 99.432 | |
| 3,355 | 0,062 | 0.045 | 0.215 | 0.000 | 0.121 | 0.110 | 95.985 | 0.030 | 99.253 | |
| 3,273 | 0,032 | 0.056 | 0.279 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 95.594 | 0.011 | 99.255 | Zona trece sup. |
| 3,275 | 0,037 | 0.205 | 0.467 | 0.004 | 0.017 | 0.048 | 95.426 | 0.020 | 99.499 | |
| 3,275 | 0,061 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.065 | 96.517 | 0.028 | 99.956 | |

Pct. 43 – 51, puncte albe, W₂C în volumul WSC, procente atomice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|
| 34.513 | 0.236 | 0.000 | 0.521 | 0.000 | 0.280 | 0.022 | 64.276 | 0.151 | 99.995 |
| 34.788 | 0.230 | 0.000 | 0.417 | 0.000 | 0.025 | 0.077 | 64.355 | 0.108 | 100.000 |
| 34.064 | 0.047 | 0.000 | 0.596 | 0.106 | 0.083 | 0.000 | 65.003 | 0.100 | 99.999 |
| 33.072 | 0.150 | 0.409 | 3.472 | 0.024 | 0.659 | 0.007 | 61.981 | 0.227 | 100.001 |
| 34.792 | 0.191 | 0.130 | 0.891 | 0.000 | 0.179 | 0.205 | 63.496 | 0.115 | 99.999 |
| 34.377 | 0.238 | 0.095 | 0.474 | 0.000 | 0.286 | 0.141 | 64.257 | 0.131 | 99.999 |
| 34.063 | 0.125 | 0.115 | 0.485 | 0.077 | 0.000 | 0.000 | 64.896 | 0.045 | 99.806 |
| 33.813 | 0.143 | 0.433 | 1.036 | 0.041 | 0.041 | 0.062 | 64.373 | 0.089 | 100.031 |
| 34.023 | 0.238 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.025 | 0.084 | 65.506 | 0.124 | 100.000 |
| | | | | | | | | | |

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0.4313 | 0.0068 | 1.00 | 0.00 | 3.319 | 0.052 | 34.167 | 0.537 |
| S | 0.0006 | 0.0002 | 7.92 | 0.38 | 0.046 | 0.017 | 0.178 | 0.067 |
| Ni | 0.0009 | 0.0012 | 6.11 | 0.30 | 0.063 | 0.083 | 0.132 | 0.173 |
| Fe | 0.0052 | 0.0060 | 6.12 | 1.03 | 0.407 | 0.470 | 0.892 | 1.011 |
| Mn | 0.0001 | 0.0002 | 5.26 | 0.14 | 0.008 | 0.015 | 0.018 | 0.034 |
| Cr | 0.0009 | 0.0011 | 10.42 | 1.21 | 0.075 | 0.091 | 0.175 | 0.212 |
| Mo | 0.0003 | 0.0003 | 9.31 | 0.31 | 0.052 | 0.055 | 0.066 | 0.070 |
| W | 0.9389 | 0.0079 | 0.90 | 0.00 | 95.513 | 0.534 | 64.249 | 1.027 |
| Si | 0.0003 | 0.0001 | 7.12 | 0.45 | 0.028 | 0.012 | 0.122 | 0.049 |
| | | | | | 99.510 | | 100.000 | |

Pct. 52 – 60, puncte albe, WC în volumul WSC, procente masice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total | Obs. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|-------------------------|
| 7,252 | 0.024 | 0.000 | 0.026 | 0.009 | 0.014 | 0.145 | 92.434 | 0.023 | 99.926 | Zona trecere inf. |
| 6,754 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0.117 | 92.766 | 0.021 | 99.686 | |
| 6,893 | 0.052 | 0.000 | 0.011 | 0.053 | 0.000 | 0.000 | 93.586 | 0.023 | 100.619 | |
| 6,876 | 0.041 | 0.048 | 0.187 | 0.000 | 0.035 | 0.000 | 92.839 | 0.000 | 100.026 | mijloc |
| 7,043 | 0.040 | 0.000 | 0.287 | 0.032 | 0.025 | 0.109 | 92.911 | 0.012 | 100.455 | |
| 6,892 | 0.059 | 0.000 | 0.133 | 0.047 | 0.007 | 0.000 | 92.762 | 0.029 | 99.929 | |
| 7,085 | 0.020 | 0.000 | 0.279 | 0.003 | 0.119 | 0.095 | 92.430 | 0.017 | 100.048 | Zona trece sup. |
| 6,878 | 0.049 | 0.001 | 0.165 | 0.000 | 0.070 | 0.089 | 93.433 | 0.021 | 100.706 | |
| 7,271 | 0.035 | 0.071 | 0.216 | 0.000 | 0.011 | 0.045 | 92.053 | 0.016 | 99.718 | |

Pct. 52 – 60, puncte închise, WC în volumul WSC, procente atomice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|
| 54.372 | 0.067 | 0.000 | 0.041 | 0.015 | 0.024 | 0.136 | 45.273 | 0.071 | 99.999 |
| 52.571 | 0.070 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.000 | 0.114 | 47.170 | 0.069 | 100.000 |
| 52.816 | 0.149 | 0.000 | 0.019 | 0.085 | 0.000 | 0.000 | 46.851 | 0.077 | 100.001 |
| 52.833 | 0.117 | 0.076 | 0.310 | 0.000 | 0.062 | 0.000 | 46.602 | 0.000 | 100.000 |
| 53.273 | 0.112 | 0.000 | 0.467 | 0.053 | 0.043 | 0.103 | 45.910 | 0.035 | 100.000 |
| 52.904 | 0.171 | 0.000 | 0.220 | 0.079 | 0.012 | 0.000 | 46.519 | 0.095 | 100.000 |
| 53.520 | 0.056 | 0.000 | 0.453 | 0.004 | 0.208 | 0.090 | 45.614 | 0.055 | 100.000 |
| 52.614 | 0.141 | 0.001 | 0.271 | 0.000 | 0.124 | 0.086 | 46.694 | 0.070 | 100.001 |
| 54.368 | 0.098 | 0.109 | 0.346 | 0.000 | 0.018 | 0.042 | 44.967 | 0.051 | 100.001 |

Pct. 52 – 60, puncte închise, WC în volumul WSC, procente atomice

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0.9299 | 0.0252 | 0.80 | 0.00 | 6.994 | 0.180 | 53.252 | 0.701 |
| S | 0.0005 | 0.0002 | 6.24 | 0.29 | 0.038 | 0.014 | 0.109 | 0.040 |
| Ni | 0.0002 | 0.0004 | 6.39 | 0.26 | 0.013 | 0.027 | 0.021 | 0.042 |
| Fe | 0.0018 | 0.0014 | 7.14 | 0.64 | 0.145 | 0.111 | 0.237 | 0.181 |
| Mn | 0.0002 | 0.0003 | 5.31 | 0.09 | 0.016 | 0.022 | 0.027 | 0.036 |
| Cr | 0.0004 | 0.0005 | 11.07 | 0.81 | 0.031 | 0.040 | 0.055 | 0.069 |
| Mo | 0.0004 | 0.0003 | 9.51 | 0.70 | 0.067 | 0.057 | 0.063 | 0.054 |
| W | 0.9037 | 0.0064 | 0.90 | 0.00 | 92.802 | 0.483 | 46.178 | 0.764 |
| Si | 0.0002 | 0.0001 | 7.69 | 0.25 | 0.018 | 0.008 | 0.059 | 0.027 |
| | | | | | 100.124 | | 100.000 | |

Pct. 61 – 69, carburi rotunde, procente masice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total | Obs. |
|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------------------------|
| 2.445 | 0.063 | 4.480 | 18.718 | 0.084 | 9.813 | 1.067 | 61.070 | 1.557 | 99.297 | Zona trecere inf. |
| 2.414 | 0.084 | 3.564 | 16.822 | 0.115 | 6.842 | 0.455 | 65.874 | 1.001 | 97.412 | |
| 2.367 | 0.028 | 4.434 | 18.497 | 0.061 | 9.029 | 0.791 | 62.141 | 1.383 | 98.731 | |
| 2.372 | 0.033 | 5.344 | 19.727 | 0.144 | 11.530 | 1.198 | 60.531 | 1.665 | 102.544 | mijloc |
| 2.349 | 0.051 | 4.743 | 19.015 | 0.108 | 10.673 | 1.176 | 58.577 | 1.664 | 98.356 | |
| 2.296 | 0.048 | 4.396 | 19.695 | 0.138 | 9.517 | 0.919 | 62.120 | 1.304 | 100.433 | |
| 2.380 | 0.047 | 4.916 | 19.531 | 0.135 | 11.221 | 1.019 | 59.421 | 1.571 | 100.241 | Zona trece sup. |
| 2.522 | 0.051 | 5.716 | 24.445 | 0.248 | 11.230 | 1.212 | 56.477 | 1.941 | 103.842 | |
| 2.335 | 0.027 | 3.919 | 18.587 | 0.132 | 8.256 | 1.025 | 62.146 | 1.379 | 97.806 | |

Pct. 61 – 69, carburi rotunde, procente atomice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 16.881 | 0.163 | 6.326 | 27.791 | 0.127 | 15.648 | 0.922 | 27.543 | 4.599 | 100.000 |
| 18.294 | 0.018 | 5.527 | 27.421 | 0.191 | 12.015 | 0.622 | 32.668 | 3.244 | 100.000 |
| 16.770 | 0.074 | 6.429 | 28.191 | 0.094 | 14.780 | 0.701 | 28.769 | 4.192 | 100.000 |
| 15.570 | 0.082 | 7.178 | 27.855 | 0.207 | 17.486 | 0.984 | 25.963 | 4.675 | 100.000 |
| 16.085 | 0.132 | 6.645 | 28.006 | 0.162 | 16.884 | 1.009 | 26.207 | 4.872 | 100.002 |
| 16.993 | 0.125 | 6.242 | 29.398 | 0.209 | 15.258 | 0.799 | 28.166 | 4.870 | 100.000 |
| 15.964 | 0.118 | 6.747 | 28.180 | 0.197 | 17.388 | 0.855 | 26.042 | 4.507 | 99.998 |
| 15.481 | 0.117 | 7.179 | 32.279 | 0.332 | 15.928 | 0.932 | 22.654 | 50.97 | 99.999 |
| 16.850 | 0.074 | 5.786 | 28.844 | 0.209 | 13.762 | 0.926 | 29.295 | 4.255 | 100.001 |

Pct. 61 – 69, carburi rotunde, procente atomice

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std. | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0.0218 | 0.0092 | 1.14 | 0.05 | 2.237 | 0.067 | 16.425 | 0.880 |
| S | 0.0006 | 0.0003 | 8.13 | 0.56 | 0.039 | 0.017 | 0.100 | 0.043 |
| Ni | 0.0559 | 0.0072 | 2.57 | 0.13 | 4.612 | 0.665 | 6.451 | 0.563 |
| Fe | 0.2244 | 0.0212 | 1.36 | 0.07 | 19.449 | 2.073 | 28.663 | 1.479 |
| Mn | 0.0014 | 0.0006 | 4.93 | 0.17 | 0.129 | 0.052 | 0.192 | 0.066 |
| Cr | 0.1107 | 0.0170 | 1.99 | 0.15 | 9.792 | 1.562 | 15.461 | 1.780 |
| Mo | 0.0066 | 0.0013 | 4.66 | 0.41 | 1.007 | 0.190 | 0.861 | 0.131 |
| W | 0.5077 | 0.0282 | 1.00 | 0.00 | 60.940 | 2.684 | 27.479 | 2.775 |
| Si | 0.0141 | 0.0023 | 1.78 | 0.15 | 1.496 | 0.268 | 4.368 | 0.560 |
| | | | | | 99.851 | | 100.000 | |

Pct. 70 - 78, dendrite albe, procente masice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total | Obs. |
|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|-------------------|
| 0.582 | 0.004 | 15.696 | 62.114 | 0.438 | 13.031 | 0.178 | 5.982 | 1.730 | 99.755 | Zona trecere inf. |
| 0.810 | 0.006 | 15.772 | 62.729 | 0.443 | 13.017 | 0.224 | 5.820 | 1.776 | 100.617 | |
| 0.751 | 0.014 | 15.166 | 62.609 | 0.437 | 13.716 | 0.240 | 5.741 | 1.729 | 100.403 | mijloc |
| 0.825 | 0.004 | 15.210 | 68.115 | 0.431 | 12.601 | 0.215 | 5.622 | 1.730 | 99.753 | |
| 0.820 | 0.007 | 14.525 | 62.132 | 0.482 | 13.100 | 0.209 | 5.795 | 1.769 | 99.839 | |
| 0.505 | 0.008 | 15.454 | 62.580 | 0.467 | 13.183 | 0.204 | 5.600 | 1.912 | 99.913 | Zona trece sup. |
| 0.585 | 0.013 | 15.206 | 60.709 | 0.486 | 12.627 | 0.252 | 6.803 | 1.649 | 98.330 | |
| 0.667 | 0.004 | 15.334 | 61.072 | 0.451 | 12.962 | 0.127 | 6.878 | 1.706 | 99.201 | |
| 0.707 | 0.000 | 15.285 | 61.383 | 0.471 | 13.614 | 0.193 | 6.331 | 1.777 | 99.761 | |

Pct. 70 - 78, dendrite albe, procente atomice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|
| 2.716 | 0.007 | 14.997 | 62.391 | 0.447 | 14.058 | 0.104 | 1.825 | 3.455 | 100.000 |
| 3.715 | 0.010 | 14.798 | 61.874 | 0.444 | 13.791 | 0.140 | 1.744 | 3.484 | 100.000 |
| 3.456 | 0.025 | 14.277 | 61.958 | 0.440 | 14.579 | 0.138 | 1.726 | 3.401 | 100.000 |
| 3.808 | 0.007 | 14.372 | 62.695 | 0.435 | 13.444 | 0.125 | 1.696 | 3.417 | 99.999 |
| 3.824 | 0.012 | 13.853 | 62.299 | 0.491 | 14.108 | 0.122 | 1.765 | 3.527 | 100.001 |
| 2.349 | 0.015 | 14.715 | 62.644 | 0.475 | 14.174 | 0.119 | 1.703 | 3.806 | 100.000 |
| 2.791 | 0.023 | 14.841 | 62.289 | 0.506 | 13.915 | 0.150 | 2.120 | 3.364 | 99.999 |
| 3.143 | 0.008 | 14.777 | 61.873 | 0.464 | 14.105 | 0.075 | 2.117 | 3.437 | 99.999 |
| 3.293 | 0.000 | 14.556 | 61.455 | 0.479 | 14.640 | 0.113 | 1.925 | 3.538 | 99.999 |

Pct. 70 - 78, dendrite albe, procente atomice

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0.0941 | 0.0161 | 1.81 | 0.11 | 0.695 | 0.118 | 3.233 | 0.527 |
| S | 0.0001 | 0.0001 | 10.14 | 0.52 | 0.007 | 0.005 | 0.012 | 0.008 |
| Ni | 0.1487 | 0.0036 | 1.70 | 0.00 | 15.294 | 0.361 | 14.576 | 0.355 |
| Fe | 0.6275 | 0.0074 | 0.90 | 0.00 | 62.049 | 0.822 | 62.164 | 0.405 |
| Mn | 0.0046 | 0.0002 | 4.11 | 0.06 | 0.456 | 0.021 | 0.465 | 0.025 |
| Cr | 0.1478 | 0.0042 | 1.72 | 0.04 | 13.095 | 0.380 | 14.090 | 0.369 |
| Mo | 0.0016 | 0.0003 | 7.74 | 0.25 | 0.207 | 0.039 | 0.121 | 0.022 |
| W | 0.0386 | 0.0032 | 2.59 | 0.11 | 6.064 | 0.492 | 1.847 | 0.169 |
| Si | 0.0126 | 0.0005 | 1.89 | 0.03 | 1.753 | 0.072 | 3.492 | 0.131 |
| | | | | | 99.619 | | 100.000 | |

Pct. 79 - 84, Faze mici de culoare albă în matrice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 2,914 | 0.040 | 6.162 | 37.476 | 0.355 | 18.329 | 1.298 | 33.295 | 1.492 | 101.361 |
| 3,753 | 0.033 | 6.650 | 36.469 | 0.320 | 19.898 | 1.120 | 31.747 | 1.603 | 101.595 |
| 2,890 | 0.348 | 7.914 | 41.709 | 0.722 | 15.911 | 0.912 | 27.293 | 1.646 | 99.245 |
| 3,749 | 0.008 | 7.539 | 40.017 | 0.361 | 18.686 | 0.963 | 26.643 | 1.611 | 99.577 |
| 2,312 | 0.029 | 8.001 | 43.222 | 0.360 | 17.324 | 0.961 | 27.547 | 1.513 | 101.269 |
| 2,887 | 0.074 | 7.451 | 42.404 | 0.385 | 20.430 | 1.923 | 24.854 | 1.811 | 102.219 |

Pct. 70 - 78, dendrite albe, procente atomice

| C | S | Ni | Fe | Mn | Cr | Mo | W | Si | Total |
|--------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 14.917 | 0.076 | 6.452 | 41.255 | 0.397 | 21.671 | 0.832 | 11.133 | 3.265 | 99.998 |
| 18.227 | 0.060 | 6.627 | 38.193 | 0.341 | 22.382 | 0.683 | 10.100 | 3.337 | 100.000 |
| 14.419 | 0.651 | 8.077 | 44.752 | 0.788 | 18.336 | 0.570 | 8.896 | 3.511 | 100.000 |
| 17.984 | 0.015 | 7.399 | 41.295 | 0.378 | 20.706 | 0.578 | 8.350 | 3.304 | 99.999 |
| 11.617 | 0.055 | 8.224 | 46.704 | 0.396 | 20.106 | 0.605 | 9.042 | 3.251 | 100.000 |
| 13.747 | 0.132 | 7.258 | 43.425 | 0.401 | 22.471 | 1.146 | 7.732 | 3.688 | 100.000 |

Pct. 79 - 84, Faze mici de culoare albă în matrice

| | K | | σ/K | | % masice | | % atomice | |
|----|--------|----------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|
| | media | ab. std, | media | abatere | media | abatere | media | abatere |
| C | 0.4381 | 0.0825 | 1.07 | 0.05 | 3.084 | 0.564 | 15.610 | 2.563 |
| S | 0.0015 | 0.0021 | 7.62 | 1.85 | 0.098 | 0.129 | 0.165 | 0.241 |
| Ni | 0.0766 | 0.0070 | 2.25 | 0.08 | 7.287 | 0.730 | 7.339 | 0.725 |
| Fe | 0.4210 | 0.0270 | 1.05 | 0.05 | 40.216 | 2.744 | 42.602 | 3.004 |
| Mn | 0.0044 | 0.0016 | 4.18 | 0.41 | 0.417 | 0.151 | 0.450 | 0.167 |
| Cr | 0.2013 | 0.0175 | 1.50 | 0.06 | 18.430 | 1.661 | 20.945 | 1.580 |
| Mo | 0.0086 | 0.0028 | 4.25 | 0.50 | 1.197 | 0.383 | 0.736 | 0.224 |
| W | 0.2065 | 0.0267 | 1.28 | 0.08 | 28.563 | 3.244 | 9.209 | 1.228 |
| Si | 0.0131 | 0.0008 | 1.82 | 0.08 | 1.613 | 0.114 | 3.393 | 0.172 |
| | | | | | 100.894 | | 99.999 | |

ANEXA 4. VALORI ALE MĂSURĂTORILOR DE DURITATE LA TESTELE DE STABILITATE LA REVENIRE A DEPUNERILOR REALIZATE.

Media calculată a durității depunerilor realizează media aritmetică a valorilor măsurate. Media corectată s-a calculat cu scopul evaluării durității matricei metalice prin eliminarea acelor valori ale durității care depășesc în mod aleator 950 HV 5, considerate a nu fi caracteristice depunerilor realizate și care se obțin în urma interceptării integrale sau parțiale a fazelor dure netopite.

P 40 + 5% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV5 |
|----------------------------------|----------------|---------------|---------------------------|
| Poziția punctului de măsurare | Duritatea HV 5 | | |
| 1200 | 460 | Strat 462 | Strat 462 |
| 1340 | 460 | | |
| 1480 | 460 | | |
| 1620 | 460 | | |
| 1740 | 460 | | |
| 1890 | 460 | | |
| 2010 | 429 | | |
| 2130 | 429 | | |
| 2260 | 429 | | |
| 2420 | 429 | | |
| 2570 | 509 | | |
| 2720 | 509 | | |
| 2890 | 494 | | |
| 3070 | 566 | | |
| 3240 | 376 | | |
| 3430 | 182 | Substrat | Substrat |
| 3670 | 178 | | |
| 3910 | 180 | | |
| 4150 | 178 | | |
| 4390 | 178 | | |
| 4630 | 182 | | |
| 4860 | 182 | | |

P 40 + 10% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|---------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 500 | 516 | Strat 641 | Strat 641 |
| 650 | 667 | | |
| 800 | 667 | | |
| 1000 | 667 | | |
| 1170 | 667 | | |
| 1320 | 689 | | |
| 1490 | 689 | | |
| 1640 | 689 | | |
| 1760 | 689 | | |
| 1880 | 644 | | |
| 2000 | 549 | | |
| 2150 | 549 | | |
| 2300 | 549 | | |
| 2450 | 549 | | |
| 2600 | 549 | | |
| 2725 | 927 | | |
| 3075 | 487 | | |
| 3325 | 201 | Substrat | Substrat |
| 3600 | 187 | | |
| 3875 | 183 | | |
| 4175 | 183 | | |
| 4450 | 183 | | |
| 4750 | 183 | | |
| 5050 | 182 | | |

P 40+15% WC, 500 °C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 350 | 509 | Strat 535 | Strat 535 |
| 480 | 532 | | |
| 780 | 532 | | |
| 860 | 509 | | |
| 1100 | 509 | | |
| 1350 | 516 | | |
| 1450 | 516 | | |
| 1600 | 524 | | |
| 1800 | 524 | | |
| 2000 | 593 | | |
| 2100 | 593 | | |
| 2250 | 566 | | |
| 2460 | 277 | | |
| 2700 | 232 | Substrat | Substrat |
| 2900 | 232 | | |
| 3200 | 232 | | |
| 3480 | 227 | | |
| 3700 | 227 | | |
| 3820 | 227 | | |
| 4100 | 227 | | |

P 40+15% WC, 500 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 50 | 447 | Strat 568 | Strat 568 |
| 300 | 593 | | |
| 550 | 593 | | |
| 650 | 604 | | |
| 820 | 515 | | |
| 1000 | 613 | | |
| 1150 | 603 | | |
| 1350 | 584 | | |
| 1450 | 566 | | |
| 1550 | 566 | | |
| 1720 | 593 | | |
| 1900 | 593 | | |
| 2050 | 593 | | |
| 2300 | 575 | | |
| 2480 | 566 | | |
| 2690 | 532 | | |
| 2790 | 532 | | |
| 2840 | 183 | ZIT | |
| 3010 | 188 | Substrat | Substrat |
| 3400 | 188 | | |
| 3700 | 187 | | |
| 4100 | 188 | | |
| 4250 | 187 | | |
| 4550 | 188 | | |
| 4700 | 188 | | |

P 40+15% WC, 500 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 350 | 613 | Strat 679 | Strat 679 |
| 550 | 613 | | |
| 620 | 613 | | |
| 800 | 644 | | |
| 950 | 613 | | |
| 1100 | 613 | | |
| 1300 | 613 | | |
| 1500 | 613 | | |
| 1700 | 739 | | |
| 1900 | 739 | | |
| 2100 | 739 | | |
| 2300 | 593 | | |
| 2450 | 766 | | |
| 2650 | 766 | | |
| 2850 | 766 | | |
| 3200 | 825 | | |
| 3500 | 232 | Substrat | Substrat |
| 3720 | 232 | | |
| 4100 | 232 | | |
| 4400 | 234 | | |
| 4700 | 232 | | |
| 5020 | 232 | | |
| 5300 | 232 | | |

P 40+15% WC, 600 °C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| | | | |
| 390 | 766 | Strat 659 | Strat 659 |
| 570 | 766 | | |
| 690 | 810 | | |
| 790 | 841 | | |
| 890 | 825 | | |
| 1040 | 766 | | |
| 1190 | 677 | | |
| 1290 | 677 | | |
| 1390 | 689 | | |
| 1490 | 689 | | |
| 1620 | 633 | | |
| 1740 | 633 | | |
| 1890 | 549 | | |
| 2040 | 516 | | |
| 2160 | 487 | | |
| 2310 | 532 | | |
| 2430 | 524 | | |
| 2590 | 566 | | |
| 2770 | 584 | | |
| 3120 | 147 | ZIT | |
| 3330 | 77.9 | | |
| 3510 | 161 | Substrat | Substrat |
| 3730 | 175 | | |
| 3950 | 175 | | |
| 4200 | 164 | | |
| 4450 | 164 | | |
| 4700 | 164 | | |
| 5000 | 164 | | |

P 40+15% WC, 600 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 450 | 781 | Strat 637 | Strat 637 |
| 570 | 841 | | |
| 720 | 689 | | |
| 850 | 739 | | |
| 980 | 739 | | |
| 1130 | 810 | | |
| 1220 | 713 | | |
| 1340 | 613 | | |
| 1450 | 593 | | |
| 1550 | 558 | | |
| 1700 | 516 | | |
| 1820 | 516 | | |
| 1940 | 532 | | |
| 2090 | 532 | | |
| 2220 | 532 | | |
| 2350 | 540 | | |
| 2480 | 540 | | |
| 2610 | 532 | | |
| 2770 | 532 | | |
| 2900 | 584 | | |
| 3050 | 781 | | |
| 3170 | 795 | | |
| 3290 | 241 | ZIT | |
| 3490 | 232 | | |
| 3670 | 212 | Substrat | Substrat |
| 3870 | 214 | | |
| 4020 | 214 | | |
| 4270 | 212 | | |
| 4490 | 212 | | |
| 4720 | 212 | | |
| 4900 | 212 | | |

P 40+15% WC, 600 °C, 10h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 450 | 644 | Strat 562 | Strat 562 |
| 550 | 644 | | |
| 670 | 575 | | |
| 780 | 575 | | |
| 900 | 575 | | |
| 1050 | 575 | | |
| 1210 | 532 | | |
| 1330 | 532 | | |
| 1480 | 532 | | |
| 1630 | 532 | | |
| 1790 | 532 | | |
| 1970 | 593 | | |
| 2120 | 524 | | |
| 2250 | 524 | | |
| 2430 | 524 | | |
| 2580 | 623 | | |
| 2700 | 593 | | |
| 2840 | 487 | | |
| 2990 | 251 | ZIT | |
| 3230 | 188 | Substrat | Substrat |
| 3450 | 188 | | |
| 3680 | 188 | | |
| 3950 | 188 | | |
| 4230 | 188 | | |
| 4510 | 188 | | |
| 4800 | 188 | | |

P 40+15% WC, 700 °C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 480 | 927 | Strat 601 | Strat 601 |
| 600 | 644 | | |
| 680 | 677 | | |
| 780 | 677 | | |
| 930 | 677 | | |
| 1020 | 677 | | |
| 1210 | 613 | | |
| 1350 | 613 | | |
| 1480 | 613 | | |
| 1610 | 613 | | |
| 1730 | 603 | | |
| 1840 | 603 | | |
| 1960 | 603 | | |
| 2120 | 603 | | |
| 2250 | 603 | | |
| 2410 | 603 | | |
| 2550 | 386 | | |
| 2730 | 593 | | |
| 2890 | 286 | ZIT | |
| 3090 | 199 | | |
| 3240 | 190 | substrat | Substrat |
| 3380 | 190 | | |
| 3630 | 192 | | |
| 3830 | 192 | | |
| 4080 | 192 | | |
| 4330 | 192 | | |
| 4600 | 192 | | |

P 40+15% WC, 700 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 400 | 766 | Strat 633 | Strat 633 |
| 520 | 766 | | |
| 650 | 766 | | |
| 770 | 766 | | |
| 890 | 766 | | |
| 920 | 655 | | |
| 1170 | 766 | | |
| 1290 | 613 | | |
| 1380 | 613 | | |
| 1520 | 613 | | |
| 1710 | 502 | | |
| 1860 | 502 | | |
| 1990 | 502 | | |
| 2140 | 613 | | |
| 2260 | 566 | | |
| 2380 | 391 | | |
| 2540 | 603 | | |
| 2740 | 361 | | |
| 2920 | 158 | | |
| 3120 | 169 | Substrat | Substrat |
| 3340 | 169 | | |
| 3550 | 178 | | |
| 3760 | 178 | | |
| 3990 | 178 | | |
| 4250 | 178 | | |
| 4500 | 178 | | |

P 40+15% WC, 800°C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 250 | 524 | Strat 557 | Strat 557 |
| 330 | 532 | | |
| 430 | 524 | | |
| 580 | 593 | | |
| 740 | 524 | | |
| 920 | 593 | | |
| 1120 | 593 | | |
| 1370 | 593 | | |
| 1500 | 593 | | |
| 1700 | 593 | | |
| 1900 | 593 | | |
| 2100 | 593 | | |
| 2400 | 473 | | |
| 2620 | 593 | | |
| 2770 | 447 | | |
| 2990 | 169 | | |
| 3250 | 155.7 | Substrat | Substrat |
| 3450 | 155.7 | | |
| 3700 | 155.7 | | |
| 4000 | 155.7 | | |
| 4300 | 155.7 | | |
| 4500 | 155.7 | | |
| 4750 | 155.7 | | |
| | | | |

P 40+15% WC, 800 oC, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|------------|----------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 300 | 927 | 791 | 791 |
| 700 | 927 | | |
| 920 | 927 | | |
| 1020 | 810 | | |
| 1120 | 781 | | |
| 1220 | 781 | | |
| 1320 | 752 | | |
| 1570 | 752 | | |
| 1770 | 752 | | |
| 1970 | 752 | | |
| 2170 | 752 | | |
| 2380 | 927 | | |
| 2600 | 473 | | |
| 2850 | 766 | | |
| 3050 | 148 | | |
| 3250 | 148 | | |
| 3570 | 148 | | |
| 3700 | 154 | | |
| 4050 | 148.2 | | |
| 4250 | 148.2 | | |
| 4500 | 148.2 | | |

P 40+15% WC, 900 °C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 100 | 509 | Strat 580 | Strat 563 |
| 250 | 623 | | |
| 350 | 603 | | |
| 560 | 441 | | |
| 800 | 391 | | |
| 1000 | 509 | | |
| 1250 | 540 | | |
| 1300 | 509 | | |
| 1500 | 652 | | |
| 1700 | 603 | | |
| 1900 | 584 | | |
| 2100 | 584 | | |
| 2300 | 584 | | |
| 2450 | 891 | | |
| 2550 | 524 | | |
| 2650 | 524 | | |
| 2850 | 644 | | |
| 3050 | 644 | | |
| 3250 | 644 | | |
| 3430 | 603 | ZIT | |
| 3650 | 180 | | |
| 3850 | 159 | Substrat | Substrat |
| 4200 | 159 | | |
| 4600 | 159 | | |
| 5000 | 159 | | |
| 5250 | 159 | | |
| 5690 | 159 | | |
| 5820 | 159 | | |

P 40+15% WC, 900 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 200 | 532 | Strat 552 | Strat 542 |
| 400 | 494 | | |
| 580 | 509 | | |
| 700 | 540 | | |
| 900 | 540 | | |
| 1050 | 549 | | |
| 1220 | 701 | | |
| 1370 | 593 | | |
| 1540 | 593 | | |
| 1740 | 584 | | |
| 1900 | 584 | | |
| 2100 | 532 | | |
| 2250 | 584 | | |
| 2420 | 532 | | |
| 2570 | 473 | | |
| 2700 | 494 | | |
| 2900 | 239 | | |
| 3050 | 171 | | MB |
| 3350 | 171 | | |
| 3600 | 171 | | |
| 3850 | 171 | | |
| 4200 | 171 | | |
| 4600 | 171 | | |
| 4850 | 171 | | |

P 40+15% WC, 900 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 450 | 473 | Strat 511 | Strat 511 |
| 600 | 540 | | |
| 850 | 540 | | |
| 970 | 540 | | |
| 1020 | 598 | | |
| 1270 | 509 | | |
| 1500 | 509 | | |
| 1650 | 494 | | |
| 1850 | 460 | | |
| 2000 | 460 | | |
| 2200 | 454 | | |
| 2400 | 460 | | |
| 2500 | 644 | | |
| 2680 | 473 | | |
| 2900 | 188 | | |
| 3200 | 135.1 | Substrat | Substrat |
| 3500 | 135.1 | | |
| 3800 | 135.1 | | |
| 4100 | 135.1 | | |
| 4460 | 135.1 | | |
| 4700 | 135.1 | | |
| 4950 | 135.1 | | |

P 40 + 20% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV5 | Media corectată HV 5 | | |
|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------------|----------|----------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | | | |
| 1700 | 540 | Strat 600 | Strat 540 | | |
| 1810 | 532 | | | | |
| 1920 | 532 | | | | |
| 2040 | 532 | | | | |
| 2190 | 540 | | | | |
| 2340 | 540 | | | | |
| 2470 | 540 | | | | |
| 2600 | 666 | | | | |
| 2720 | 927 | | | | |
| 2830 | 927 | | | | |
| 2930 | 480 | | | | |
| 3080 | 524 | | | | |
| 3230 | 524 | | | | |
| 3380 | 212 | | | ZIT | |
| 3630 | 180 | | | Substrat | Substrat |
| 3880 | 176 | | | | |
| 4080 | 167 | | | | |
| 4330 | 172 | | | | |
| 4580 | 169 | | | | |
| 4880 | 165 | | | | |
| 5180 | 165 | | | | |

P 40 + 25% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|----------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 1100 | 549 | Strat 613.2 | Strat 564 |
| 1220 | 549 | | |
| 1360 | 549 | | |
| 1490 | 549 | | |
| 1590 | 549 | | |
| 1740 | 549 | | |
| 1890 | 549 | | |
| 2040 | 575 | | |
| 2190 | 549 | | |
| 2340 | 558 | | |
| 2460 | 593 | | |
| 2615 | 613 | | |
| 2765 | 613 | | |
| 2890 | 927 | | |
| 2990 | 927 | | |
| 3115 | 386 | ZIT | |
| 3315 | 262 | | |
| 3515 | 203 | | |
| 3815 | 178 | Substrat | Substrat |
| 4015 | 182 | | |
| 4315 | 195 | | |
| 4590 | 183 | | |
| 4790 | 176 | | |
| 5140 | 178 | | |
| 5440 | 178 | | |

P 40 + 30% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|-----------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 3460 | 613 | Strat 684.08 | Strat 621 |
| 3640 | 613 | | |
| 3860 | 613 | | |
| 4080 | 613 | | |
| 4320 | 613 | | |
| 4560 | 613 | | |
| 4810 | 623 | | |
| 5060 | 644 | | |
| 5280 | 584 | | |
| 5500 | 633 | | |
| 5620 | 633 | | |
| 5680 | 613 | | |
| 5800 | 623 | | |
| 5880 | 689 | | |
| 5995 | 603 | | |
| 6075 | 603 | | |
| 6210 | 603 | | |
| 6310 | 644 | | |
| 6400 | 644 | | |
| 6500 | 795 | | |
| 6610 | 986 | | |
| 6710 | 986 | | |
| 6830 | 927 | | |
| 6930 | 825 | | |
| 7050 | 766 | | |
| 7160 | 199 | | |
| 7270 | 188 | Substrat | Substrat |
| 7380 | 185 | | |
| 7490 | 185 | | |
| 7600 | 185 | | |
| 7710 | 185 | | |
| 7820 | 185 | | |
| 7930 | 185 | | |

P 40 + 40% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| | | Strat 909 | Strat 775 |
| 1300 | 795 | | |
| 1570 | 795 | | |
| 1670 | 781 | | |
| 1790 | 781 | | |
| 1920 | 781 | | |
| 2050 | 781 | | |
| 2180 | 766 | | |
| 2300 | 766 | | |
| 2420 | 766 | | |
| 2530 | 766 | | |
| 2650 | 766 | | |
| 2770 | 766 | | |
| 2870 | 1285 | | |
| 3040 | 1285 | | |
| 3160 | 1285 | | |
| 3260 | 1379 | | |
| 3370 | 313 | ZIT | |
| 3480 | 203 | | |
| 3700 | 203 | | |
| 3940 | 203 | | |
| 4170 | 187 | Substrat | Substrat |
| 4310 | 185 | | |
| 4580 | 185 | | |
| 4840 | 185 | | |
| 5090 | 185 | | |
| 5340 | 188 | | |
| 5610 | 187 | | |

P 40+40% WC, 500 °C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 50 | 927 | Strat 916 | Strat 891 |
| 180 | 908 | | |
| 330 | 908 | | |
| 480 | 908 | | |
| 630 | 908 | | |
| 780 | 801 | | |
| 910 | 874 | | |
| 1010 | 874 | | |
| 1160 | 891 | | |
| 1340 | 891 | | |
| 1470 | 891 | | |
| 1620 | 1049 | | |
| 1800 | 927 | | |
| 1950 | 1049 | | |
| 2130 | 1049 | | |
| 2350 | 927 | | |
| 2690 | 891 | | |
| 2860 | 810 | | |
| 3020 | 927 | | |
| 3170 | 232 | | |
| 3320 | 199 | Substrat | Substrat |
| 3550 | 199 | | |
| 3950 | 199 | | |
| 4200 | 199 | | |
| 4600 | 199 | | |
| 4850 | 199 | | |
| 5100 | 199 | | |

P 40+40% WC, 500 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 50 | 593 | Strot 792 | Strot 792 |
| 230 | 593 | | |
| 380 | 766 | | |
| 490 | 781 | | |
| 750 | 766 | | |
| 900 | 908 | | |
| 1020 | 781 | | |
| 1200 | 739 | | |
| 1370 | 825 | | |
| 1520 | 825 | | |
| 1680 | 795 | | |
| 1800 | 701 | | |
| 2000 | 795 | | |
| 2200 | 857 | | |
| 2350 | 927 | | |
| 2520 | 927 | | |
| 2700 | 810 | | |
| 2850 | 966 | | |
| 3050 | 701 | | |
| 3300 | 232 | | |
| 3550 | 201 | Substrat | Substrat |
| 3850 | 201 | | |
| 4100 | 199 | | |
| 4400 | 199 | | |
| 4770 | 199 | | |
| 5000 | 199 | | |
| 5300 | 199 | | |

P 40+40% WC, 500 °C, 10h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 100 | 781 | Strat 891 | Strat 891 |
| 200 | 795 | | |
| 400 | 927 | | |
| 700 | 927 | | |
| 850 | 927 | | |
| 1000 | 874 | | |
| 1200 | 927 | | |
| 1350 | 927 | | |
| 1500 | 927 | | |
| 1670 | 908 | | |
| 1900 | 927 | | |
| 2000 | 927 | | |
| 2150 | 927 | | |
| 2300 | 927 | | |
| 2450 | 766 | | |
| 2700 | 927 | | |
| 3000 | 810 | | |
| 3300 | 908 | | |
| 3500 | 927 | | |
| 3600 | 927 | | |
| 3750 | 908 | | |
| 3900 | 766 | | |
| 4000 | 927 | | |
| 4150 | 766 | | |
| 4350 | 927 | | |
| 4450 | 927 | | |
| 4550 | 927 | | |
| 4700 | 927 | | |
| 4850 | 280 | ZIT | |
| 5100 | 232 | Substrat | Substrat |
| 5250 | 232 | | |
| 5550 | 232 | | |
| 5800 | 232 | | |
| 6100 | 232 | | |
| 6300 | 232 | | |
| 6550 | 232 | | |

P 40+40% WC, 600 °C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 150 | 732 | Strat 788 | Strat 777 |
| 250 | 732 | | |
| 350 | 732 | | |
| 470 | 825 | | |
| 570 | 927 | | |
| 690 | 927 | | |
| 790 | 739 | | |
| 890 | 726 | | |
| 970 | 752 | | |
| 1120 | 739 | | |
| 1230 | 701 | | |
| 1390 | 666 | | |
| 1440 | 739 | | |
| 1590 | 644 | | |
| 1710 | 752 | | |
| 1810 | 752 | | |
| 1960 | 752 | | |
| 2060 | 752 | | |
| 2140 | 825 | | |
| 2260 | 766 | | |
| 2340 | 726 | | |
| 2440 | 927 | | |
| 2570 | 960 | | |
| 2670 | 841 | | |
| 2750 | 841 | | |
| 2850 | 1049 | | |
| 3020 | 739 | | |
| 3240 | 262 | ZIT | |
| 3420 | 204 | | |
| 3610 | 177 | Substrat | Substrat |
| 3820 | 188 | | |
| 4020 | 188 | | |
| 4220 | 188 | | |
| 4400 | 188 | | |
| 4600 | 188 | | |
| 4800 | 188 | | |

P 40+40% WC, 600 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 700 | 927 | Strat 821 | Strat 890 |
| 880 | 927 | | |
| 980 | 966 | | |
| 1110 | 1006 | | |
| 1210 | 927 | | |
| 1310 | 927 | | |
| 1430 | 927 | | |
| 1530 | 927 | | |
| 1660 | 766 | | |
| 1870 | 766 | | |
| 2000 | 766 | | |
| 2120 | 666 | | |
| 2220 | 666 | | |
| 2320 | 666 | | |
| 2440 | 795 | | |
| 2540 | 825 | | |
| 2660 | 1145 | | |
| 2750 | 666 | | |
| 2830 | 1379 | | |
| 2930 | 1049 | | |
| 3040 | 1049 | | |
| 3160 | 841 | | |
| 3340 | 396 | ZIT | |
| 3540 | 180 | Substrat | Substrat |
| 3770 | 180 | | |
| 4050 | 159 | | |
| 4280 | 178 | | |
| 4560 | 178 | | |
| 4840 | 178 | | |
| 5060 | 177 | | |

P 40+40% WC, 600 °C, 10h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 600 | 927 | Strat 898 | Strat 925 |
| 700 | 927 | | |
| 820 | 927 | | |
| 970 | 927 | | |
| 1090 | 946 | | |
| 1230 | 927 | | |
| 1350 | 874 | | |
| 1460 | 874 | | |
| 1580 | 874 | | |
| 1700 | 927 | | |
| 1760 | 986 | | |
| 1890 | 766 | | |
| 2010 | 766 | | |
| 2130 | 981 | | |
| 2260 | 927 | | |
| 2370 | 927 | | |
| 2480 | 927 | | |
| 2600 | 927 | | |
| 2740 | 927 | | |
| 2840 | 701 | | |
| 2990 | 210 | ZIT | |
| 3200 | 183 | Substrat | Substrat |
| 3410 | 183 | | |
| 3660 | 183 | | |
| 3890 | 183 | | |
| 4110 | 183 | | |
| 4300 | 183 | | |
| 4510 | 183 | | |

P 40+40% WC, 700 °C, 1h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 550 | 927 | Strat 941 | Strat 916 |
| 680 | 927 | | |
| 800 | 927 | | |
| 920 | 927 | | |
| 1050 | 927 | | |
| 1160 | 927 | | |
| 1290 | 927 | | |
| 1410 | 927 | | |
| 1530 | 739 | | |
| 1690 | 927 | | |
| 1840 | 927 | | |
| 1950 | 927 | | |
| 2070 | 891 | | |
| 2200 | 927 | | |
| 2340 | 927 | | |
| 2490 | 927 | | |
| 2640 | 927 | | |
| 2760 | 927 | | |
| 2860 | 927 | | |
| 2960 | 927 | | |
| 3180 | 1049 | | |
| 3280 | 1145 | | |
| 3440 | 1145 | | |
| 3620 | 271 | ZIT | |
| 3820 | 206 | | |
| 4100 | 178 | Substrat | Substrat |
| 4380 | 171 | | |
| 4650 | 171 | | |
| 4900 | 171 | | |
| 5200 | 171 | | |
| 5410 | 171 | | |
| 5690 | 171 | | |

P 40+40% WC, 700 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 450 | 795 | Strat 732 | Strat 732 |
| 570 | 795 | | |
| 700 | 739 | | |
| 800 | 677 | | |
| 890 | 795 | | |
| 1010 | 713 | | |
| 1140 | 713 | | |
| 1250 | 677 | | |
| 1370 | 781 | | |
| 1490 | 666 | | |
| 1570 | 666 | | |
| 1690 | 666 | | |
| 1790 | 713 | | |
| 1890 | 713 | | |
| 1980 | 713 | | |
| 2170 | 725 | | |
| 2300 | 725 | | |
| 2430 | 725 | | |
| 2580 | 825 | | |
| 2690 | 825 | | |
| 2810 | 232 | ZIT | |
| 2910 | 232 | | |
| 3130 | 167 | Substrat | Substrat |
| 3350 | 167 | | |
| 3610 | 167 | | |
| 3820 | 168 | | |
| 4100 | 167 | | |
| 4260 | 167 | | |
| 4400 | 167 | | |

P 40+40% WC, 700 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 600 | 1225 | Strat 678 | Strat 638 |
| 780 | 1225 | | |
| 880 | 766 | | |
| 1010 | 795 | | |
| 1140 | 795 | | |
| 1240 | 795 | | |
| 1360 | 795 | | |
| 1460 | 739 | | |
| 1560 | 466 | | |
| 1690 | 524 | | |
| 1800 | 739 | | |
| 1940 | 739 | | |
| 2170 | 689 | | |
| 2270 | 603 | | |
| 2420 | 502 | | |
| 2540 | 644 | | |
| 2640 | 644 | | |
| 2790 | 509 | | |
| 2910 | 713 | | |
| 3130 | 473 | | |
| 3280 | 558 | | |
| 3480 | 558 | | |
| 3630 | 666 | | |
| 3750 | 623 | | |
| 3850 | 623 | | |
| 3970 | 566 | | |
| 4170 | 566 | | |
| 4320 | 566 | | |
| 4520 | 566 | | |
| 4670 | 203 | ZIT | |
| 4950 | 183 | Substrat | Substrat |
| 5180 | 177 | | |
| 5460 | 177 | | |
| 5660 | 177 | | |
| 5890 | 177 | | |
| 6100 | 177 | | |
| 6410 | 177 | | |

P 40+40% WC, 800 °C, 5h, aer

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 250 | 927 | Strat 893 | Strat 805 |
| 650 | 1071 | | |
| 770 | 1071 | | |
| 850 | 1253 | | |
| 950 | 927 | | |
| 1100 | 927 | | |
| 1200 | 644 | | |
| 1400 | 644 | | |
| 1500 | 644 | | |
| 1700 | 644 | | |
| 1850 | 644 | | |
| 1950 | 644 | | |
| 2100 | 644 | | |
| 2250 | 633 | | |
| 2450 | 927 | | |
| 2654 | 927 | | |
| 2850 | 927 | | |
| 2950 | 927 | | |
| 3050 | 927 | | |
| 3150 | 927 | | |
| 3350 | 927 | | |
| 3650 | 927 | | |
| 3800 | 766 | | |
| 4000 | 1027 | | |
| 4200 | 1145 | | |
| 4300 | 1145 | | |
| 4400 | 1095 | | |
| 4600 | 1095 | | |
| 4800 | 391 | ZIT | |
| 4900 | 140 | Substrat | Substrat |
| 5100 | 140 | | |
| 5300 | 140 | | |
| 5700 | 140 | | |
| 6000 | 140 | | |
| 6230 | 140 | | |
| 6490 | 140 | | |

P 40+40% WC, 900 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 420 | 860 | Strat 552 | Strat 506 |
| 650 | 412 | | |
| 750 | 524 | | |
| 950 | 447 | | |
| 1200 | 447 | | |
| 1550 | 306 | | |
| 1950 | 345 | | |
| 2200 | 441 | | |
| 2480 | 441 | | |
| 2680 | 603 | | |
| 2780 | 345 | | |
| 2930 | 841 | | |
| 3100 | 540 | | |
| 3320 | 874 | | |
| 3420 | 509 | | |
| 3600 | 509 | | |
| 3720 | 714 | | |
| 3850 | 633 | | |
| 4070 | 575 | | |
| 4240 | 532 | | |
| 4390 | 766 | | |
| 4540 | 516 | | |
| 4740 | 516 | | |
| 4950 | 155.7 | ZIT | |
| 5120 | 155.7 | | |
| 5220 | 157 | Substrat | Substrat |
| 5420 | 155.7 | | |
| 5620 | 157 | | |
| 5920 | 157 | | |
| 6000 | 157 | | |
| 6200 | 157 | | |
| 6350 | 157 | | |

P 40 + 50% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 1100 | 841 | Strat 907 | Strat 883 |
| 1200 | 891 | | |
| 1320 | 874 | | |
| 1440 | 891 | | |
| 1560 | 891 | | |
| 1660 | 874 | | |
| 1780 | 927 | | |
| 1900 | 927 | | |
| 2000 | 841 | | |
| 2150 | 752 | | |
| 2300 | 927 | | |
| 2400 | 1225 | | |
| 2520 | 966 | | |
| 2620 | 927 | | |
| 2710 | 927 | | |
| 2840 | 1006 | | |
| 2940 | 927 | | |
| 3060 | 701 | | |
| 3160 | 927 | | |
| 3280 | 232 | | |
| 3500 | 190 | Substrat | Substrat |
| 3720 | 187 | | |
| 3970 | 187 | | |
| 4220 | 203 | | |
| 4450 | 189 | | |
| 4700 | 187 | | |
| 4950 | 187 | | |

P 40 + 60% WC, netratat

| Măsurători de duritate | | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|-----------------------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | | |
| 500 | 841 | Strat 1026 | Strat 842 |
| 620 | 841 | | |
| 730 | 766 | | |
| 850 | 927 | | |
| 970 | 841 | | |
| 1090 | 739 | | |
| 1200 | 766 | | |
| 1350 | 1225 | | |
| 1460 | 1120 | | |
| 1560 | 1145 | | |
| 1635 | 1171 | | |
| 1710 | 1197 | | |
| 1810 | 1120 | | |
| 1910 | 1049 | | |
| 2010 | 1197 | | |
| 2110 | 1006 | | |
| 2210 | 1145 | | |
| 2330 | 1120 | | |
| 2450 | 1197 | | |
| 2560 | 1095 | | |
| 2660 | 1072 | | |
| 2790 | 1120 | | |
| 2910 | 1095 | | |
| 3010 | 927 | | |
| 3150 | 927 | | |
| 3350 | 232 | ZIT | |
| 3580 | 210 | | |
| 3800 | 201 | Substrat | Substrat |
| 4070 | 201 | | |
| 4170 | 201 | | |
| 4370 | 201 | | |
| 4590 | 201 | | |
| 4800 | 201 | | |
| 5020 | 206 | | |

P 40+60% WC, 500 °C, 1h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 190 | 927 | Strat 888 | Strat 880 |
| 270 | 927 | | |
| 400 | 946 | | |
| 500 | 927 | | |
| 620 | 739 | | |
| 740 | 927 | | |
| 840 | 927 | | |
| 930 | 908 | | |
| 1080 | 927 | | |
| 1200 | 908 | | |
| 1300 | 857 | | |
| 1450 | 927 | | |
| 1520 | 908 | | |
| 1650 | 874 | | |
| 1730 | 908 | | |
| 1820 | 1095 | | |
| 1980 | 927 | | |
| 2080 | 927 | | |
| 2180 | 927 | | |
| 2280 | 927 | | |
| 2380 | 927 | | |
| 2600 | 908 | | |
| 2800 | 874 | | |
| 2960 | 509 | | |
| 3060 | 927 | | |
| 3160 | 908 | | |
| 3300 | 908 | | |
| 3570 | 908 | | |
| 3950 | 908 | | |
| 4000 | 509 | | |
| 4500 | 232 | ZIT | |
| 4800 | 178 | Substrat | Substrat |
| 5100 | 178 | | |
| 5310 | 178 | | |
| 5520 | 178 | | |
| 5770 | 178 | | |
| 5900 | 178 | | |
| 6110 | 178 | | |

P 40+60% WC, 500 °C, 5h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 100 | 946 | Strat 837 | Strat 837 |
| 180 | 927 | | |
| 270 | 766 | | |
| 360 | 927 | | |
| 560 | 927 | | |
| 700 | 946 | | |
| 810 | 781 | | |
| 900 | 810 | | |
| 1090 | 927 | | |
| 1220 | 927 | | |
| 1370 | 781 | | |
| 1550 | 726 | | |
| 1700 | 726 | | |
| 1850 | 689 | | |
| 2100 | 726 | | |
| 2300 | 593 | | |
| 2400 | 857 | | |
| 2500 | 739 | | |
| 2750 | 739 | | |
| 3000 | 927 | | |
| 3150 | 754 | | |
| 3400 | 927 | | |
| 3700 | 927 | | |
| 3900 | 927 | | |
| 4200 | 927 | | |
| 4350 | 927 | | |
| 4500 | 206 | Substrat | Substrat |
| 4800 | 206 | | |
| 4970 | 206 | | |
| 5120 | 208 | | |
| 5300 | 208 | | |
| 5600 | 208 | | |
| 5820 | 208 | | |

P 40+60% WC, 500 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| | | | |
| 200 | 927 | | |
| 280 | 927 | | |
| 380 | 927 | | |
| 480 | 927 | | |
| 680 | 927 | | |
| 820 | 927 | | |
| 1000 | 927 | | |
| 1100 | 986 | | |
| 1250 | 986 | | |
| 1370 | 986 | | |
| 1490 | 1027 | | |
| 1570 | 927 | | |
| 1660 | 927 | | |
| 1800 | 927 | | |
| 1920 | 781 | | |
| 2020 | 927 | | |
| 2300 | 927 | | |
| 2420 | 841 | | |
| 2620 | 1120 | | |
| 2720 | 927 | | |
| 2900 | 946 | | |
| 3050 | 927 | | |
| 3150 | 927 | | |
| 3300 | 1095 | | |
| 3400 | 927 | | |
| 3510 | 927 | | |
| 3630 | 927 | | |
| 3750 | 1072 | | |
| 3950 | 946 | | |
| 4100 | 927 | | |
| 4220 | 874 | | |
| 4350 | 810 | | |
| 4560 | 532 | | |
| 4860 | 280 | | |
| | | ZIT | |
| 5020 | 232 | | |
| 5270 | 192 | | |
| 5570 | 187 | | |
| 5850 | 187 | | |
| 6050 | 187 | | |
| 6300 | 187 | | |
| 6800 | 187 | | |
| | | Strat 928 | Strat 907 |
| | | Substrat | Substrat |

P 40+60% WC, 600 °C, 1h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|---------------|----------------------|
| 520 | 1449 | Strat 1104 | Strat 766 |
| 690 | 1314 | | |
| 830 | 1314 | | |
| 980 | 1314 | | |
| 1110 | 1006 | | |
| 1280 | 1006 | | |
| 1390 | 1449 | | |
| 1540 | 1027 | | |
| 1690 | 1027 | | |
| 1840 | 1449 | | |
| 1950 | 1027 | | |
| 2050 | 1049 | | |
| 2130 | 927 | | |
| 2230 | 1449 | | |
| 2300 | 1120 | | |
| 2400 | 1145 | | |
| 2500 | 1145 | | |
| 2620 | 1072 | | |
| 2700 | 927 | | |
| 2800 | 927 | | |
| 2920 | 946 | | |
| 3150 | 927 | | |
| 3270 | 927 | | |
| 3420 | 549 | | |
| 3640 | 210 | ZIT | |
| 3860 | 210 | | |
| 4080 | 204 | | |
| 4300 | 180 | Substrat | Substrat |
| 4510 | 180 | | |
| 4690 | 175 | | |
| 4840 | 175 | | |
| 5170 | 175 | | |
| 5390 | 172 | | |
| 5610 | 175 | | |

P 40+60% WC, 600 °C, 5h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|---------------|----------------------|
| 350 | 1253 | Strat 1076 | Strat 930 |
| 400 | 1314 | | |
| 650 | 927 | | |
| 770 | 927 | | |
| 840 | 946 | | |
| 910 | 1145 | | |
| 1010 | 927 | | |
| 1160 | 927 | | |
| 1310 | 1548 | | |
| 1480 | 1095 | | |
| 1610 | 1283 | | |
| 1780 | 946 | | |
| 1990 | 1049 | | |
| 2110 | 927 | | |
| 2360 | 927 | | |
| 2610 | 204 | | |
| 2910 | 187 | Substrat | Substrat |
| 3220 | 168 | | |
| 3620 | 187 | | |
| 3970 | 187 | | |
| 4320 | 190 | | |
| 4620 | 190 | | |
| 4920 | 190 | | |

P 40+60% WC, 600 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|---------------|----------------------|
| 500 | 946 | Strat 1026 | Strat 946 |
| 600 | 1049 | | |
| 750 | 1049 | | |
| 880 | 1049 | | |
| 1000 | 1049 | | |
| 1150 | 1049 | | |
| 1260 | 946 | | |
| 1380 | 946 | | |
| 1500 | 946 | | |
| 1620 | 946 | | |
| 1720 | 946 | | |
| 1850 | 1072 | | |
| 1990 | 1072 | | |
| 2090 | 1072 | | |
| 2170 | 1072 | | |
| 2290 | 1072 | | |
| 2370 | 1072 | | |
| 2470 | 1072 | | |
| 2590 | 1072 | | |
| 2740 | 254 | ZIT | |
| 2920 | 192 | Substrat | Substrat |
| 3170 | 185 | | |
| 3370 | 185 | | |
| 3570 | 187 | | |
| 3770 | 187 | | |
| 3920 | 187 | | |
| 4200 | 187 | | |

P 40+60% WC, 700 °C, 1h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 550 | 927 | Strat 941 | Strat 925 |
| 680 | 927 | | |
| 800 | 927 | | |
| 920 | 927 | | |
| 1050 | 927 | | |
| 1160 | 927 | | |
| 1290 | 927 | | |
| 1410 | 927 | | |
| 1530 | 927 | | |
| 1690 | 927 | | |
| 1840 | 927 | | |
| 1950 | 927 | | |
| 2070 | 891 | | |
| 2200 | 927 | | |
| 2340 | 927 | | |
| 2490 | 927 | | |
| 2640 | 927 | | |
| 2760 | 927 | | |
| 2860 | 927 | | |
| 2960 | 1049 | | |
| 3180 | 1145 | | |
| 3440 | 271 | ZIT | |
| 3620 | 206 | | |
| 3820 | 178 | Substrat | Substrat |
| 4100 | 171 | | |
| 4380 | 178 | | |
| 4650 | 171 | | |
| 4900 | 171 | | |
| 5120 | 171 | | |
| 5360 | 171 | | |

P 40+60% WC, 700 °C, 5h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|---------------|----------------------|
| 460 | 1253 | Strat 1513 | Strat 989 |
| 560 | 1253 | | |
| 710 | 1253 | | |
| 860 | 1253 | | |
| 960 | 10095 | | |
| 1180 | 1225 | | |
| 1280 | 927 | | |
| 1380 | 1072 | | |
| 1530 | 795 | | |
| 1780 | 927 | | |
| 1840 | 927 | | |
| 1940 | 927 | | |
| 2070 | 927 | | |
| 2220 | 927 | | |
| 2370 | 927 | | |
| 2500 | 927 | | |
| 2650 | 927 | | |
| 2830 | 689 | | |
| 2960 | 189 | ZIT | |
| 3190 | 188 | | |
| 3440 | 178 | Substrat | Substrat |
| 3690 | 178 | | |
| 3960 | 178 | | |
| 4230 | 178 | | |
| 4430 | 178 | | |
| 4650 | 178 | | |
| 4840 | 178 | | |

P 40+60% WC, 700 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 700 | 927 | Strat 847 | Strat 826 |
| 820 | 927 | | |
| 930 | 927 | | |
| 1220 | 825 | | |
| 1320 | 644 | | |
| 1490 | 927 | | |
| 1610 | 841 | | |
| 1710 | 1171 | | |
| 1820 | 286 | | |
| 2020 | 841 | | |
| 2170 | 927 | | |
| 2320 | 766 | | |
| 2450 | 927 | | |
| 2670 | 927 | | |
| 3070 | 212 | | |
| 3360 | 212 | | |
| 3640 | 171 | Substrat | Substrat |
| 3890 | 171 | | |
| 4210 | 171 | | |
| 4420 | 171 | | |
| 4650 | 171 | | |
| 4810 | 171 | | |
| 4970 | 171 | | |

P 40+60% WC, 800 °C, 1h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 150 | 927 | Strat 887 | Strat 879 |
| 300 | 891 | | |
| 450 | 927 | | |
| 530 | 927 | | |
| 710 | 908 | | |
| 860 | 966 | | |
| 960 | 927 | | |
| 1060 | 966 | | |
| 1210 | 966 | | |
| 1310 | 927 | | |
| 1410 | 927 | | |
| 1670 | 644 | | |
| 1820 | 644 | | |
| 1970 | 644 | | |
| 2170 | 825 | | |
| 2370 | 1072 | | |
| 2470 | 927 | | |
| 2600 | 986 | | |
| 2700 | 927 | | |
| 2800 | 986 | | |
| 2920 | 454 | | |
| 3120 | 986 | | |
| 3250 | 927 | | |
| 3450 | 927 | | |
| 3700 | 927 | | |
| 3850 | 927 | | |
| 4100 | 210 | ZIT | |
| 4450 | 175 | Substrat | Substrat |
| 4700 | 175 | | |
| 5000 | 175 | | |
| 5350 | 175 | | |
| 5750 | 175 | | |
| 6100 | 175 | | |
| 6600 | 175 | | |

P 40+60% WC, 800 °C, 5h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 300 | 927 | Strat 835 | Strat 809 |
| 450 | 766 | | |
| 650 | 473 | | |
| 850 | 927 | | |
| 1000 | 966 | | |
| 1300 | 1072 | | |
| 1500 | 1072 | | |
| 1700 | 966 | | |
| 2000 | 766 | | |
| 2300 | 927 | | |
| 2450 | 927 | | |
| 2550 | 891 | | |
| 2700 | 681 | | |
| 3000 | 549 | | |
| 3100 | 810 | | |
| 3280 | 927 | | |
| 3600 | 644 | | |
| 3700 | 725 | | |
| 3800 | 841 | | |
| 3900 | 841 | | |
| 4200 | 161 | ZIT | |
| 4500 | 137 | Substrat | Substrat |
| 4700 | 139 | | |
| 4950 | 137 | | |
| 5300 | 137 | | |
| 5800 | 137 | | |
| 6100 | 137 | | |
| 6400 | 137 | | |

P 40+60% WC, 800 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 250 | 927 | Strat 861 | Strat 798 |
| 410 | 927 | | |
| 510 | 1253 | | |
| 660 | 1073 | | |
| 810 | 1253 | | |
| 960 | 766 | | |
| 1160 | 766 | | |
| 1380 | 795 | | |
| 1580 | 795 | | |
| 1800 | 795 | | |
| 2250 | 689 | | |
| 2310 | 795 | | |
| 2360 | 795 | | |
| 2710 | 644 | | |
| 2930 | 795 | | |
| 3180 | 795 | | |
| 3500 | 795 | | |
| 3820 | 766 | | |
| 4070 | 927 | | |
| 4470 | 293 | ZIT | |
| 4890 | 147.2 | Substrat | Substrat |
| 5100 | 148.2 | | |
| 5490 | 154.5 | | |
| 5890 | 154.5 | | |
| 6290 | 154.5 | | |
| 6690 | 154.5 | | |
| 8790 | 154.5 | | |

P 40+60% WC, 900 °C, 5h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 150 | 927 | Strat 885 | Strat 874 |
| 360 | 927 | | |
| 520 | 986 | | |
| 7000 | 986 | | |
| 780 | 986 | | |
| 1000 | 1006 | | |
| 1200 | 927 | | |
| 1450 | 927 | | |
| 1600 | 927 | | |
| 1700 | 927 | | |
| 1950 | 891 | | |
| 2120 | 927 | | |
| 2250 | 1027 | | |
| 2400 | 927 | | |
| 2650 | 726 | | |
| 2850 | 927 | | |
| 2950 | 927 | | |
| 3200 | 966 | | |
| 3330 | 986 | | |
| 3480 | 795 | | |
| 3630 | 623 | | |
| 3720 | 613 | | |
| 3840 | 825 | | |
| 3940 | 739 | | |
| 4040 | 739 | | |
| 4140 | 841 | | |
| 4340 | 229 | ZIT | |
| 4660 | 175 | | |
| 4900 | 155.7 | Substrat | Substrat |
| 5150 | 155.7 | | |
| 5400 | 155.7 | | |
| 5800 | 155.7 | | |
| 5980 | 155.7 | | |
| 6230 | 155.7 | | |
| | | | |

P 40+60% WC, 900 °C, 10h, aer

| Distanța de la suprafață | Duritate HV5 | Media HV 5 | Media corectată HV 5 |
|--------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 150 | 960 | Strat 707 | Strat 557 |
| 250 | 927 | | |
| 350 | 927 | | |
| 450 | 857 | | |
| 560 | 603 | | |
| 700 | 401 | | |
| 900 | 927 | | |
| 1050 | 986 | | |
| 1200 | 986 | | |
| 1350 | 927 | | |
| 1500 | 701 | | |
| 1650 | 841 | | |
| 1800 | 447 | | |
| 2000 | 447 | | |
| 2300 | 623 | | |
| 2500 | 575 | | |
| 2680 | 509 | | |
| 2850 | 841 | | |
| 3500 | 386 | | |
| 3750 | 633 | | |
| 3900 | 633 | | |
| 4000 | 633 | | |
| 4150 | 644 | | |
| 4270 | 633 | | |
| 4420 | 633 | | |
| 4700 | 161 | | |
| 4900 | 135.1 | Substrat | Substrat |
| 5150 | 135.1 | | |
| 5500 | 135.1 | | |
| 5900 | 135.1 | | |
| 6300 | 135.1 | | |
| 6700 | 135.1 | | |
| 6900 | 135.1 | | |

BIBLIOGRAFIE

1. Ait-Mekideche, A. - Plasma-Pulver-Auftragschweien verschleißfester Pseudolegierungs-systeme auf Cobalt-Chrom-Kohlenstoff-Basis, teză de doctorat, RWTH Aachen, 1989
2. Akin, O. - Ein Beitrag zur Konstitution wolframmonocarbidgeicher Gußwerkstoffe auf Eisen- und Kobaltbasis, Teză de doctorat, RWTH Aachen, 1976
3. Anghela, N. ş.a. - Sudarea în mediu de gaze protectoare, Editura tehnică, Bucureşti, 1981
4. Balaşiu, D. - Tehnici de investigare a proceselor de deteriorare, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1990
5. Balekics, M. - Tribologie, Lito I.P. Timişoara, 1988
6. Baron, T. ş.a. - Calitate şi fiabilitate, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1988
7. Bica, I. - Tăierea cu plasmă a metalelor, Seria "Aplicaţii ale fizicii plasmei", Tipografia MIRTON, Timişoara, 1994
8. Binchiciu, H. ş.a. - Încărcarea prin sudare cu arcul electric, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1992
9. Bouaifi, B. ş.a. - Plasma-Pulver-Auftragschweissen zum Verschleißschutz abrasiv beanspruchter Bauteile mit Kantenbelastung, Schweissen und Schneiden 45 (1993), vol. 9
10. Carţiş, I. Gh. - Tratamente termochimice, Ed. Facla, Timişoara, 1988
11. Constantinescu, G. - Oţeluri inoxidabile şi refractare. Domeniile de întrebuinţare şi utilizarea lor raţională, OID-MICM, 1092
12. Crane, F. A. A., Charles J. A. - Selection and use of engineering materials, Butterworth and Co., 1989
13. Dehelean, D. - Îmbinări sudate eterogene, SID 106, IOD - ICM, Bucureşti, 1991
14. Dehelean, D., Lugscheider, E., Morkramer, U., Molnar, R. - Îmbunătăţirea rezistenţei la uzare abrazivă prin procedeul PTA folosind aliaje cu matricea fier armate cu carburi metalice, a 3-a conferinţă comună ASR - DVS "Dezvoltarea unor materiale noi şi prelucrarea lor prin sudare", 17 - 18 aprilie 1996, Bucureşti
15. Delamarian, C. - Manualul pentru mentenanţa şi re tehnologizarea instalaţiilor termoenergetice şi industriale, ed. Sudura, 1999
16. Dören, H., Wenicke, K. - Einfluss der Schweissparameter beim Plasma-Pulver-Auftragschweissen mit Pulver. DVS - Berichte, Bd. 100, 1985
17. Draugelates, U., Bouaifi, B. - Neufertigung und Instandsetzung von Stranggußführungsrollen durch Plasma - Auftragschweissen, DVS Berichte 142 (1991)
18. Draugelates, U. ş.a. - Verbesserung der tribologischen, korrosiven und thermischen Eigenschaften von Schutzschichten durch Eillagerung von WSC und NbC, DVS Berichte 142 (1991)
19. Draugelates, U. ş.a. - Internal cladding of small diameter pipes by plasma-powder weld surfacing, Thermische Spritzkonferenz, 1993
20. Draugelates, U. ş.a. - Plasma-Zweipulver-Auftrag-Schweissen mit Oxidkeramischen Pulverlegierungen, Mitteilung aus dem Institut für

- Schweisstechnik und Trennende Fertigungsverfahren (ISAF), TU Clausthal, Goslar, 1993
21. Draugelates, U., Bouaifi, B. – Verbesserung der tribologischen, korrosiven und thermischen eigenschaften von Schutzschichten durch Einlagerung von WSC und NbC, DGM Tagung vom 17 – 19 Juni 1992
 22. Eichhorn, P. - Plasmaspritzen von Keramiksichten, DVS Verlag, Düsseldorf, Dilthey, U. – Werkstoffe und Verfahrenstechnik beim Auftragschweissen im Behälter- und Apparatenbau, Metallbetrieb nr. 11, 1974
 23. Eschmayer, H. și Lugscheider, E. – Plasmaauftragschweissen mit hartstoff-Hartlegierung-verbundpulvern. DVS-Berichte, Bd. 91, 1981
 24. Frey, H., Kienel, G – Dünnschichttechnologie, VDI Verlag Düsseldorf, 1987
 25. Gavruța, P. ș.a. - Metode Numerice, Institutul Politehnic “Traian Vuia” Timișoara, 1990
 26. Gâdea, S. – Metalurgie fizică și studiul metalelor, vol I – III, Ed. Didactică și Pedagogică, București
 27. Geru, N. ș.a. – Materiale metalice. Structură, proprietăți, utilizări. Ed. tehnică, București, 1985
 28. Gheorghies, C. - Controlul structurii fine a metalelor cu radiații X, Ed. Tehnică, București, 1990
 29. Gotzmann, J. - Der Einflußder Korngröße auf den Strahlverschleiß von Keramiken, Ceramic Forum International, vol 69 (1992) nr. 9
 30. Grosch, J. ș.a. – Werkstoffauswahl im Maschinenbau, Expert Berlag 7032, Sindelfingen, 1986
 31. Harris, B. – Engineering Composite Materials, Institute of Metals, 1986, London
 32. Hume-Rottery, W., Raynor, G.V – The structure of metals and alloys, The Institute of Metals, London, 1962
 33. Hallen, H., Lugscheider, E. – Plasma Transferred Arc Surfacing with High Deposition Rates, Proceedings of the 4th NTSC, 1991, Pittsburg
 34. Hallen, H., Lugscheider, E. – Material Development of Rollers for continuous Casting, Proceedings of the International Spray Conference, 1992, Orlando, Florida
 35. Hallen, H., Herrström, C. - PTA Beschichtung mit Nickelaluminidpulvern, Thermische Spritzkonferenz, 1993
 36. Herrström, C. ș.a. – Factorial Analysis applied to the PTA process, DVS Berichte, Bd. 152, 1992
 37. Herrström, C. ș.a. - Factorial analysis applied to the PTA process, Thermische Spritzkonferenz, Düsseldorf, 1993
 38. Kieffer, R., Benesovski, F. – Hartstoffe, Springer-verlag, Wien, 1063
 39. Li, Z. - Entwicklung von plasmaverendelten Multikomponentenpulver auf Hartstoffbasis für die Beschichtungstechnologie, Teză de doctorat, RWTH Aachen, 1989
 40. Knotek, O. ș.a. - Hartlegierungen zum Verschleißschutz, Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf, 1975
 41. Krauskopf, F., Amer, A. – Carbidgehaltige Nickel und Eisenlegierungspulvern zum Plasmaauftragschweissen und Thermisches Spritzen, Thermische Spritzkonferenz, Düsseldorf, 1993

42. Lison, R. - Untersuchung der Herstellmöglichkeiten und der Eigenschaften diffusionsgeschweißter Übergänge von den Iva, Va und Via Metallen auf einen austenitischen oder ferritischen rost- und säurebeständigen Stahl.
43. Lugscheider, E., Mekidecke, A. - Standzeiterhöhung von Bauteilen durch Plasmaauftragschweißen mit Hartstoff-Hartlegierung-Verbundpulvern, Schweißen und Schneiden 42 (1990), vol.2
44. Lugscheider, E., Ait-Mekidecke, A. - Gefüge von Plasma-Pulver-Auftragschweißten Hartlegierung-Hartstoff-Verbundpulvern, DVS Berichte 142 (1991)
45. Lugscheider, E. ş.a. - High power plasma transferred arc surfacing - an alternative for surfacing large machinery parts, Thermische Spritzkonferenz, 1993
46. Lugscheider, E. ş.a. - PTA Beschichtungen mit Hartstoffzusätzen im Mikrometerbereich mittels Verbundpulverkonzept, Thermische Spritzkonferenz, 1993
47. Lugscheider, E. - Beschichtungstechnik, Vorlesung für die Vertieferrichtung Werkstofftechnik, RWTH Aachen 1994
48. Lugscheider, E. ş.a. - Verbesserung der Eigenschaften von Hartlegierungen durch auftraggeschweißte carbidische Verbundpulver, Schweißen und Schneiden 46 (1994), vol. 3
49. Lugscheider, E. - Verschleiss- und korrosionsbeständige Hartlegierungen auf Ni- und Co- Basis zum Plasmaauftragschweißen, DVS Berichte, Bd. 81, 1980
50. Lugscheider, E., Morkramer, U., Dehelean, D., Molnar, R. - Improving abrasive wear resistance of functional surfaces by Plasma Transferred Arc surfacing, Conferința "Realizări și perspective în domeniul sudării și încercării materialelor", 24 - 26 mai 1995, Timișoara
51. Lugscheider, E. ş.a. - Pulverizarea termică - Materiale noi și prelucrarea acestora prin pulverizare. A 3-a Conferință Comună ASR-DVS "Dezvoltarea unor materiale noi și prelucrarea lor prin sudare", 17 ÷ 18 Aprilie 1996, București
52. Krauskopf, F., Amer, A. - Carbide containing Ni- and Fe alloy powders for use in plasma transferred arc surfacing and thermal spraying - Thermische Spritzkonferenz, 1993, Düsseldorf
53. Micloși, V. ş.a. - Bazele proceselor de sudare, Ed. Didactică și pedagogică, București, 1982
54. Mișu, C. - Metode numerice în algebra liniară, Ed. Tehnică, București, 1988
55. Million, K. - Formgebendes schweißen Schwerkomponenten in Amlagenbau, OERLIKON, 1986
56. Mitelea, I., Budău, V. - Studiul metalelor - îndreptar tehnic, Ed. Facla, Timișoara, 1987
57. Mitelea, I., Molnar, R. - Efectul curentului de sudare asupra morfologiei stratului deșus la încărcarea prin sudare cu plasmă și pulberi, Revista de Tratamente Termice, an III, nr.8-9, 1994
58. Mitelea, I., Molnar, R. - Microstructure and properties of plasma powder transferred arc welded, tungsten carbide reinforced austenitic matrix layers, Lucrările Congresului Internațional de Știința și Ingineria Materialelor, Tom XLII (XLVI), Fasc. 1 - 2, 1996, Iași, România
59. Mitelea, I., Molnar, R. - The Influence of Some Technological parameters on the PTA Welded Layers Dilution, Jubilee Conference 60 Years of Scientific Co-operation in Welding, 19 - 21 November 1997, Timișoara, Romania

60. Mitelea, I., Molnar, R. – Tehnica acoperirii în plasmă a suprafețelor rezistente la uzare abrazivă folosind compozite ranforsate cu pulberi, *Analele Universității din Oradea, Fasc. Mecanică*, 1997
61. Mitelea, I., Molnar, R. - Stability of the plasma transferred arc hardfaced, tungsten carbide reinforced iron base welded composites, *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Seria Mecanică, Tom 43 (57), Fasc. 1, 1998, ISSN 1224 - 6077*
62. Mitelea, I., Molnar, R. - Microprobe analysis of plasma welded reinforced metal matrix composites, *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Seria Mecanică, Tom 43 (57), Fasc. 1, 1998, ISSN 1224 - 6077*
63. Mitelea, I., Molnar, R. – Systematic approach of the thin layer technique on plasma powder surface welding of carbide reinforced stainless steels, *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Seria Mecanică, Tom 44 (58), Fasc. 1, 1999, ISSN 1224 - 6077*
64. Mitelea, I., Molnar, R. – Stabilitatea la revenire a depunerilor compozite cu matrice metalică, conferința jubiliară "ISIM 25 ani", mai 1997, Timișoara.
65. Mitelea, I., Molnar, R. – The action of some technological parameters over the hardphase losses by melting on Plasma Transferred Arc (PTA) weld surfacing, in *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Seria Mecanică, Tom 45 (59), Fasc. 1, 2000, ISSN 1224 – 6077, sub tipar.*
66. Mitelea, I., Molnar, R. – Researches regarding the correlation between the hardphases molten during welding and the hardening of the PTA weld surfaced metal matrix composites, in *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Seria Mecanică, Tom 45 (59), Fasc. 1, 2000, ISSN 1224 – 6077, sub tipar.*
67. Mitelea, I., Bogdan, R. - Selecția și utilizarea materialelor ingineresti, Editura Politehnica, 1998, Timișoara.
68. Mitelea, I., Budău, V. - Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate, Ed. de Vest, Timișoara, 1992
69. Mitelea, I. ș.a. – Știința materialelor în construcția de mașini, Editura Sudura, Timișoara, 1999
70. Mitelea, I. ș.a. – Materiale și tehnologii în construcția de mașini, Lito IPT, Timișoara, 1990
71. Nacken, J.W. - Untersuchung des Einflusses von artfremden Hartstoffen auf die Mikrostruktur und den Verschleiß von schweißtechnischen Beschichtungen auf Fe-C-r-C Basis
72. Nichici, Al. ș.a. - Prelucrarea datelor experimentale, Lito IPT 1996
73. Oniciu, L., Grünwald, E. - Galvanotehnica, Ed. Științifică și Enciclopedică, București 1980
74. Panjin, Lu - Anwendung der Mathematischen Statistik in der Plasmabeschichtungstechnologie, Teză de doctorat, RWTH Aachen, 1989

75. Pavelescu, D. ș.a. – Tribologie, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1977
76. Pfeiffer, E., Zürn, H. – Schweißtechnische Oberflächenbeschichtung Plasma-Pulver-Auftragschweißen im Vergleich mit anderen Verfahren, Deutscher Verlag für Schweißtechnik
77. Pomaska, H.U. – MAG Schweißen, “Kein Buch mit sieben Siegeln”, Linde AG, Germania, 1989
78. Popescu, N. ș.a. – Tratamente termice neconvenționale, Ed. Tehnică, București, 1990
79. Popovits, D., Subu, T. - Bimetale. Ed. Facla, Timișoara 1982
80. Pumnea, C. ș.a. – Tehnici speciale de analiză fizico – chimică a materialelor metalice, Ed. Tehnică, București, 1988
81. Rădoi, M. ș.a. – Recondiționarea pieselor, Ed. Tehnică, București, 1986
82. Rădulescu, I. - Recondiționarea componentelor uzate, Ed. Tehnică, București, 1989
83. Reimann, H. - Hertlegierungen auf Nickelbasis mit artfremden Hartstoffen, Schweißen & Schneiden vol. 45 (1993), vol 2
84. Röthig, J. ș.a. - Eisenhartstoffbeschichtungen mit metastabiler Eisen-Mangan Matrix, Schweißen und Schneiden, nr. 3/1998
85. Ruge, J. – Handbuch der Schweißtechnik, Springer verlag, Berlin – New York, 1974
86. Sedricks, J. - Corrosion of stainless steels. John Wiley & Sons, New York, 1967
87. Sedricks, J. - Nickel and it's alloys, Pergamon Press, Londra, 1978
88. Spînulescu, I. - Fizica straturilor subțiri și aplicațiile acestora, Ed. Științifică, 1975
89. STATGRAPH - Documentație pentru utilizarea programului de calcul
90. Stoian, L. ș.a. – Tehnologia Materialelor, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1980
91. Subu, T. - Încărcarea prin sudare și metalizare pentru recondiționarea pieselor și fabricarea de piese noi, OID-DICM, București, 1992
92. Ștefănescu, F. ș.a. - Materialele viitorului se fabrică azi. Materiale compozite. Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1996
93. Tonoiu, I. ș.a. - Evaluarea modificărilor structurale ce apar la materialele compozite cu matrice de aluminiu prin măsurarea conductivității electrice.

- Conferința "Realizări și perspective în domeniul sudării și încercărilor de materiale,
Timișoara, 24 - 26 Mai 1995
94. Trușculescu, M. – materiale criogenice pentru construcții de mașini, OID-ICM,
București, 1986
95. Trușculescu, M., Ieremia, A. - Oțeluri inoxidabile și refractare, Ed. Facla
Timișoara, 1983
96. Wollner, M. - Beitrag zur Weiterentwicklung des Plasma-Pulver-
Auftragschweissverfahrens zum beschichten kleiner bis mittler
Werkstückgeometrien, Teză de doctorat, RWTH Aachen, 1989
97. Uetz, H. - Verschleiß, 1992
98. Vaș, A. ș.a. - Aplicațiile industriale ale plamei termice, Ed. Facla, Timișoara,
1979
99. Vuoristo, P. ș.a. - Herstellung, Struktur und Verschleißigenschaften von
detonationsgespritzten WC- und Cr₃C₂ - haltigen Cermetschichten, Thermische
Spritzkonferenz, 1993
100. Vermeșan, G. ș.a. – Introducere în ingineria suprafețelor, ed. Dacia, Cluj
Napoca, 1999
101. Wirtz, H. – Das Verhalten der Staehle beim Schweißen, Deutsche Verlag für
Schweisstechnik, Düsseldorf, 1973
102. * * * - ASTM G 65 - Conducting dry sand rubber wheel abrasion test
103. * * * - Îmbinări sudate eterogene, Oficiul de Informare și Documentare,
Ministerul Industriei, București, 1991
104. * * * - Încercarea materialelor, Ed. Tehnică, București 1996
105. * * * - Acoperiri metalice. Prescripții privind domeniile de utilizare a
acoperirilor metalice, ICSITTCM, București, 1979
106. * * * - AWS D14.3-77 – Specification for Welding Earthmoving and
Construction Equipment, American Welding Societz, Miami, Florida, 1977
107. * * * - Elemente ale fizicii sudării prin topire, OID – ICM, București, 1988

CUPRINS

| | |
|--|-----------|
| Capitolul 1. Abordarea sistemică a tehnicii straturilor subțiri | 1 |
| 1.1. Introducere..... | 1 |
| 1.2. Conceptul de material compozit..... | 2 |
| 1.2.1. Materialele compozite armate cu fibre și particule | 3 |
| Materiale compozite armate cu fibre. Principii de calcul. | 3 |
| 1.3. Elementele componente ale sistemului..... | 7 |
| 1.3.1. Proprietăți termofizice ale materialului:..... | 9 |
| a. Temperatura de topire a substratului: | 9 |
| b. Conductivitatea termică a substratului: | 9 |
| c. Conductivitatea electrică: | 9 |
| 1.3.2. Geometria componentei de acoperit..... | 10 |
| 1.4. Materiale pentru substrat și strat..... | 10 |
| 1.4.1. Materiale pentru formarea substratului | 10 |
| Aliajele fierului | 12 |
| Aliajele nichelului: | 14 |
| Cuprul și aliajele sale: | 14 |
| Materialele ceramice: | 14 |
| 1.4.2. Materialele de formare a stratului | 15 |
| Materiale metalice..... | 16 |
| a. Creșterea rezistenței la coroziune..... | 16 |
| b. Creșterea rezistenței la uzare..... | 16 |
| Aliaje cu bază de fier..... | 17 |
| a. Aliaje anticoroziune cu baza fier | 17 |
| b. Aliajele antiuzură cu baza fier. | 19 |
| Aliaje cu baza nichel | 21 |
| Aliajele cu baza cobalt | 23 |
| 1.5. Fenomene metalurgice la procesele de acoperire..... | 25 |
| Capitolul 2. Selecția procedeeilor de acoperire..... | 27 |
| 2.1. Analiza comparativă a procedeeilor de realizare a straturilor funcționale | 27 |
| 2.1.1. Grosimea stratului | 31 |
| 2.1.2. Costul procedeeilor de acoperire..... | 32 |
| 2.1.3. Tendința spre generare de distorsiuni..... | 36 |
| 2.2. Depunerile electrolitice..... | 42 |
| 2.3. Tratamente difuzionale | 43 |
| 2.4. Durificarea selectivă..... | 44 |
| 2.5. Straturi depuse subțiri (CVD, PVD)..... | 44 |
| 2.6. Tratamente superficiale cu energie concentrată | 45 |
| 2.7. Utilizarea placării | 46 |
| 2.8. Metodologia selecției materialelor | 47 |
| 2.8.1. Stabilirea profilului materialului | 47 |
| 2.8.2. Identificarea mecanismului de uzare | 51 |
| 2.9. Algoritm de selecție a tehnicilor de depunere a straturilor subțiri | 53 |

| | |
|--|------------|
| Capitolul 3. Procedeul PTA. Factorii ce definesc calitatea depunerilor | 60 |
| 3.1. Încărcarea prin sudare în plasmă cu pulberi | 60 |
| 3.1.1. Principiul procedeeului | 60 |
| 3.1.2. Sursa termică a procesului de sudare | 62 |
| a. Arcul pilot | 62 |
| b. Arcul transferat | 63 |
| 3.1.3. Soluții constructive pentru generatoarele de încărcare | 64 |
| 3.2. Influența unor parametri tehnologici asupra diluției depunerilor realizate în plasmă cu arc transferat | 66 |
| 3.2.1. Introducere | 67 |
| 3.2.2. Efectul variației curentului de sudare asupra pătrunderii, eficienței și morfologiei depunerii | 68 |
| 3.3. Efectul parametrilor de regim asupra diluției depunerilor. Programarea factorială a experimentului | 73 |
| 3.3.1. Planificarea factorială a experimentului cu 8 factori de influență | 73 |
| 3.3.2. Planificarea experimentului factorial | 74 |
| 3.3.3. Rezultate experimentale | 75 |
| 3.4. Domenii clasice și noi de utilizare a procedeeului PTA | 78 |
| 3.5. Discuții | 80 |
| 3.5.1. Creșterea diluției | 80 |
| 3.5.2. Scăderea diluției: | 81 |
| 3.6. Concluzii: | 81 |
| | |
| Capitolul 4. Examinarea microstructurală a depunerilor realizate folosind amestecuri de pulberi | 82 |
| 4.1. Depuneri realizate cu aliaj formator de matrice P 40 | 82 |
| 4.1.1. Amestecul P 40 + 25% WSC | 83 |
| 4.1.2. Amestecul P 40 + 40% WSC | 88 |
| 4.1.3. Amestecul P 40 + 55% WSC | 93 |
| 4.1.4. Amestecul P 40 + 65% WSC | 98 |
| 4.2. Depuneri cu aliaj formator de matrice cod W 1.4115 | 103 |
| 4.2.1. Depuneri realizate cu amestecul W 4.115 + 25% WSC | 104 |
| 4.2.2. Depuneri realizate cu amestecul W 4.115 + 40% WSC | 106 |
| 4.2.3. Depuneri realizate cu amestecul W 4.115 + 55% WSC | 111 |
| Concluzii | 116 |
| 4.3. Depuneri cu aliaj formator de matrice P 40 și adaos de WSC și TiC | 116 |
| 4.3.1. Depuneri realizate cu amestecul P 40 + 40% WSC + 12,4% TiC | 116 |
| 4.3.2. Depuneri realizate cu amestecul P 40 + 55% WSC + 15,2% TiC | 121 |
| 4.4. Concluzii: | 125 |
| | |
| Capitolul 5. Analiza sclerometrică a depunerilor compozite realizate prin procedeul PTA | 126 |
| 5.1. Introducere | 126 |
| 5.2. Încercări privind proporția fazelor dure topite la sudare și efectul lor asupra durității matricei metalice | 126 |
| 5.2.1. Amestecuri cu baze P 40 | 130 |
| 5.2.2. Depuneri realizate folosind aliaje din clasa W 1.4115 și ANSI 316 Lc | 132 |

| | |
|--|------------|
| 5.3. Stabilitatea la "revenire" a straturilor dure depuse prin sudare în plasmă din compozitul oțel inoxidabil - carburi de wolfram..... | 134 |
| 5.3.1. Examinări sclerometrice..... | 135 |
| 5.4. Analiza factorială a efectului principalilor parametri tehnologici de regim asupra microdurității depunerilor | 140 |
| 5.4.1. Programarea experimentului | 140 |
| 5.4.2. Rezultate..... | 141 |
| 5.4.3. Discuții privind relația parametru tehnologic - duritate a matricei: | 146 |
| Creșterea durității | 146 |
| Scăderea durității | 146 |
| 5.5. Concluzii: | 147 |
| Capitolul 6. Investigații asupra structurii fine a depunerilor..... | 148 |
| 6.1. Introducere..... | 148 |
| 6.2. Examinarea prin difracție RX a depunerilor realizate..... | 148 |
| 6.3. Rezultate experimentale privind difracția RX..... | 149 |
| 6.4. Examinări folosind microsonda electronică | 155 |
| 6.5. Rezultate experimentale folosind microsonda electronică..... | 156 |
| 6.6. Concluzii..... | 166 |
| Capitolul 7 - Rezistența la uzare abrazivă a depunerilor realizate..... | 167 |
| 7.1. Introducere..... | 167 |
| 7.2. Mecanismul uzării abrazive a compozitelor armate cu faze dure. Aparatura experimentală | 167 |
| 7.3. Rezultate experimentale. | 171 |
| 7.4. Concluzii: | 176 |
| Capitolul 8. Contribuții personale..... | 177 |
| Aspecte de ordin funcțional și de asigurarea calității..... | 177 |
| Aspecte de ordin microstructural..... | 177 |
| Aspecte de ordin sclerometric..... | 179 |
| Aspecte privind structura fină a depunerilor..... | 180 |
| Aspecte privind rezistența la uzare abrazivă a depunerilor..... | 180 |
| Anexe | |
| Anexa 1. Materiale utilizate în programul experimental..... | 182 |
| Anexa 2. Parametri de regim la încărcarea prin sudare în arc de plasmă cu pulberi | 185 |
| Anexa 3. Măsurători cantitative folosind microsonda electronică..... | 189 |
| Anexa 4. Valori ale măsurătorilor de duritate la testele de stabilitate la revenire a depunerilor realizate..... | 199 |
| BIBLIOGRAFIE | 245 |