

Opera suspicionată (OS)
Suspicious work**Opera autentică (OA)**
Authentic work

OS	PETRESCU Doina. Cercetări privind pulverizarea termică cu aplicații la recondiționarea și acoperirea preventivă a pieselor. Teză de doctorat. Universitatea Petrol și Gaze. Ploiesti. 2008.
OA	SOBOLEV, V.V.; GUILMANY, J.M.; CALERO, J.A. <i>Simulación de los Procesos Dinámicos durante el vuelo de las Partículas de Polvo de Carburo de Cromo- NiCr en Proyección HVOF</i> . Presentació comunicació, Decimoprimeras Jornadas Técnicas de Soldadura. V: 1, p: 261-273, Madrid, Espanya. 1996.

Incidența minimă a suspiciunii / Minimum incidence of suspicion

p.141:23 - p.144:03	p.262.08d - p263:40d
p.141: Figura 6.4	p.262:Figura 1
p.145:11 – p.148:13	p.264:12s – p.265:19s
p.149:15 – p.155:00	p.265:05d – p.271:43d
p.149:Tabelul 6.1	p.265:Tabla 1
p.150:Tabelul 6.2	p.266:Tabla 2
p.150: Figura 6.6	p.267: Figura 2
p.151: Figura 6.7	p.267: Figura 2
p.152: Figura 6.8	p.267: Figura 4
p.152: Figura 6.9	p.268: Figura 5
p.152: Figura 6.10	p.268: Figura 6
p.152: Figura 6.11	p.269: Figura 7
p.153: Figura 6.12	p.268: Figura 6
p.153: Figura 6.13	p.269: Figura 7
p.154: Figura 6.14	p.270: Figura 10
p.154: Figura 6.15	p.271: Figura 11

Fișa întocmită pentru includerea suspiciunii în Indexul Operelor Plagiate în România de la
Sheet drawn up for including the suspicion in the Index of Plagiarized Works in Romania at
www.plagiate.ro

Vezi argumentarea calificării de plagiat pe pagina următoare.

Notă: p.72:00 semnifică textul de la pag.72 până la finele paginii.

Notes: p.72:00 means the text of page 72 till the end of the page.

Argumentarea calificării

Nr. crt.	Descrierea situației care este încadrată drept plagiat	Se confirmă
1.	Preluarea identică a unor pasaje dintr-o operă autentică publicată, fără precizarea întinderii și menționarea provenienței și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	✓
2.	Preluarea identică a unor pasaje dintr-o operă autentică, rezumate ale unor opere anterioare operei autentice, fără precizarea întinderii și menționarea provenienței și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	
3.	Preluarea identică a unor figuri dintr-o operă autentică fără menționarea provenienței și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	✓
4.	Preluarea identică a unor poze dintr-o operă autentică fără menționarea provenienței și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	
5.	Preluarea identică a unor tabele dintr-o operă autentică fără menționarea provenienței și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	✓
6.	Republicarea unei opere anterioare prin includerea unui nou autor fără contribuție explicită în lista de autori	
7.	Republicarea unei opere anterioare prin excluderea unui autor din lista inițială de autori	
8.	Preluarea identică de pasaje dintr-o operă autentică fără precizarea întinderii și menționarea provenienței, fără nici o intervenție care să justifice exemplificarea sau critica prin aportul creator al autorului care preia și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	✓
9.	Preluarea identică de figuri sau reprezentări grafice dintr-o operă autentică fără menționarea provenienței, fără nici o intervenție care să justifice exemplificarea sau critica prin aportul creator al autorului care preia și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	✓
10.	Preluarea identică de tabele dintr-o operă autentică fără menționarea provenienței, fără nici o intervenție care să justifice exemplificarea sau critica prin aportul creator al autorului care preia și însușirea acestora într-o lucrare ulterioară.	✓

Actualizat la 7 iulie 2015.

Notă: Prin „proveniență” se înțelege informația din care se pot identifica cel puțin numele autorului / autorilor, titlul operei, anul apariției.

UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ ȘI ELECTRICĂ



Ing. dpl. Doina Petrescu

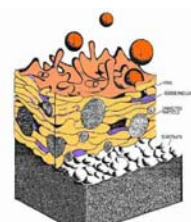
Tema tezei de doctorat:

**Cercetări privind pulverizarea termică
cu aplicații la recondiționarea și acoperirea
preventivă a pieselor**

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Niculae Napoleon Antonescu

2008



CUPRINS

INTRODUCERE	5
CAPITOLUL 1 – CERCETĂRI PRIVIND DEPUNERILE SUPERFICIALE PRIN DIFERITE PROCEDEE TEHNOLOGICE	9
1.1. Metode și tehnologii de acoperire a suprafețelor	9
1.1.1. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a unui arbore în trepte de la priza de forță.....	12
1.1.2. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a unui arbore în trepte al variatorului	13
1.1.3. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a unui arbore drept al variatorului	15
1.1.4. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a unui arbore în trepte al strungului automat.....	16
1.1.5. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a unui arbore cu melc.....	17
1.1.6. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a unei grinzi de susținerea unei linii de transport	17
1.1.7. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a unor defecte de material.....	18
1.1.8. Tehnologia de recondiționare prin pulverizarea termică a pistoanelor de pompe de extracție	20
1.2. Materiale pentru straturi depuse rezistente la uzare.....	22
1.3. Materialele din structura straturilor rezistente la coroziune.....	27
CONCLUZII	29
CAPITOLUL 2 – CERCETĂRI TEORETICE PRIVIND SISTEMELE DE ALIAJE METASTABILE CU STRUCTURĂ AMORFĂ	31
2.1. Considerații generale și proprietăți ale aliajelor cu structură amorfă	31
2.2. Aliajele cu structură amorfă care formează “sticle metalice”	33
2.3. Condiții de formarea și menținerea stării amorfe.....	34
2.4. Condițiile necesare pentru obținerea structurilor amorfe.....	35
2.4.1. Principalele efecte structurale și constituționale ale răcirii rapide.....	36
2.5. Elaborarea de aliaje metastabile utilizând răcirea rapidă.....	37
2.5.1. Condițiile necesare formării fazelor metastabile prin solidificarea rapidă a stratului depus	38
2.6. Structura sticlelor metalice metastabile aflate în stare solidă amorfă.....	47
CONCLUZII	49

CAPITOLUL 3 – CERCETĂRI TEORETICE PRIVIND MODELAREA ȘI SIMULAREA PROCESELOR DINAMICE LA PULVERIZAREA TERMICĂ A PARTICULELOR DE PULBERE CU JET DE PLASMĂ.....	51
3.1. Aspecte generale privind mecanismul de formare a straturilor obținute prin pulverizare termică cu jet de plasmă la presiune atmosferică	51
3.2. Cercetări privind viteza particulelor în jetul de plasmă	52
3.3. Cercetări privind temperatura particulelor din jetul de plasmă.....	55
3.4. Dinamica deformării particulelor din jetul de plasmă	62
3.4.1. Deformarea la impactul cu substratul a particulei topite. Bilanțul energetic.....	62
3.4.2. Gradul de aplatizare al particulelor la impactul cu substratul.....	64
3.4.3. Interacțiunea particulelor pulverizate termic cu substratul	69
3.5. Formarea straturilor prin solidificarea particulelor din jetul de plasmă, la impactul cu substratul	70
3.6. Aderența particulelor pulverizate termic la interfață	82
3.7. Transformări de stare la depunerile prin pulverizare termică cu jet de plasmă.....	87
CONCLUZII	88

CAPITOLUL 4 – CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ELABORAREA UNOR SISTEME DE ALIAJE/PULBERI ÎN VEDEREA OBTINERII UNOR STRATURI AMORFE, NANOCRISTALINE.....	91
4.1. Cercetări teoretice și experimentale în vederea obținerii unor aliaje/pulberi amorfizabile	91
4.2. Procesul de pulverizare termică cu jet de plasmă la presiunea atmosferică	95
4.3. Tehnologia de pregătirea a suprafeței materialului de bază/substratului în vederea pulverizării termice.....	99
4.3.1. Prelucrarea prealabilă a materialului de bază/substratului.....	99
4.3. 2. Spălarea suprafeței materialului de bază/substratului.....	99
4. 3. 3. Pregătirea suprafeței materialului de bază/substratului	99
4.3.4. Parametri tehnologici ai depunerii stratului	102
4.4. Dependența dintre stratului pulverizat termic și parametrii tehnologici ai depunerii	106
4.5. Cercetări privind optimizarea parametrilor tehnologici de pulverizare termică la depunerea aliajelor elaborate.....	109
CONCLUZII	115

CAPITOLUL 5 – CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND STRUCTURA ȘI PROPRIETĂȚILE STRATURILOR DEPUSE ÎN JET DE PLASMĂ CU SISTEMUL DE ALIAJE P I, P II, P III, P IV	117
5.1. Cercetări privind acoperirile realizate cu sistemul de aliaje al pulberi P I	118
5.2. Cercetări privind acoperirile realizate cu sistemul de aliaje al pulberii P II.....	121
5.3. Cercetări privind acoperirile realizate cu sistemul de aliaje al pulberii P III.....	123

5.4. Cercetări privind acoperirile realizate cu sistemul aliaje elaborat P IV.....	124
5.5. Analiza tipurilor de defecte ce apar în acoperirile realizate cu sistemele de aliaje ale pulberilor P I, P II, P III, P IV	128
5.6. Analiza aderenței straturilor depuse cu sistemul de aliaje ale pulberii P IV.....	131
5.7. Cercetări privind rugozității straturilor depuse cu aliajul P IV	133
CONCLUZII	135

CAPITOLUL 6 – CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND MODELAREA ȘI SIMULAREA PROCESELOR DINAMICE LA PULVERIZAREA TERMICĂ CU FLACĂRĂ DE MARE VITEZĂ.....	139
6.1. Aspecte generale privind principiul metodei de depunere cu flacără de mare viteză.....	139
6.2. Cercetări teoretice privind procesele dinamice caracteristice procedurii de acoperire prin pulverizare termică cu flacără de mare viteză	141
6.2.1. Analiza proceselor ce se produc în camera de ardere	142
6.2.2. Analiza proceselor ce au loc în zona de expansiune a fluidului	143
6.2.3. Procesele dinamice de expansiune a fluidului la ieșirea din pistol	144
6.3. Procesele dinamice de transfer de moment fluid-particulă.....	145
6.4. Procesele dinamice de transfer de căldură al particulelor de pulbere	146
6.5. Procesele dinamice de transfer de masă fluid-particulă, în timpul pulverizării termice.....	147
6.6. Simularea matematică a proceselor dinamice la pulverizarea termică a particulelor de pulbere de Cr ₃ C ₂ -NiCr cu flacără de mare viteză. Comparatie cu rezultatele obținute experimental.....	148
CONCLUZII	155

CAPITOLUL 7 – CONCLUZII. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII NOI DE CERCETARE.....	157
7.1. Concluzii	157
7.2. Contribuții personale.....	165
7.3. Direcții noi de cercetare	166

BIBLIOGRAFIE	167
---------------------------	------------

- viteza gazului.....300-770m/s
- viteza particulelor.....150-650m/s
- temperatura amestecului gaz-particule.....1350-2500 °C
- gaze utilizate: oxigen.....14-28 m³ /h
- gaz combustibil.....14-43 m³ /h
- viteza de depunere.....2,2-9kg/h
- eficiența termică.....50-70%
- eficiența depunerii.....70-90%.

Acest procedeu de pulverizare termică are o largă aplicabilitate practică, fiind utilizat la realizarea straturilor de protecție:

- + protecție împotriva coroziunii: industria chimică și petrochimică, structura metalică a podurilor și podețelor, platforme de foraj marin, etc.;
- + protecție împotriva uzurii: valțuri, lagăre, pistoane, plungere, lagăre de alunecare, manșoane de protecție pentru arbori cotiți, etc.;
- + protecție termochimică (thermal barrier coatings): ZrO₂ – MgO, ZrO₂ – Y₂ O₃, ZrO₂ – CaO, cu aplicații în construcția de turbine și motoare termice, în industria aeronautică și spațială;
- + straturi de plumb pentru ecrane de protecție împotriva radiațiilor Röntgen și Gama;
- + straturi de protecție pentru formele de turnare;
- + recondiționarea unor piese (arbori cu came, îmbinări articulate, poansoane).

6.2. Cercetări teoretice privind procesele dinamice caracteristice procedurii de acoperire prin pulverizare termică cu flacără de mare viteză

Pe baza studiilor din literatura tehnică de specialitate, s-a realizat o modelare a dinamicii procesului de depunere cu flacără de mare viteză.

Realizarea unui model matematic, pentru procesul de depunere cu flacără de mare viteză, presupune folosirea de modele (matematice) independente pentru următoarele componente:

- parametrii fluidului (temperatură, presiune, viteză);
- transferul de moment fluid-particulă;
- transferul de căldură;
- transferul de masă în timpul pulverizării termice.

Modelul matematic propus în lucrarea de față ține cont de procesul de ardere, de dinamica particulelor, de dinamica fluidului în interiorul și la ieșirea din pistolul pentru pulverizarea termică precum și de procesele de transfer de căldură și masă.

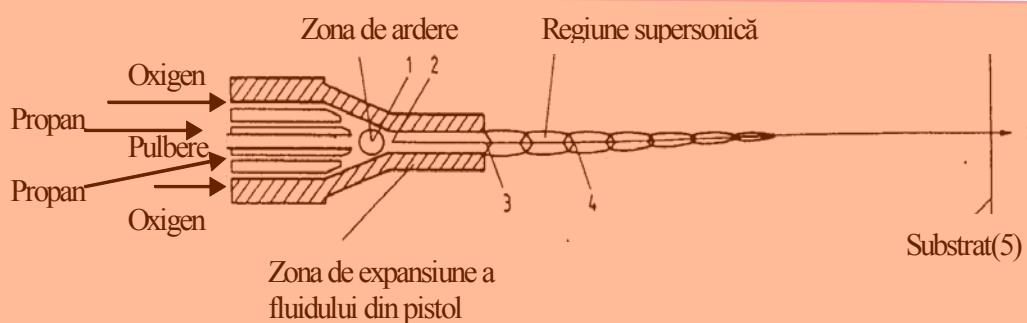


Figura 6.4. Schema pulverizării termice cu flacără de mare viteză:
1, 2, 3, 4 - zonele de studiu pentru vitezele și temperaturile fluidului.

Esențial pentru acest model este determinarea valorilor vitezelor și temperaturilor fluidului (amestecului format din particulele și fluidul combustibil) din punctele caracteristice aflate pe traseul unei particule (fig. 6.4). Relațiile de calcul vor fi specifice celor două componente-fluid și particulă, deoarece la procedeul de depunere cu flacără de mare viteză, fracția masică η , are o valoare foarte mică ($\eta \ll 1$), sistemul de ecuații pentru fluid-particulă poate fi separat în două părți: una pentru fluid și cealaltă pentru particulele de pulbere. De asemenea, factorul care ține cont de interacțiunea fluid-particulă se introduce în ecuația cinetică a transferului de cantitate de mișcare pentru particulă [48, 119].

6.2.1. Analiza proceselor ce se produc în camera de ardere

Procesul de ardere (punctele 1, 2 fig. 6.3) cu flacără de mare viteză poate fi considerat similar celui care are loc la propulsia rachetelor, putându-se astfel utiliza același model unidimensional, care poate folosi atât pentru compoziții de echilibru, cât și pentru situații care au drept consecință stările componentelor, deoarece se elimină rapid produsele de reacție, compoziția rămânând aceeași, în principiu [64].

Produsele de ardere sunt foarte departe de o compoziție de echilibru, astfel că se poate considera drept cea mai realistă situație aceea în care compoziția pulberii se conservă (rămâne aceeași) [63]. Fără îndoială, pentru obținerea unor rezultate cât mai precise, este necesar să se includă în model procesele cinetice de ardere și fenomenele dinamice ale fluidului în camera de ardere.

Sistemul general de ecuații, care descrie debitul turbulent și transferul de masă în timpul procesului de ardere, este extrem de complicat, pentru cazul unidimensional. Pe de altă parte, parametri precum viscozitatea, coeficienții de difuziune, constantele vitezei de ardere etc., aflați la temperaturi înalte, sunt foarte puțin cunoscuți. Iată de ce se justifică necesitatea introducerii corecțiilor semiempirice, pentru obținerea unor rezultate cât mai precise.

Temperatura T_{f1} și viteza fluidului v_{f1} în camera de ardere se pot calcula cu o formulă aproximativă care folosește factori de corecție determinați experimental, pentru ajustarea temperaturii și vitezei fluidului (din camera de ardere), când se cunoaște densitatea materialului care trebuie pulverizat termic (relația 6.1, 6.2, 6.3) [128]:

$$T_{f2} = T_{f1} + b_1 [2500 \cdot \varphi - 700(\varphi - 1)], \quad \varphi > 1, \text{ [K]} \quad (6.1)$$

$$T_{f1} = T_{f0}, \text{ [K]} \quad (6.1')$$

$$v_{f2} = b_2 \cdot v_{f1}, \text{ [m/s]} \quad (6.2)$$

$$v_{f1} = \frac{0,78}{\left(\frac{10^4}{T_{f2}} + \frac{900}{T_{f1}} \right)^{4,938} p_{f1}}, \text{ [m/s]} \quad (6.3)$$

în care: b_1, b_2 sunt factori de corecție;

φ - densitatea pulberii, $[\text{kg/m}^3]$;

T_{f0} - temperatura inițială a fluidului, în [K];

T_{f1} - temperatura fluidului în zona 1 din camera de ardere, [K];

T_{f2} - temperatura fluidului în zona 2, K;

p_{f1} - presiunea fluidului în camera de ardere, [Pa];

v_{f1} - viteza fluidului în camera de ardere, [m/s],

v_{f1} - viteza fluidului în camera de ardere, [m/s].

6.2.2. Analiza proceselor ce au loc în zona de expansiune a fluidului

Pentru a simplifica modelul matematic, se consideră că procesele ce au loc în zona de expansiune a pistolului (punctele 2, 3, fig.6.4), au caracter adiabatic, iar în expresia parametrilor caracteristici vor fi utilizate valorile medii ale mărimilor termodinamice.

Considerând că în poziția corespunzătoare punctului 3 (la ieșirea din pistol) gazul propulsor atinge viteza sunetului (deci este caracterizat printr-un număr al lui Mach în punctul 3, $M_3 = 1$), se poate scrie relația de calcul a coeficientului căderii de presiune, corespunzător unui punct aflat la distanța z de punctul 2 (aflat la ieșirea din pistol).

Pentru calcul se vor utiliza valorile medii pentru următorii parametri termodinamici: căldura specifică (c_p), funcția căldurilor specifice (γ), constanta universală a gazelor (R), masa moleculară a fluidului (m) și implicit pentru raportul R/m , notat cu r . Ținând seama de relația dintre lungimea pistolului L și numărul lui Mach, M , în interiorul pistolului și la o distanță z de la intrare până în punctul 3 (fig. 6.4), rezultă formula coeficientului căderii de presiune χ [119,128]:

$$\chi = \frac{D}{(L-z)} \left\{ \frac{1-M^2}{\gamma M} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma+1)M^2}{2+(\gamma-1)M^2} \right] \right\}, \quad (6.4)$$

Temperatura fluidului în zona 3 (fig. 6.4), se calculează cu relația [119,120]:

$$T_{f3} = \frac{2+(\gamma-1)M_2^2}{2+(\gamma-1)M^2} T_{f2}, \quad [\text{K}] \quad (6.5)$$

iar presiunile în punctele 2 și 3 (vezi fig. 6.4) sunt determinate de relațiile [30, 52]:

$$p_{f2} = R \cdot \rho_{f2} \cdot T_{f2}, \quad [\text{Pa}] \quad (6.6)$$

$$p_{f3} = p_{f2} \cdot M_2 \frac{K_2}{K_3} \sqrt{\frac{T_{f3}}{T_{f2}}}, \quad [\text{Pa}] \quad (6.7)$$

în care: γ este funcția căldurilor specifice, în $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$;

$T_{f2,3}$ – temperatura fluidului în punctele 2, 3 (fig. 6.4), în $[\text{K}]$;

$p_{f2,3}$ - presiunea fluidului în punctele 2, 3 (fig. 6.4), în $[\text{Pa}]$;

$R = \frac{R_M}{M}$, relația de echivalență, dintre constanta universală a gazelor și masa moleculară a

fluidului, în $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$;

ρ_{f2} – densitatea fluidului în punctul 2 (fig. 6.4), în $[\text{kg}/\text{m}^3]$;

M_2 - numărul lui Mach în punctul 2 (fig.6.4) ;

K_1, K_2, K_3 - factori de corecție care țin cont de viteza sunetului, având efecte disipative în interiorul pistolului.

Utilizând expresia densității fluidului [52,119]:

$$\rho_f = \rho_{f2} \frac{K_2 \cdot M_2}{K \cdot M} \sqrt{\frac{T_{f2}}{T_f}}, \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (6.8)$$

$$L_c = D(14,712M_4 + 15,31), 1,6 \leq M_4 \leq 2,4, \text{ [m]} \quad (6.13)$$

în care: D este diametrul pistolului, m;

M_4 - numărul lui Mach în punctul 4 (fig.6.4).

Ca urmare a vitezelor mari, care se utilizează în proiecția cu flacără de mare viteză, se iau în considerare numai componentele longitudinale ale vitezei fluidului și particulei [119,128]. În afara pistolului se consideră vitezele fluidului v_{f3} și v_{f4} , temperaturile fluidului T_{f3} (relația 6.5) și T_{f4} (relația 6.16), în punctele 3 și 4 [30,52,119,128]:

$$v_{f3} = b_2 \cdot v_{f2}, \text{ [m/s]} \quad (6.14)$$

$$v_{f4} = b_2 \cdot v_{f3}, \text{ [m/s]} \quad (6.15)$$

$$T_{f4} = \frac{2 + (\gamma - 1)M_3^2}{2 + (\gamma - 1)M^2} T_{f3}, \text{ [K]} \quad (6.16)$$

6.3. Procesele dinamice de transfer de moment fluid-particulă

Ținând cont de interacțiunile fluid-particulă, precum și de accelerarea/decelerarea fluidului, ecuația de mișcare pentru particulele sferice este următoarea [30, 55,102,119]:

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} \frac{\rho_f}{\rho_p} (v_f - v_p) |v_f - v_p| + \frac{18\mu_f \cdot \eta}{d_p^2 \cdot \rho_f} \left(1 + 0,15 \text{Re}^{0,687}\right) (v_f - v_p) - \frac{3b_3}{4} \frac{d(v_f - v_p)}{dt} \quad (6.17)$$

în care: v_p este viteza particulei, în [m/s];

v_f - viteza fluidului, în [m/s];

C_D - coeficientul de transport al particulei, în [m/s];

d_p - diametrul particulei, în [m];

ρ_p - densitatea particulei, în [kg/m];

ρ_f - densitatea fluidului, în [kg/m];

μ_f - viscozitate dinamică a fluidului, în [kg/(m·s)];

η - fracția volumetrică de particule;

Re - criteriul lui Reynolds;

b_2 - coeficient de corecție.

Al doilea termen din partea dreaptă a egalității descrie interacțiunile fluid-particulă [48, 46] și aport termic, introducând efectul accelerării/decelerării debitului de fluid [128]. Coeficientul de transport C_D se deduce din ecuația (6.17)[119]:

$$C_D = \frac{23,707}{\text{Re}} \left(1 + 0,165 \text{Re}^{\frac{2}{3}} - 0,5 \text{Re}^{-0,1} \right), \quad (6.18)$$

unde:

$$0,15 \leq \text{Re} \leq 500, \quad (6.19)$$

$$\text{Re} = d_p v_p \rho_f \mu_f^{-1}, \quad (6.20)$$

Condiția inițială pentru ecuația (6. 17) este:

$$v_p(0) = v_{p0} , \quad (6.21)$$

iar poziția rezultă din relația:

$$z(t) = \int_0^t v_p(t) dt \quad (6.22)$$

în care: t este timpul, în s.

6.4. Procesele dinamice de transfer de căldură al particulelor de pulbere

Comportamentul termic al particulelor sferice rezultă din ecuația de conductivitate a căldurii(6.23) [119,120]:

$$\rho_p \cdot c_p \cdot \psi(T_p) \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^2 \cdot \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \right); \quad 0 \leq x \leq R_p, t > 0 \quad (6.23)$$

$$\psi(T_p) = 1 + q \cdot c_p^{-1} (1-k)^{-1} (T_K - T_L)^{-1} \left(\frac{T_K - T_L}{T_p - T_L} \right)^{\frac{2-k}{1-k}}; \quad T_S \leq T_p \leq T_L; \quad (6.24)$$

$$\Psi(T_p) = 1; \quad T_p > T_S, T_p < T_L, \quad (6.25)$$

în care: c_p este căldura specifică a particulei, în [J·Kg /K];

ρ_p - densitatea particulei, în [kg /m³];

Ψ - parametru de eficiență/optim;

T_p - temperatura particulei, în [K];

T_K - temperatura de fuziune a particulei, în [K];

T_L - temperatura particulei aflată în stare fluidă, în [K];

T_S - temperatura particulei aflată în stare solidă, în [K];

x - coordonata radială a particulei, în [m];

k – coeficient de corecție;

q – căldura latentă de fuziune, în [J/kg];

λ_p - conductivitate termică a particulei, în [W /(m·K)];

q - căldura latentă de fuziune, în [J /kg].

Temperatura particulei de pulbere T_p este funcție de timpul t și de coordonata radială x. Pentru rezolvarea ecuației (6.26) sunt necesare două condiții la limită. În centrul particulei se introduce condiția de optim pentru temperatură (6.25), în timp ce pentru suprafața particulei se introduce ecuația de interschimb de căldură între particulă și fluid (6.26) [55,119]:

$$\frac{\partial T_p}{\partial x} (0, t) = 0. \quad (6.26)$$

În momentul inițial, temperatura particulei în orice punct este constantă și egală cu T_{p0} . Coeficientul de transfer de căldură α se determină din ecuația semiempirică Ranz-Marshall [55,128]:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d_p}{\lambda_f} = 2 + 0,6 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}, \quad (6.27)$$

$$\text{Pr} = \frac{c_f \mu_f}{\lambda_f}, \quad (6.27')$$

Pentru calculul criteriilor Re, Nu, Pr se introduc valorile medii ale mărimilor densității ρ_f , viscozității dinamice μ_f , căldurii specifice c_f și conductivității termice λ_f în intervalul $T_S \leq T \leq T_L$.

Atât ecuația care definește transferul de moment cât și cea care definește transferul de căldură nu țin cont de efectul Knudsen [55, 102].

6.5. Procesele dinamice de transfer de masă fluid-particulă, în timpul pulverizării termice

Analiza proceselor dinamice de transfer de masă, în timpul pulverizării termice cu flacără de mare viteză, s-a făcut pentru aliajul de tipul $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$. Transferul de masă, în timpul pulverizării termice, are loc ca urmare a dizolvării unei părți de carburi și, astfel, crește proporția de C și de Cr în faza metalică [95, 119, 137].

Rezultatele experimentale arată că cea mai mare parte din carbura de crom, Cr_3C_2 , se regăsește după pulverizare, în timp ce particulele de mărime mică suferă o soluție parțială sau totală în timpul pulverizării termice [94, 120, 129, 137].

Structura stratului depus (amorfă și/sau monocristalină), în zonele de fuziunea parțială sau totală, este în funcție de viteza de răcire a particulelor.

Pentru evaluarea proprietăților termodinamice ale materialului particulelor, trebuie să se țină cont și de oxidarea acestora în timpul pulverizării termice și de forma oxidului de crom (în special de Cr_2O_3).

Se ia în calcul fracția volumetrică globală de carburi ε , dată de relația (6.28) [119, 120, 121, 129]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 - A \cdot t)^{\frac{3}{2}}; \quad (6.28)$$

$$\varepsilon = 1 - \beta; \quad (6.28')$$

$$A = \frac{1}{t_*} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_*}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{2}{3}} \right]; \quad (6.28'')$$

unde: β este fracția volumetrică de fază metalică, în [%];

ε_* - este fracția volumetrică finală de carbură de crom, în [%];

ε_0 - fracția volumetrică inițială de carbură de crom, în [%];

t - timpul de pulverizare termică, în [s];

A - coeficient care ține seama de fracția volumetrică inițială și finală de carbură de crom, în [s^{-1}];

- fracția volumetrică inițială de carbură de crom, $\varepsilon_0 = 0,3$;
- fracția volumetrică inițială de oxid de crom, $\delta_0 = 0,005$;
- fracția volumetrică finală de oxid de crom, $\delta = 0,05$;
- debitul de propan, $Q_{Pr} = 60$ l/min;
- debitul de oxigen, $Q_{O_2} = 440$ l/min;
- debitul de gaz transportor (azot), $Q_{N_2} = 20$ l/min;
- lungimea zonei de ardere și expansiune(fig.6.3), $L = 0,1$ m.

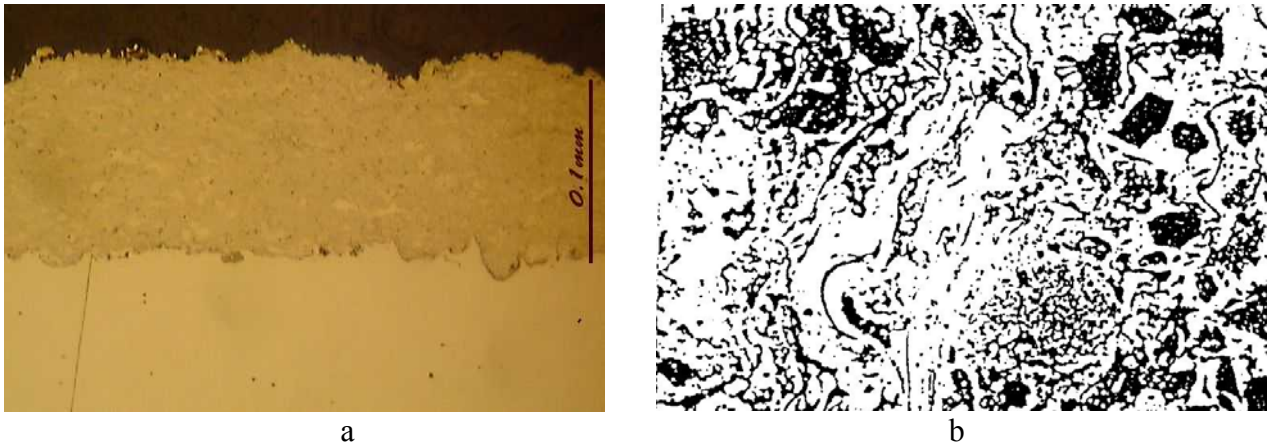


Figura 6.5. Micrografiile straturilor depuse cu sistemul de aliaje Cr_3C_2-NiCr pe substrat de oțel 34Cr4Mo:
a- micrografia structurii transversale a depunerii; c- miografia frontală a structurii depunerii.

Problema termică și cea mecanică au rezolvare cu ajutorul algoritmilor descriși în paragrafele din subcapitolele anterioare.

Pentru simularea matematică se va considera următoarea reacție care are loc în camera de ardere a pistolului [119, 120, 128]:



Proprietățile produselor de ardere (viscozitate, densitate, căldură specifică, conductivitate termică), folosite pentru determinarea parametrilor fluidului, s-au obținut ca valori medii.

Tabelul 6.1. Proprietățile pulberii Cr_3C_2-NiCr

Proprietăți	Ni	Cr	Cr_3C_2	Cr_2O_3
Densitatea, kgm^{-3}	8 900	7 190	6 600	5 210
Căldura specifică, $Jkg^{-1}K^{-1}$	471	460	300	880
Conductivitatea termică, $Wm^{-1}K^{-1}$	83	67	95	22
Difuzivitatea termică, $10^{-5}m^2s^{-1}$	1,98	2,03	4,80	0,48
Căldura latentă de fuziune, 10^6Jkg^{-1}	0,3	0,27	-	-

Proprietățile pulberii studiate(carbura de crom, Cr_3C_2-NiCr), care ia parte la simulare, sunt prezentate în tabelul (6.1). Se consideră că prezența carbonului, în faza metalică de Ni - Cr, nu influențează, în mod decisiv, proprietățile termice și fizice, astfel încât influența sa este neglijabilă.

Valorile calculate, pentru principalii parametri, care influențează procesul de depunere cu flacără de mare viteză: viteza cu relațiile(6.2),(6.3),(6.14); temperatura cu relațiile(6.1),(6.5), presiunea fluidului), în diferite puncte(punctele 1,2,3, fig. 6.4), se prezintă în tabelul 6.2.

Tabelul 6. 2. Parametrii fluidului în punctele critice

Parametrii fluidului	Punctul 1	Punctul 2	Punctul 3
Viteza, ms^{-1}	312	305	550
Temperatura, $^{\circ}\text{C}$	2 771	2 600	2 165
Presiunea, bar	3,37	2,50	1,0

Vitezele particulei v_f și temperaturile fluidului, în funcție de distanța de proiecție (punctele 1, 2, 3, fig 6.4), de timpul de împrăștiere și de diametrul particulei, se calculează cu relațiile (6.14 și 6.21), prin interpolare.

Rezultatele calculelor, pentru vitezele particulei și temperaturile fluidului, în funcție de distanța de proiecție, de timpul de împrăștiere și de diametrul particulei de pulbere metalo – ceramice (cermet) de carbura de crom $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, au fost validate și de rezultatele obținute experimental, în laboratoarele Departamentului de Inginerie Chimică și Metalurgică (Centrul de proiecție Termică CPT), al Universității din Barcelona.

Rezultatele de durată, sunt legate de aderarea straturilor depuse și depind de transferul de masă care poate avea loc în timpul pulverizării. Aderarea suferită este, în mod esențial, proporțională cu diferența de presiune existentă între camera de ardere și exterior. Această diferență de presiune, depinde de viteza particulei, de debit și de viteza fluidului.

În procesul de proiecție cu flacără de mare viteză, viteza particulelor din jetul de pulverizare v_f , prezintă un maxim, pentru o anumită valoare a distanței de pulverizare z și diametru al particulei d_p , după care scade cu z (fig. 6.6).

Experimental s-au ridicat curbe, ale vitezei fluidului, pentru diferite granulații (10 μm , 20 μm , 40 μm , 60 μm). Putem observa că atunci când diametrul particulei d_p crește, viteza maximă $v_{p,\text{max}}$, corespunzătoare diametrului prevăzut, va scădea și se va deplasa către substrat (fig. 6.7).

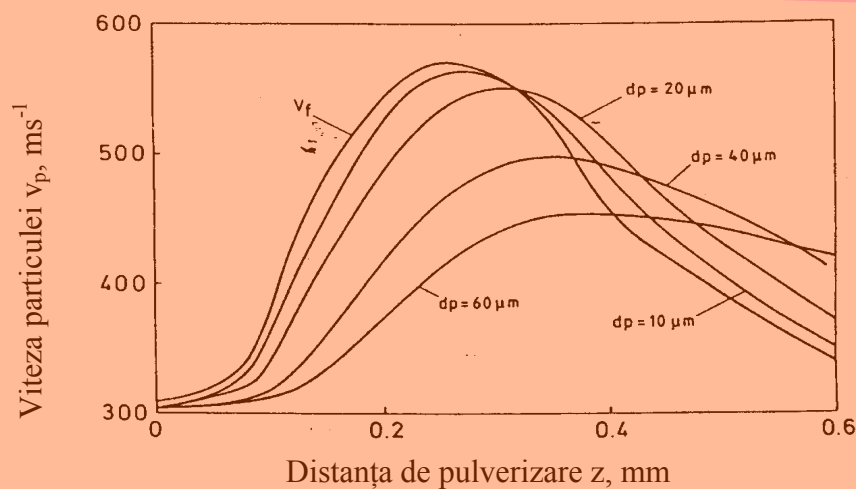


Figura 6.6. Variația vitezei de proiecție a particulelor pulverizate termic cu distanța de proiecție.

De aceea, pentru particula cu diametrul cel mai mare d_p , viteza variază cel mai uniform, de-a lungul distanței de proiecție z . Viteza particulelor, din jetul de pulverizare, scade odată cu creșterea diametrul acestora d_p .

Când crește viteza particulei $v_{p,\text{max}}$, crește atât fracția volumetrică de carbură de crom, implicit cea de oxid de crom (fig. 6.8), deoarece aceste faze au densități mai mici față de faza metalică NiCr.

Viteza maximă corespunzătoare unei anumite distanțe de pulverizare z_m , este cea de la ieșirea din pistolul de pulverizare (punctul 3, tabelul 6.2).

O dată importantă pentru sistemul de proiecție de mare viteză este viteza de proiecție v_p , la distanța de proiectare recomandată $L_s = z - L$. După cum putem observa în fig. 6.6, distanța $L_s = 0,3 \text{ m}$.

În figura 6.7 se poate observa cum maximul vitezei fluidului v_f (curbă obținută prin calcul), se întâlnește în intervalul de la 0,1m la 0,2 m, iar timpul de pulverizare t , crește cu diametrul particulei d_p .

Viteza particulei v_f , crește, cu creșterea fracției volumetrice finale de carbură de crom și implicit cu fracția volumetrică finală de oxid de crom. (fig.6.7).

Ambele tendințe au loc ca urmare a faptului că oxidul și carbura de crom au densitatea mai mare decât nichelul Ni și cromul Cr în fază metalică. Timpul de pulverizare termică al particulei scade cu creșterea fracției volumetrice de carbură de crom ε și fracția volumetrică inițială de carbură de crom ε_0 (fig.6.8).

Figura 6.9 arată că viteza v_p crește inițial ca urmare a accelerației fluidului, atingând valoarea maximă când diametrul particulei $d_p = 25\mu\text{m}$ și scade apoi ca urmare a creșterii dimensiunii particulei.

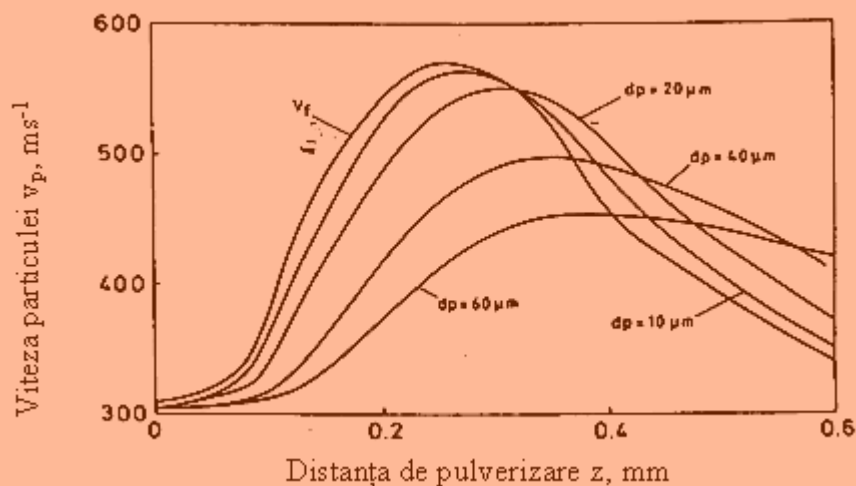


Figura 6. 7. Variația vitezei maxime a particulei pulverizate termic și a timpului de pulverizare, la distanța $z = 0,4\text{m}$, în funcție de diametrul particulei.

După se poate observa în figura 6.10, în timpul procesului de pulverizare cu flacără de mare viteză particulele de pulbere ating, inițial, temperatura de fuziune a fazei metalice de NiCr. În timpul fuziunii, temperatura particulei crește lent ca urmare a absorbției de căldură latentă de fuziune.

După această fuziune, temperatura particulei T_p crește rapid atingând valoarea sa maximă $T_{p,\text{max}}$ în $z = z_m$ și, apoi, scade. După ce se atinge temperatura lichidului, din faza metalică, începe solidificarea, iar temperatura particulei scade foarte lent, această scădere semnificativă a temperaturii fluidului, are loc ca urmare a pierderii de căldură latentă. Odată finalizată solidificarea, particula se răcește rapid. Încălzirea particulelor cu diametru mare este relativ mică. La creșterea diametrului particulei, temperatura maximă a particulelor $T_{p,\text{max}}$ se deplasează către suprafața substratului.

Dacă nu se ia în considerare procesul de descompunere al carburilor, difuzivitatea termică a particulelor este mai mare și, de aceea, particula atinge o temperatură mai mare. De asemenea, proporțiile de carburi și oxizi de crom, influențează timpul de pulverizare, așa cum se poate constata în figura 6.11. Creșterea conținutului inițial de carburi (ε_0 - fracția volumetrică inițială de carbură de crom), determină o creștere a difuzivității termice a particulei.

Pe de altă parte, scăderea fracției volumetrice de carbură de crom ε , presupune o creștere a descompunerii suferite de carburi și aceasta implică o scădere a difuzivității termice a particulelor și o creștere a temperaturii particulei.

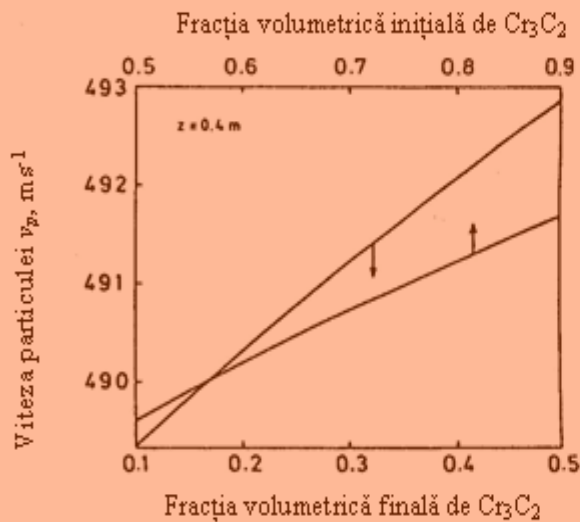


Figura 6.8. Variația vitezei particulei la $z = 0,4m$ în funcție de fracțiile volumetrice finală și inițială de carbură de crom Cr_3C_2 .

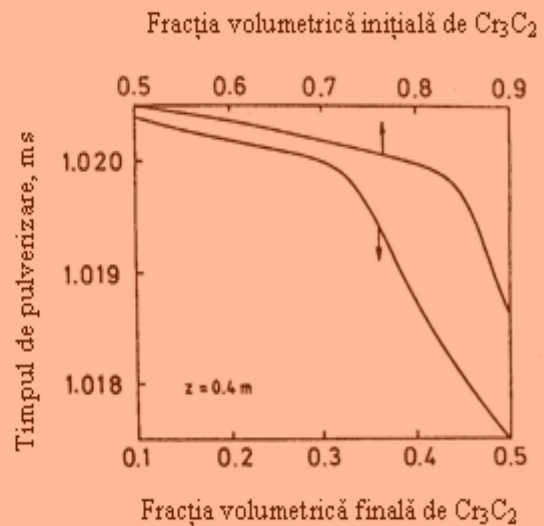


Figura 6.9. Variația timpului de pulverizare termică al particulei în funcție de fracțiile volumetrice inițială și finală de carbură de crom Cr_3C_2 .

De asemenea, se poate observa, o scădere a vitezei particulei ca urmare a creșterii densității, ceea ce conduce la mărirea timpului de staționare în zona în care temperatura fluidului este ridicată.

Pe de altă parte, scăderea vitezei particulei provoacă, la rândul ei, o scădere a coeficientului de transfer de căldură α , între suprafața particulei și fluid.

Coordonare acestor doi factori, va determina comportamentul temperaturii particulei când fracția volumetrică finală de carburi ϵ scade.

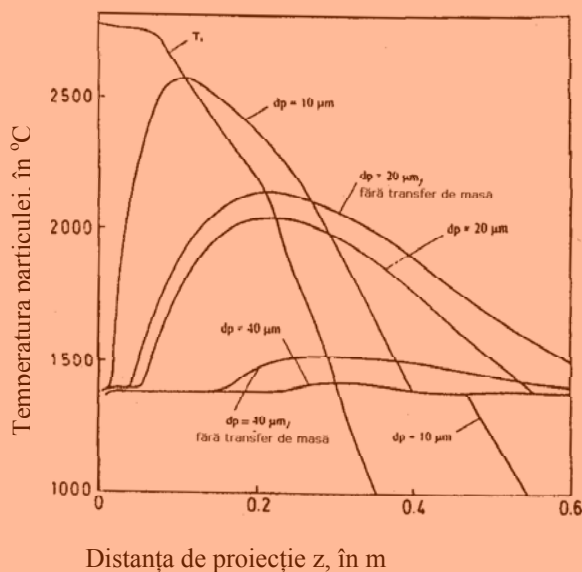


Figura 6.10. Variația temperaturii superficiale a particulei în funcție de distanța de proiectie.

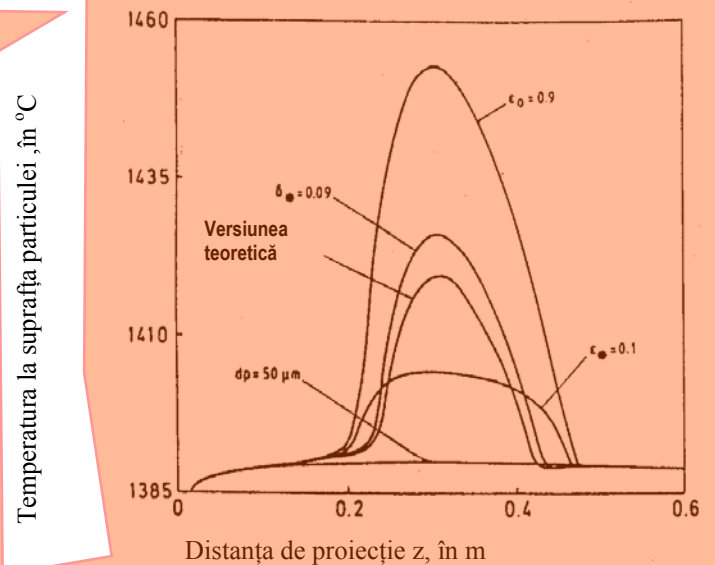


Figura 6.11. Influența procesului de transfer de masă asupra temperaturii superficiale a particulei în funcție de distanța de proiectie.

În primul moment, temperatura particulei este superioară aceleia căreia îi corespunde situația (teoretică) de referință, când $\epsilon = 0,3$. Apoi apare situația contrară celei inițiale, de răcire înainte de solidificare, în momentele finale.

În pulverizările termice realizate experimental la distanțele $z = 0,2m$, $z = 0,3m$ și $z = 0,4m$, nu s-au observat diferențe semnificative între procesele termice de descompunere. În figurile 6.9 și 6.10 este prezentat modul în care temperatura maximă $T_{p, max}$, pentru particulele cu diametrele cuprinse între $20\mu m$ și $40\mu m$, este dependentă de distanța de proiectie, care este aproximativ $0,2m$

până la 0,3m, de la ieșirea din pistolul de pulverizare. Supraîncălzirea particulelor mici, care justifică o creștere a porozității pentru distanțe de proiectie mai mici, fără a lua în considerare factorul principal al creșterii porozității, îl constituie scăderea vitezei particulelor, sau, mai bine spus, scăderea energiei cinetice a particulelor. Acest efect este în strânsă legătură cu creșterea distanței de pulverizare.

Creșterea fracției volumetrică finale de oxid de crom, δ , conduce la scăderea difuzivității termice a particulelor și a densității lor. Aceasta implică o creștere a vitezei particulelor și creșterea coeficientului de transfer de căldură, α . Când acest factor este dominant, temperatura particulei crește. Această situație se prezintă în figura 6.12.

Temperatura particulelor cu diametrul mare, $d_p = 350\mu\text{m}$, variază într-o formă foarte lentă. De o importanță egală cu cea a comportamentului mecanic, și pentru procesul de proiectie cu flacără de mare viteză este cunoașterea evoluțiilor valorilor maxime ale temperaturii $T_{p, \max}$ precum și coordonata longitudinală z_m la care ajunge particula, dar și temperatura pe care o are particula la această distanță de proiectie.

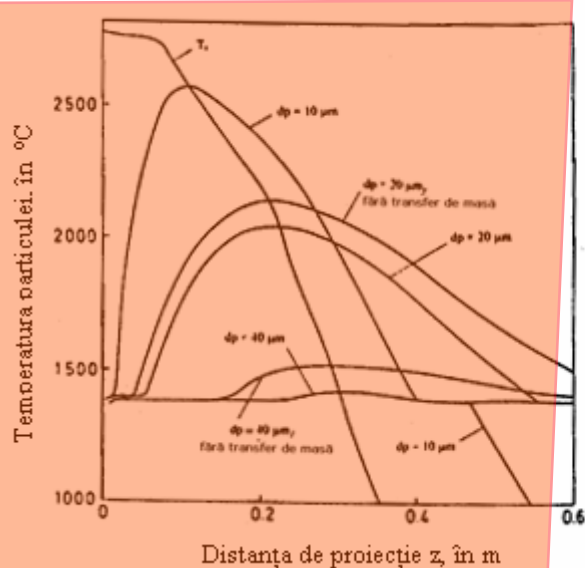


Figura 6.12. Variația temperaturii particulei la $z = 0,4 \text{ m}$ în funcție de fracția volumetrică finală de Cr_3C_2 .

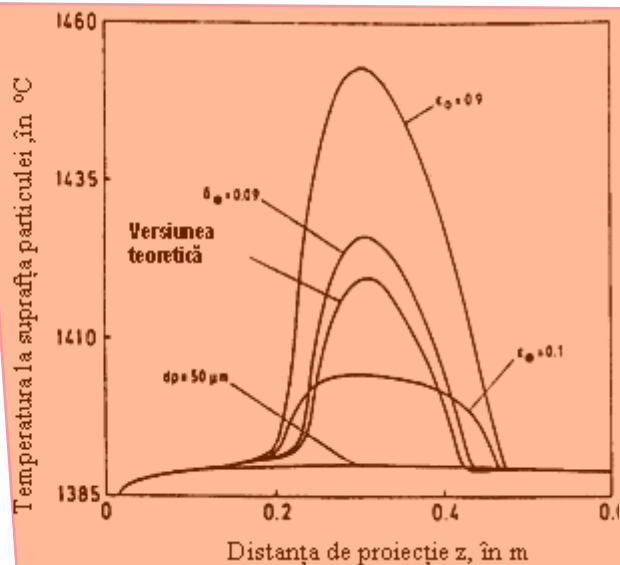


Figura 6.13. Variația temperaturii particulei la $z = 0,4 \text{ m}$ în funcție de fracțiile volumetrică inițială și finală de Cr_3C_2 .

Valoarea temperaturii $T_{p, \max}$ crește cu temperatura inițială a particulei T_{p0} , cu fracția volumetrică inițială de carbură de crom ϵ_0 și cu fracția volumetrică finală de oxid de crom δ . Temperatura maximă a particulei scade atunci când fracția volumetrică de carbură de crom crește. Parametrul z^* scade odată cu fracția volumetrică finală de oxid de crom δ , crește cu temperatura inițială a particulei T_{p0} , și ϵ^* se comportă neuniform cu fracția volumetrică de carbură de crom ϵ_0 , atingând valoarea sa maximă când $\epsilon_0 \sim 0,82$.

Figurile 6.12 și 6.13 arată cum temperatura T_{p^*} , la distanța de proiectie de 0,3m de la ieșirea din pistolul de pulverizare, crește cu parametrii T_{p0} , δ , ϵ_0 și scade cu ϵ^* .

Din punct de vedere experimental, variația T_{p^*} în funcție de diametrul particulelor d_p este mai importantă, și se poate observa cum temperatura T_{p^*} scade când are loc disoluția carburii de crom, precum și când distanța de proiectie (cea la care se localizează substratul) crește.

Pentru rezultatele experimentale descrise anterior, pare evident că, condițiile de proiectie sunt mai bune când distanța de pulverizare scade. Din punct de vedere termic, când diferența între temperaturile T_{p^*} , care corespund diferitelor diametre ale particulelor dintr-un interval de distribuție a dimensiunilor particulelor, nu este foarte accentuat, se obțin reacoperiri/straturi mai bune, apoi o mai bună supraîncălzire și o porozitate mai bună.

După cum se observă, în figurile 6.14 și 6.15, vom obține condiții mai bune de pulverizare, când distanța de la ieșirea din duza pistolului până la substrat, este mai mare. Nu trebuie uitat,

faptul că, mărimea distanțelor de proiecție, din punct de vedere mecanic, va scădea substanțial vitezele particulelor, provocând o creștere drastică a porozității, dacă factorul mecanic este predominant față de factorul termic, pentru cazul studiat.

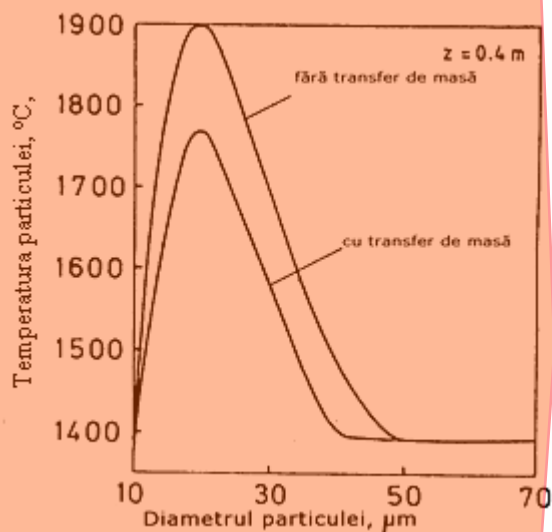


Figura 6.14. Variația temperaturii particulei în funcție de diametrul său pentru diferite poziții ale substratului, la $z = 0,4$, cu sau fără transfer de carburi.

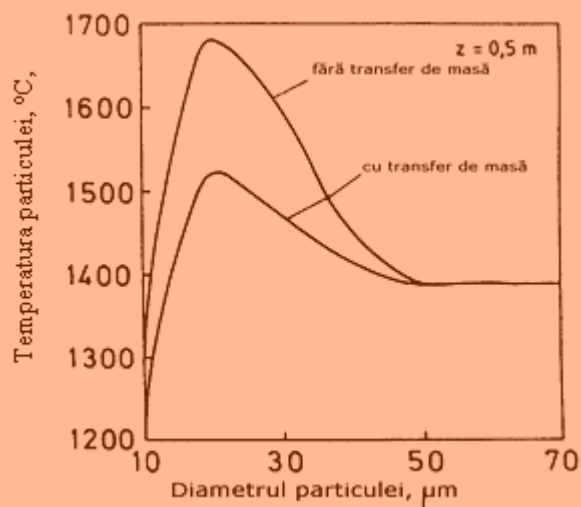


Figura 6.15. Variația temperaturii particulei în funcție de diametrul său pentru diferite poziții ale substratului, la $z = 0,5$, cu sau fără transfer de carburi.

Considerând aceleași figuri 6.14 și 6.15, se poate observa că, în cazul proceselor de transfer de masă dintre particulele de pulbere, rezultă o diferență de temperatură T_p^* mult mai bună, iar intervalul de diametre optime ale particulelor este foarte strâns/mic.

Rezultă că pentru oricare dintre distanțe se ține cont de condițiile termice optime și de distribuția dimensiunilor particulelor. De exemplu pentru $L_s = 0,3$ m, condițiile optime de pulverizare includ:

$$d_p = (11 \div 12 \mu m, 34 \div 44 \mu m); \quad \varepsilon_0 = 0,7 \div 0,9; \quad \varepsilon_* = 0,10 \div 0,45, \quad \delta_* = 0,02 \div 0,08$$

și

$$T_0 = 1320 \div 1360^\circ C.$$

CONCLUZII

1. Pe baza studiului rezultatelor teoretice și experimentale din literatura tehnică de specialitate, s-a realizat o modelare matematică a dinamicii procesului de depunere prin pulverizare termică cu flacără de mare viteză, prin sintetizarea modelelor deja existente, dar care tratau separat acest proces complex.

2. Procesele dinamice ale pulberilor de carbură de crom, Cr_3C_2 , studiate în această lucrare, au loc în timpul pulverizării termice cu flacără de mare viteză și sunt aplicate pentru cazul particulelor de pulbere compuse din matrice metalică și ale căror faze au un nivel ridicat de fuziune.

3. Modelul matematic propus în lucrarea de față ține cont de procesul de ardere, de dinamica particulelor, de dinamica fluidului în interiorul și la ieșirea din pistolul pentru pulverizare termică precum și de procesele de transfer de căldură.

4. S-a realizat o simulare matematică pentru a descrie procesele dinamice care au loc în timpul pulverizării termice a particulelor de pulbere, compuse din matrice metalice și din faze cu puncte ridicate la fuziune (în cazul studiat, carbură de crom). În modelul respectiv se ține seama de procesele de ardere, de dinamica particulelor și a fluidului (în interiorul și în afara jetului de pulverizare), precum și de procesele de transfer de căldură și de masă.

5. La creșterea fracției volumetrică de carbură de crom și de oxid de crom, vitezele maxime pe care le ating particulele cresc, iar poziția în care aceste viteze sunt obținute se deplasează către ieșirea din pistolul de pulverizare termică (punctul 3, figura 1).

6. Viteza particulelor la distanța de proiecție recomandată ($L_s = 0,3m$), variază neliniar, în funcție de mărimea și de diametrul particulelor de pulbere. În primul moment, creșterea până la atingerea valorii sale maxime, v_{max} , pentru $d_p \geq 25\mu m$ și, apoi, viteza scade. De asemenea, această viteză crește când scade fracția volumetrică finală de carbură de crom și crește fracția volumetrică finală de oxid de crom. Timpul de pulverizare al particulelor crește cu diametrul și scade cu creșterea fracției volumetrică inițiale și finale de carbură de crom.

7. Temperatura particulei crește, atingând valoarea sa maximă și scade cu mărimea distanței de pulverizare/proiecție. În timpul fuziunii și solidificării fazei metalice, temperatura variază într-o formă lentă ca urmare a absorbției și, respectiv, desorbției de căldură latentă. Disoluția/descompunerea carburilor cauzează scăderea temperaturii particulei.

8. Temperatura particulei crește cu fracția volumetrică inițială de carbură de crom și cu fracția volumetrică finală de oxid de crom. Scăderea fracției volumetrică finale de carbură de crom conduce la scăderea temperaturii particulei în zona fuziunii totale, în timp ce în zonele anterioare și posterioare temperatura particulei crește.

9. Temperatura maximă a particulei crește cu temperatura inițială a particulei, cu fracția volumetrică inițială de carbură de crom și cu fracția volumetrică finală de oxid de crom. Această temperatură maximă scade când crește fracția volumetrică finală de carbură de crom. Poziția maximă volumetrică finală de carbură de crom crește cu temperatura inițială a particulei și cu fracția volumetrică finală a oxidului de crom.

10. Temperatura particulei la distanța la care se află substratul ($L_s = 0,3m$) crește cu temperatura inițială a particulei, cu fracția volumetrică inițială de carbură de crom și cu fracția volumetrică finală de oxid de crom, și scade cu fracția volumetrică finală de carbură de crom. Dacă se modifică distanța de pulverizare termică de la $L_s = 0,3m$ la $L_s = 0,4m$, temperatura particulei scade.

11. Procesul de transfer de căldură dintre particulele de pulbere permite creșterea intervalului diametrelor pentru particule. Această situație este posibilă numai când distanța de pulverizare se schimbă de la $z = 0,4m$ la $z = 0,5m$. Astfel, când $z = 0,4m$, intervalul preferat de diametre este de la $d_p = (11 \div 12)\mu m$ la $d_p = (34 \div 44)\mu m$, în timp ce pentru $z = 0,5m$ intervalul preferat de diametre este de la $d_p = (14 \div 19)\mu m$ la $d_p = (26 \div 46)\mu m$.