



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT – INGINERIE MECANICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

*CERCETĂRI PRIVIND PRELUCRAREA CU JET DE APĂ A
UNOR MATERIALE METALICE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA
PETROLIERĂ ȘI PETROCHIMICĂ*

*RESEARCHERS ON WATERJET MANUFACTURING OF THE
METALLIC MATERIALS USED IN PETROLEUM AND
PETROCHEMICAL INDUSTRY*

Autor: Ing. Iulian PĂTÎRNAC

Conducător științific: Prof.Univ.Habil. Dr. Ing. Răzvan George RÎPEANU

Nr. Decizie 459 din 15.06.2020

Comisia de doctorat:

Președinte	Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Florinel DINU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Răzvan George RÎPEANU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof. Univ. DHC. Dr. Ing. Anton HADĂR	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent oficial	Prof. Univ. Dr. Ing. Alexandru Valentin RĂDULESCU	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent oficial	Prof. Univ. Dr. Ing. Alexandru PUPĂZESCU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

Mulțumiri pentru sprijin

Mulțumesc conducătorului științific, domnul Prof. univ. habil. dr. ing. Răzvan George RÎPEANU, pentru profesionalismul cu care m-a coordonat pe parcursul elaborării tezei, precum și pentru sprijinul, motivarea și încrederea acordată.

Mulțumesc domnului Rector, Prof. univ. habil. dr. ing. Florinel DINU, pentru că a acceptat să fie președintele comisiei de doctorat.

Mulțumesc domnului Prof. univ. DHC dr. ing. Anton HADĂR, pentru onoarea de a mă asista în calitate de membru al comisiei de doctorat, precum și pentru timpul acordat analizării tezei.

Mulțumesc domnului Prof. univ. dr. ing. Alexandru Valentin RĂDULESCU, pentru timpul acordat analizării tezei și pentru că a acceptat să facă parte din comisia de doctorat.

Mulțumesc domnului Prof. univ. dr. ing. Alexandru PUPĂZESCU, pentru sfaturile acordate pe parcursul perioadei de elaborare a tezei de doctorat și pentru timpul dedicat analizării acestei lucrări.

Mulțumesc directorului de departament prof. dr. ing. Ion NAE pentru sprijinul acordat la utilizarea echipamentelor din cadrul departamentului (o serie de echipamente pe care s-au efectuat determinările experimentale au fost achiziționate prin programul POSCCE-A2-O2.2.1-2009-4 860/2010 „Centru regional de determinare a performanțelor și de monitorizare a stării tehnice a materialului tubular utilizat în industria petrolieră”).

Mulțumesc comisiei de îndrumare: Șef lucrări dr. ing. Alin DINIȚĂ (decan al facultății Inginerie Mecanică și Electrică), Prof. dr. ing. Alexandru PUPĂZESCU, Prof. dr. ing. Ion NAE, pentru sfaturile competente acordate pe perioada elaborării tezei.

Membrilor departamentului Inginerie Mecanică, în special șef lucrări univ. dr. ing. Eugen LAUDACESCU, Șef lucrări univ. dr. ing. Ibrahim Naim RAMADAN, Conf. dr. ing. Adrian NEACȘA, pentru sprijinul acordat la efectuarea determinărilor experimentale.

Mulțumesc familiei pentru înțelegerea primită pe perioada elaborării tezei.

Ploiești, 2020

Iulian Pătîrnac

CUPRINS

	Pag. teză	Pag. rezu-mat
SIMBOLURI ȘI NOTAȚII	4	4
LISTĂ FIGURI	8	8
LISTĂ TABELE	12	12
ABSTRACT	14	
INTRODUCERE	17	14
1. STUDIU BIBLIOGRAFIC ASUPRA UZURII PRIN EROZIUNE A MATERIALELOR	24	18
1.1. Aspecte ale prelucrării cu jet de apă a materialelor metalice	24	18
1.1.1 Istoricul prelucrării cu jet de apă	24	
1.1.2 Procedee de prelucrare cu jet de apă	24	
1.1.3 Principiul prelucrării cu jet abraziv de apă (AWJ)	26	
1.2. Parametri ce influențează prelucrarea cu jet de apă	28	20
1.2.1 Parametrii procesului tehnologic	28	
1.2.2 Parametrii procesului de eroziune	29	
1.3. Eroziunea materialelor metalice	33	
1.3.1 Uzura prin eroziune a materialelor ductile	33	
1.3.2 Uzura prin eroziune a materialelor fragile	34	
1.3.3 Procesul de formare a tăieturii prin mecanismul de prelucrare cu jet de apă	36	
1.4. Modele matematice pentru evaluarea eroziunii materialelor metalice	37	22
1.4.1 Modele analitice	38	
1.4.2 Modele semiempirice	40	
1.4.3 Modele empirice	42	
1.5. Determinarea eroziunii materialelor metalice în timpul procesului de prelucrare cu jet abraziv de apă prin analiză CFD	44	23
1.5.1 Modelarea curgerii prin tubul de amestec al instalației de prelucrare AWJ	44	
1.5.2 Metoda SPH (smooth particle hydrodynamics)	46	
1.5.3 Metoda ALE (Arbitrary Lagrange-Euler)	47	
1.6. Aspecte cu privire la geometria suprafețelor generate prin procedeul AWJ	48	24
1.6.1 Fenomenul de deviere al jetului de apă	48	
1.6.2 Noțiuni despre teoria jetului de apă liber	49	
1.7. Concluzii	50	25
2. INSTALAȚIA ȘI MATERIALELE UTILIZATE ÎN CADRUL ANALIZEI PRELUCRĂRII AWJ	53	26
2.1. Instalația de prelucrare cu jet de apă	53	26
2.2. Componentele active ale mașinii de debitat cu jet de apă	54	27
2.3. Calculul debitului de apă generat de instalația WJ	56	28
2.4. Stabilirea parametrilor hidraulici ai mișcării staționare a curgerii prin duza de apă	58	28
2.5. Stabilirea parametrilor hidraulici prin tubul de abraziv	60	29
2.6. Analiza materialului abraziv	62	30
2.6.1 Compoziția chimică a nisipului abraziv	62	
2.6.2 Granulometria nisipului abraziv	64	
2.6.3 Stabilirea factorului de formă al particulelor de nisip	68	
2.6.4 Stabilirea debitului de abraziv	71	
2.7. Concluzii	73	32
3. STUDIU TEORETIC ASUPRA FENOMENULUI PRELUCRĂRII AWJ	75	34

3.1. Analiza curgerii apei prin orificiul de rubin al duzei de înaltă presiune	75	34
3.1.1 Studiul curgerii apei prin orificiul duzei de rubin folosind metoda analitică	75	
3.1.2 Studiul curgerii apei prin orificiul duzei de rubin folosind metoda CFD	80	
3.2. Analiza 2D a curgerii prin capul de tăiere al mașinii AWJ	85	36
3.2.1 Cazul I. Intrarea blocată prin tubul de abraziv	88	
3.2.2 Cazul II. Intrarea liberă prin tubul de abraziv	90	
3.3. Analiza teoretică a eroziunii elementelor active din componența mașinii de prelucrat cu jet de apă tip YCWJ-380-1520	92	39
3.3.1 Modelarea fluidului abraziv prin elementele active ale mașinii AWJ	92	
3.3.2 Analiza ER produsă de particulele cu diametrul de 0,19mm	97	
3.3.3 Analiza ER produsă de particulele cu diametrul de 0,285mm	99	
3.3.4 Analiza ER produsă de particulele cu diametrul de 0,38mm	100	
3.3.5 Concluzii cu privire la fenomenul de eroziune produs asupra elementelor active ale mașinii AWJ analizată	102	
3.4. Analiza CFD a jetului de apă liber	106	40
3.4.1 Modelarea jetului de apă în zona dintre duză și piesă	106	
3.4.2 Rezultate teoretice obținute prin simularea CFD în zona dintre duză și piesă	108	
3.5. Concluzii	114	42
4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA PRELUCRĂRII PRIN AWJ A MATERIALULUI P275NL2	117	43
4.1. Proiectarea încercărilor experimentale de prelucrare AWJ	117	43
4.1.1 Stabilirea geometriei piesei prelucrate și a parametrilor de lucru	117	
4.1.2 Evaluarea caracteristicilor materialului supus analizei	118	
4.2. Cercetări experimentale privind evaluarea caracteristicilor microgeometrice ale suprafețelor prelucrate	119	43
4.2.1 Parametrii microgeometrici ai suprafețelor prelucrate	119	
4.2.2 Determinarea parametrilor microgeometrici ai suprafețelor materialului prelucrat	121	
4.2.3 Analiza grafică a microgeometriei suprafețelor materialului prelucrat	123	
4.3. Evaluarea analitică a parametrilor de profil pentru materialul analizat	126	44
4.3.1 Evaluarea parametrilor Ra și Wa în cazul prelucrării treptei de grosime de 10mm	126	
4.3.2 Evaluarea parametrilor Ra și Wa în cazul prelucrării treptei de grosime de 20mm	128	
4.3.3 Evaluarea parametrilor Ra și Wa în cazul prelucrării treptei de grosime de 30mm	129	
4.3.4 Evaluarea parametrilor Ra și Wa în cazul prelucrării treptei de grosime de 40mm	131	
4.4. Cercetări experimentale privind devierea jetului de apă	135	45
4.4.1 Prezentarea metodei experimentale de evaluare a devierii jetului de apă	135	
4.4.2 Analiza rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor experimentale ale devierii jetului de apă	136	
4.5. Cercetări experimentale ale lățimii și conicității tăieturilor pentru materialul prelucrat prin procedeul AWJ	142	47
4.5.1 Analiza lățimii tăieturilor	143	
4.5.2 Analiza conicității tăieturilor	147	
4.6. Cercetări experimentale privind modificarea durității materialului în zona adiacentă a tăieturilor	150	48
4.6.1 Efectuarea încercărilor experimentale de determinare a durității	150	
4.6.2 Evaluarea rezultatelor obținute în cadrul analizei microdurității Vickers	152	
4.7. Concluzii	155	50
5. COMPARAREA REZULTATELOR TEORETICE CU CELE OBȚINUTE PRIN ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE	158	51

5.1. Compararea rezultatelor CFD cu rezultatele experimentale în cazul uzurii tubului de amestec	158	51
5.2. Influența jetului de apă asupra materialului prelucrat P275NL2	163	52
5.3. Analiza microstructurii materialului	166	54
5.4. Concluzii	168	55
6. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	170	56
6.1. Concluzii generale	170	
6.2. Contribuții personale	177	56
6.3. Direcții viitoare de cercetare	179	57
BIBLIOGRAFIE	180	58
ANEXE		
<i>Anexa A1</i> Rezultatele analizei SEM pentru determinarea compoziției chimice a elementelor active ale instalației de prelucrare AWJ tip WUXI YCWJ-380-1520	186	
<i>Anexa A2</i> Codul sursă din Ansys ADPL – Flotran CFD în cazul analizei tubului de abraziv	187	
<i>Anexa A3</i> Codul sursă din Ansys ADPL – Flotran CFD în cazul analizei duzei de rubin cu diametrul de 0,25mm	195	
<i>Anexa A4</i> Codul sursă în cazul simulării Flotran-CFD a curgerii prin elementele active ale mașinii AWJ tip WUXI YCWJ-380-1520	202	
<i>Anexa A5</i> Imagini Print Screen ale modelului CFD din Ansys Workbench pentru simularea eroziunii elementelor CH cu cele trei dimensiuni de particule	239	
<i>Anexa A6</i> Imagini Print Screen ale modelului CFD din Ansys Workbench pentru simularea eroziunii elementelor CH utilizând Transient Time	240	
<i>Anexa A7</i> Imagini Print Screen ale modelului CFD din Ansys Workbench în cazul simulării jetului de apă liber	241	
<i>Anexa A8</i> Reprezentarea parametrilor de profil generați de programul <i>TalyProfile Lite2.1</i>	242	
<i>Anexa A9</i> Valorile parametrilor de profil în cazul treptelor de grosime analizate	407	
<i>Anexa A10</i> Reprezentarea grafică a parametrilor de profil în cazul rugozității (Ra , Rt , Rz) și ai ondulației (Wa , Wt , Wz) obținuți în cadrul analizei microgeometriei suprafețelor prelucrate	411	
<i>Anexa A11</i> Codul sursă al aplicației realizate în Visual Studio 2019 cu programul C#	418	
<i>Anexa A12</i> Imagini din cadrul analizei devierii jetului de apă	421	
<i>Anexa A13</i> Valorile devierii jetului de apă în cazul grosimilor de material analizate	425	
<i>Anexa A14</i> Imagini Print Screen ale modelului CFD din Ansys Workbench în cazul simulării eroziunii produse asupra tubului de amestec	426	
<i>Anexa A15</i> Perioadele de funcționare înregistrate pentru analiza uzurii tubului de amestec	427	
<i>Anexa A16</i> Microstructura materialului P275NL2 în vecinătatea tăieturilor	428	

SIMBOLURI ȘI NOTĂȚII

ACRONIME

AWJ	Jet de apă abraziv (Abrasive Water Jet)
CFD	Calcul de dinamica fluidelor (Computing Fluid Dynamic)
CH	Cap de tăiere (Cutting Head)
DDP	Distanță duză-piesă
HPN	Duză de înaltă presiune
MC	Cameră de amestec
MT	Tub de amestec/concentrare (Mixing/Focusing Tube)
SEM	Microscopie electronică (Scanning Electron Microscop)
TA	Tub de abraziv
WC	Carbură de wolfram

SIMBOLURI LATINE

a_g	Suprafața medie a unui grăunte cristalin [mm^2]
a_m	Dimensiunea medie a unei unități din structura material analizată [m]
A_B	Reprezintă aria totală a bazinului (cuvei) mașinii [m^2]
A_c	Aria secțiunii de curgere a unei conducte [m^2]
A_{cv}	Reprezintă aria suprafeței libere a cuvei mașinii AWJ [m^2]
$A_{L,abr}$	Aria laterală de curgere a abrazivului prin peretele MC [mm^2]
A_{pi}	Aria unei particule abrazive măsurată în plan [μm^2]
A_{Si}	Aria cercului care înscrie particula abrazivă [μm^2]
A_{rf}	Aria unui element singur element de rigidizare a cuvei mașinii AWJ [m^2];
A_s	Aria de impact de pe suprafața tubului [m^2]
C	Conicitatea tăieturii [mm/mm]
C_A	Coeficient ce ține seama de modificările performanțelor jetului de apă [-]
C_{lev}	Componentă levigabilă [%]
C_μ	Constantă ce ține de turbulența fluidului [-]
d	Diametrul amprentei în metoda Brinell/ Media aritmetică a celor două diagonale d_1 și d_2 ale amprentei în metoda Vickers [mm]
d_a	Diametrul duzei de apă [mm]
d_p	Diametrul particulei abrazive [μm]
d'_p	Diametrul de referință a particulei abrazive [μm]
d_t	Diametrul tubului de amestec [mm]
D	Diametrul de conductă / Diametrul penetratorului în metoda Brinell [mm]
D_{MC}	Diametrul camerei de amestec [mm]
E_{ex}	Extindere exterioară a jetului de apă [mm]
E_{mz}	Extindere centrală a jetului de apă [mm]
E^K	Energia cinetică turbulentă pentru elementul CFD analizat [Nm]
Er_a	Eroziunea materialului obținută în urma simulării CFD [kg/m^2]
Er_{exp}	Eroziunea MT obținută pe cale experimentală [kg/m^2]
ER	Rată de eroziune [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
ER_{19}	Rata de eroziune produsă de particulele cu diametrul mediu de 0,19mm [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
ER_{38}	Rata de eroziune produsă de particulele cu diametrul mediu de 0,38mm [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
ER_{90}	Rata de eroziune la un impact normal al particulei [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
ER_{285}	Rata de eroziune produsă de particulele cu diametrul mediu de 0,285mm [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
ER_a	Rata de eroziune obținută prin simulare CFD [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
ER_{exp}	Rata de eroziune obținută pe cale experimentală [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

ER_{th}	Rata de eroziune teoretică exprimată prin curba de tendință, pentru care valorile obținute prin simulare CFD corespund cu situația reală [kg/m ² s]
ER_{VP}	Uzura prin deformare în modelul Bitter [m ³]
ER_{VC}	Uzura prin tăiere în modelul Bitter [m ³]
f	Avans de lucru (viteza de avans) [mm/min]
f_f	Coeficient de frecare în mișcarea turbulentă [-]
f_{min}	Viteza de avans minimă [m·s ⁻¹]
F	Forța de apăsare în metoda Brinell/Vickers [N]
g	Accelerația gravitațională (g=9,81 m/s ²)
$g_{mat/m}$	Grosimea treptei materialului prelucrat [mm]
g_n	Mărirea imaginii microstructurii [-]
G	Indicele convențional al măririi grăuntelui [-]
G_g	Factorul de comparare al imaginii structurii cu mărirea de 100 [-]
h	Diferența de nivel/Grosimea materialului analizat [m]
h_{lim}	Adâncimea de tăiere limită la un avans de lucru considerat [m]
h_{L15}	Înălțimea generatoarei L15 din fig.3.13 [mm]
H_t	Duritatea materialului bombardat [Psi]
HB	Duritate Brinell
HV	Duritate Vickers
l_a	Lungimea orificiului de rubin [m]
l_b	Lungimea de probă [mm]
l_c	Lungimea liniei de referință utilizată pentru identificarea neregularităților ce caracterizează o suprafață [mm]
l_n	Lungimea de evaluare a microgeometriei suprafeței [mm]
l_t	Lungimea tubului de amestec [mm]
I_p	Momentul de inerție masic al unei particule [kg·m ²]
k	Energia cinetică a turbulențelor [Nm]
k_α	Coeficient ce ține cont de unghiul de atac [-]
k_e	Coeficient de eroziune caracteristic abrazivului [-]
k_s	Rugozitate echivalentă [μm]
m	numărul de elemente din cadrul lungimii considerate ale microasperităților [-]
m_1	Masa probei de nisip după separarea componentei levigabile [g]
m_{1i}	Masa probei inițiale de nisip [g]
m_g	Numărul de grăunți cristalini pe mm ² [-]
m_p	Masa unei particule [kg]
M	Masa totală a particulelor abrazive care lovesc materialul [kg]
n_{rf}	Numarul de elemente de rigidizare ale cuvei ale cuvei mașinii AWJ ($n_{rf}=10$)
n_z	Numărul de zone măsurate de pe suprafața tăieturii [-]
p_a	Presiunea apei [MPa]
P	Presiunea dezvoltată de instalația AWJ [MPa]
Q_a	Debitul de apă [m ³ /s]
Q_{abr}	Debitul masic de abraziv [g/s]
Q_g	Debitul de aer [m ³ /s]
r	Raza curentă [m]
r_a	Raza interioară a duzei de apă [m]
r_c	Raza de curbură [mm]
r_p	Raza particulei abrazive [m]
R_a	Rugozitatea medie a microasperităților [μm]
R_q	Abaterea medie pătratică a profilului asperităților [μm]
s	Direcția de deplasare a jetului [grd]

S_{con}	Aria laterală a suprafeței conice a MT [mm ²]
S_{cil}	Aria laterală a suprafeței cilindrice a MT [mm ²]
S_L	Aria suprafeței active a MT [mm ²]
S_p	Factor ce ține seama de raportul dintre cantitatea de grăunți neafecțați și cantitatea totală a acestora [-]
t_i	Timp de interacțiune [s]
t_m	Timp de mașină (lucru) [s]
t_s	Perioada de simulare CFD [s]
t_u	Timp de umplere [s]
T	Reprezintă temperatura în regim static [°C]
v	Viteză medie locală în mișcarea turbulentă [m/s]
v_{ax}	Viteza în axa de simetrie [m/s]
v_{CFD}	Viteza obținută prin simulare CFD [m/s]
v_e	Viteza de eroziune [mm/s]
$v_{e,a}$	Viteza de eroziune obținută pe cale analitică [mm/s]
$v_{e,exp}$	Viteza de eroziune obținută experimental [mm/s]
$v_{e,th}$	Viteza de eroziune teoretică exprimată prin curba de tendință, pentru care valorile obținute prin simulare CFD corespund cu situația reală [mm/s]
v_f	Viteza de frecare [m/s]
v_{fa}	Viteza de curgere a fluidului abraziv [m/s]
v_g	Viteza medie a aerului [m/s]
v_m	Viteza medie a apei [m/s]
v_{max}	Viteză maximă [m/s]
V_{ms}	Valoarea măsurată din imaginea foto a devierii jetului [mm]
v_p	Viteza de impact a particulei abrazive [m/s]
v'_p	Viteza de referință a particulei abrazive [m/s]
v_{pk}	Viteza de vârf [m/s]
v_{SG}	Viteza superficială a părții gazoase [m/s]
v_{SL}	Viteza superficială a părții lichide [m/s]
v_{th}	Viteza obținută pe cale teoretică [m/s]
V_a	Volumul de apă [m ³]
V_{indpt}	Volum de material îndepărtat [m ³]
V_{SC}	Valoarea scării prezentată în imaginea foto pentru devierea jetului [mm]
w_i	Lățimea tăieturii în zona inferioară [mm]
w_{ecr}	Lățimea stratului influențat de jetul de particule [mm]
w_s	Lățimea tăieturii în zona superioară [mm]
x	Distanța măsurată în aval de-a lungul jetului față de o sursă virtuală [m]
x_a	Gradația dozatorului debitului de abraziv al mașinii AWJ
X_a	Deviația medie aritmetică a profilului impus [μm]
X_a^*	Valoarea medie a R_a sau W_a de pe suprafața tăieturii [μm]
X_p	Înălțimea maximă a vârfului profilului pe lungimea de probă [μm]
X_q	Deviația rădăcină medie pătratică a profilului impus [μm]
X_t	Înălțimea totală a profilului pe lungimea de evaluare [μm]
X_v	Adâncimea maximă a bazei profilului pe lungimea de probă [μm]
X_z	Înălțimea maximă a profilului pe lungimea de probă ($X_z = X_p + X_v$) [μm]
y_f	Lungime de referință [mm]
Z	Înălțimea asperităților măsurată pe axa verticală [μm]

SIMBOLURI GRECEȘTI

α	Unghiul de impact al particulei [grd]/ Valoarea unghiului între două fețe opuse la vârful piramidei în metoda Vickers (în mod normal, $\alpha=135^\circ$), [grd];
α_{abr}	Direcția de alimentare cu abraziv [grd]
α_e	Factor dat de relația (1.42)
α_k	Valoarea unghiului de înclinare al fețelor laterale ale tăieturilor [grd]
α_m	Unghiul de impact minim la care se produce eroziunea [grd]
α_{po}	Unghiul de impact la care componenta orizontală devine zero, caz când particula părăsește suprafața materialului prelucrat [grd]
δ	Distanța duză-piesă [mm]
ε	Rata de disipare a energie cinetice turbulente
ε_m	Vâscozitatea aparentă sau turbulentă [Pa·s]
ε_r	Eroarea valorilor obținute [-]
ε_V	Eroziunea volumică în modelul lui Finnie [m ³]
Φ	Disipare vâscoasă
Φ_g	Fracția volumică a gazului [%]
Φ_p	Fracția de volum a particulelor în fluid [%]
γ_a	Greutatea specifică a apei [N/m ³]
γ_g	Greutatea specifică a părții gazoase [N/m ³]
Γ	Valoarea reală a devierii jetului de apă [mm]
χ	Factor de corecție al uzurii prin tăiere [-]
λ	Coeficient de rezistență hidraulică [-]
θ	Valoarea unghiului de deviere a jetului de apă, [grd]
θ_{lim}	Valoarea absolută a unghiului de deviere la adâncimea h_{lim} [grd]
ω	Rata specifică de disipație
μ_a	Vâscozitatea dinamică a apei la 20°C [Pa·s]
μ_g	Vâscozitatea dinamică a aerului [Pa·s]
μ_t	Vâscozitate turbulentă [Pa·s]
ν_a	Vâscozitatea cinematică a apei la 20°C [m ² /s]
ν_g	Vâscozitatea cinematică a aerului [m ² /s]
Ψ	Factor al raportului dintre lungimea de contact pe adâncimea de tăiere [-]
Ψ_i	Factor de formă al particulei abrazive [-]
ρ_a	Densitatea apei la 20°C [kg/m ³]
ρ_g	Densitatea părții gazoase [kg/m ³]
ρ_m	Densitatea amestecului abraziv/de fluide [kg/m ³]
ρ_p	Densitatea particulei abrazive [kg/m ³]
ρ_t	Densitatea materialului bombardat [kg/m ³]
σ_m	Tensiunea de rupere a materialului prelucrat [MPa]
τ_p	Efortul unitar tangențial la perete [MPa]
ξ_j	Factor de atenuare a jetului abraziv în mediul dintre duză și piesă [m ⁻¹]

LISTĂ DE FIGURI

Introducere

- Fig.I.1 Utilizarea procedurii AWJ
Fig.I.2 Precizia obținută prin diferite procedee de debitare [4]
Fig.I.3 Rugozitățile suprafețelor pentru diferite metode de prelucrare prin aşchiere [7]

Capitolul 1

- Fig.1.1 Prelucrarea cu jet de apă pură [15]
Fig.1.2 Prelucrarea cu jet de apă abraziv [15]
Fig.1.3 Prelucrare AWJ pe mașini multi-axe [13]
Fig.1.4 Braț robotic folosit la prelucrarea cu jet de apă [17]
Fig.1.5 Schema de principiu a prelucrării AWJ [6]
Fig.1.6 Schema de principiu a instalației de prelucrare cu jet de apă [19]
Fig.1.7 Tipuri de duze de apă [17]
Fig.1.8 Rata de eroziune pentru un oțel cu 11%Cr, [22, 24]
Fig.1.9 Efectele dimensiunii particulelor de nisip asupra ratei de eroziune (Gandhi și Borse) [24]
Fig.1.10 Rata de eroziune a oțelului AISI1020 pentru cinci elemente erodente [22, 24]
Fig.1.11 Efectul durității abrazivului asupra eroziunii pentru materialul WC-12Co [24]
Fig.1.12 Volumul de material îndepărtat în funcție de duritatea Vickers [22]
Fig.1.13 Variația eroziunii în funcție de unghiul de impact pentru materiale ductile și fragile [22, 23, 25, 26, 27]
Fig.1.14 Efectul distanței dintre duză și piesă [29]
Fig.1.15 Principiul mecanismului de eroziune prin deformare și tăiere [19]
Fig.1.16 Principiul eroziunii prin modelul propus de Finnie [24, 31]
Fig.1.17 Schema de eroziune a materialelor fragile [22]
Fig.1.18 Moduri de degradare în materiale fragile [25]
Fig.1.19 Schema de principiu în procesul de formare a tăieturii [17, 25]
Fig.1.20 Geometria tăieturii prin procedeul de tăiere cu jet de apă [25]
Fig.1.21 Liniile de curent ale fluidului în camera de amestec [33]
Fig.1.22 Concentrarea eroziunii în lungul tubului de curent [33]
Fig.1.23 Uzura CFD a CH al mașinii de prelucrare cu jet de apă [34]
Fig.1.24 Uzura interioară a tubului de amestec [35]
Fig.1.25 Curba de atenuare a vitezei jetului [36]
Fig.1.26 Domeniul suport al particulei i în SPH [37]
Fig.1.27 Utilizarea metodei SPH pentru un oțel aliat [38]
Fig.1.28 Reprezentare unidimensională a meshing-ului prin cei trei algoritmi [41]
Fig.1.29 Secțiunea transversală a piesei la diferite intervale de timp prin metoda ALE [38]
Fig.1.30 Schema de principiu a evaluării devierii jetului de apă [42]
Fig.1.31 Schema extinderii unui jet de fluid [44]

Capitolul 2

- Fig.2.1 Instalația de prelucrare AWJ
Fig.2.2 Ansamblul elementelor active ale mașinii de prelucrat cu jet de apă
Fig.2.3 Măsurarea conului tubului de amestec
Fig.2.4 Analiza probei metalografice a MT
Fig.2.5 Elementele geometrice ale cuvei mașinii AWJ
Fig.2.6 Schița duzei de apă
Fig.2.7 Măsurarea presiunii vacumetrice
Fig.2.8 Modelul geometric al tubului de abraziv

- Fig.2.9 Conturul de viteze prin TA
- Fig.2.10 Distribuția de viteze prin TA
- Fig.2.11 Microscopul SEM
- Fig.2.12 Schema de principiu a SEM [64]
- Fig.2.13 Analiza spectrală SEM asupra nisipului abraziv
- Fig.2.14 Aparatură granulometrică
- Fig.2.15 Histograma granulației nisipului abraziv
- Fig.2.16 Curba cumulativă a granulației nisipului abraziv
- Fig.2.17 Particule de nisip analizate pentru stabilirea factorului de formă [72]
- Fig.2.18 Imagine SEM a particulelor de nisip analizate
- Fig.2.19 Sistemul de dozare al materialului abraziv
- Fig.2.20 Sistemul de control al abrazivului
- Fig.2.21 Reprezentarea grafică a debitului de abraziv

Capitolul 3

- Fig.3.1 Mișcarea turbulentă pe lângă un perete plan [58]
- Fig.3.2 Legea de putere a profilelor de viteză [81]
- Fig.3.3 Legea de variație a vitezei apei prin duza de rubin obținută pe cale analitică
- Fig.3.4 Geometria orificiului duzei de rubin în analiza CFD
- Fig.3.5 Elemente de analiză CFD [83]
- Fig.3.6 Element de fluid patrulater [84]
- Fig.3.7 Conturul presiunilor prin orificiul de rubin de 0,25mm
- Fig.3.8 Distribuția presiunii apei la intrarea în duza de rubin
- Fig.3.9 Distribuția presiunii în axa duzei de rubin
- Fig.3.10 Distribuția presiunii la peretele duzei de rubin
- Fig.3.11 Conturul vitezelor prin orificiul de rubin de 0,25mm
- Fig.3.12 Curbele de variație ale vitezei apei la ieșirea din duza de rubin folosind Ansys Flotran-CFD
- Fig.3.13 Modelul geometric CFD al capului de tăiere
- Fig.3.14 Viteza apei la ieșirea din duza de 0,2mm
- Fig.3.15 Viteza apei la ieșirea din duza de 0,25mm
- Fig.3.16 Viteza apei la ieșirea din duza de 0,3mm
- Fig.3.17 Variația tensiunilor Reynolds pentru un jet liber [87]
- Fig.3.18 Conturul de viteze în cazul TA blocat
- Fig.3.19 Variația vitezei apei prin MT în cazul TA blocat
- Fig.3.20 Conturul de viteze în cazul TA liber
- Fig.3.21 Variația vitezei apei prin MT în cazul TA liber
- Fig.3.22 Variația vitezei apei prin MT cu diametrul 0,76mm
- Fig.3.23 Modelul geometric al părții lichide realizat în Ansys-Fluent
- Fig.3.24 Meshul părții lichide realizat în Ansys-Fluent
- Fig.3.25 Liniile de curent ale amestecului abraziv
- Fig.3.26 Căderea de presiune în interiorul CH
- Fig.3.27 Liniile de curent ale aerului în interiorul CH
- Fig.3.28 Trajectoriile particulelor abrazive în interiorul CH
- Fig.3.29 Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,19mm
- Fig.3.30 Graficul ER produsă de particulele cu diametrul 0,190mm
- Fig.3.31 Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,285mm
- Fig.3.32 Graficul ER produsă de particulele cu diametrul 0,285 mm
- Fig.3.33 Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,38mm
- Fig.3.34 Graficul ER produsă de particulele cu diametrul 0,38 mm

- Fig.3.35 Eroziunea produsă de cele trei dimensiuni de particulă
- Fig.3.36 Tensiunile de forfecare tangențiale dezvoltate în timpul curgerii
- Fig.3.37 Liniile de curent ale fazei lichide (apă) [96]
- Fig.3.38 Liniile de curent ale aerului și ale particulelor abrazive [96]
- Fig.3.39 Zone în care se dezvoltă eroziunea [96]
- Fig.3.40 Zonă cu tensiuni tangențiale maxime de perete [96]
- Fig.3.41 Modelul geometric al curgerii jetului liber
- Fig.3.42 Conturul vitezelor jetului de apă liber
- Fig.3.43 Liniile de curent ale jetului de apă liber
- Fig.3.44 Distribuția vitezelor jetului de apă pe zona liberă
- Fig.3.45 Extinderea jetului de apă liber
- Fig.3.46 Distribuția vitezelor jetului de apă în apropierea ieșirii din MT
- Fig.3.47 Graficele vitezelor jetului de apă pe o distanță duză-piesă de 4mm de la ieșirea din MT
- Fig.3.48 Schematizarea regiunii de stagnare [24]
- Fig.3.49 Perioada de staționare a particulelor în CFD
- Fig.3.50 Graficul vitezei jetului de apă în axa de simetrie

Capitolul 4

- Fig.4.1 Schița piesei evaluată experimental prin AWJ
- Fig.4.2 Încercarea la duritate Brinell
- Fig.4.3 Exemplu de evaluare a rugozității maxime Rz [115]
- Fig.4.4 Măsurarea probelor utilizând profilometrul SURTRONIC 3+
- Fig.4.5 Profilul rugozității și al ondulației [116]
- Fig.4.6 Zonele specifice ale tăieturilor
- Fig.4.7 Rugozitatea medie Ra , avans $4mm/min$, zona *superioară* a tăieturii [116]
- Fig.4.8 Ondulația medie Wa , avans $4mm/min$, zona *superioară* a tăieturii
- Fig.4.9 Rugozitatea suprafeței în cazul prelucrării unui material ceramic [121]
- Fig.4.10 Media rugozității Ra^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $10mm$ [116]
- Fig.4.11 Media ondulației Wa^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $10mm$
- Fig.4.12 Media rugozității Ra^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $10mm$
- Fig.4.13 Media ondulației Wa^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $10mm$
- Fig.4.14 Media rugozității Ra^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $10mm$
- Fig.4.15 Media ondulației Wa^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $10mm$
- Fig.4.16 Media rugozității Ra^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $20mm$
- Fig.4.17 Media ondulației Wa^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $20mm$
- Fig.4.18 Media rugozității Ra^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $20mm$
- Fig.4.19 Media ondulației Wa^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $20mm$
- Fig.4.20 Media rugozității Ra^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $20mm$
- Fig.4.21 Media ondulației Wa^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $20mm$
- Fig.4.22 Media rugozității Ra^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $30mm$
- Fig.4.23 Media ondulației Wa^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $30mm$
- Fig.4.24 Media rugozității Ra^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $30mm$
- Fig.4.25 Media ondulației Wa^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $30mm$
- Fig.4.26 Media rugozității Ra^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $30mm$
- Fig.4.27 Media ondulației Wa^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $30mm$
- Fig.4.28 Media rugozității Ra^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $40mm$
- Fig.4.29 Media ondulației Wa^* , avans $4mm/min$, grosimea treptei $40mm$
- Fig.4.30 Media rugozității Ra^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $40mm$
- Fig.4.31 Media ondulației Wa^* , avans $6mm/min$, grosimea treptei $40mm$

- Fig.4.32 Media rugozității Ra^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $40mm$
- Fig.4.33 Media ondulației Wa^* , avans $9mm/min$, grosimea treptei $40mm$
- Fig.4.34 Interfața programului de estimare Ra și Wa [116]
- Fig.4.35 Măsurarea devierii jetului de apă
- Fig.4.36 Devierea jetului de apă la diferite grosimi
- Fig.4.37 Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de $10mm$
- Fig.4.38 Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de $20mm$
- Fig.4.39 Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de $30mm$
- Fig.4.40 Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de $40mm$
- Fig.4.41 Schema prelucrării probelor pentru lățimea și conicitatea tăieturilor
- Fig.4.42 Microscop de măsurare universal
- Fig.4.43 Imagine prin ocularul microscopului asupra tăieturii
- Fig.4.44 Imagine prin ocularul scării gradate a microscopului optic
- Fig.4.45 Forma tăieturii la prelucrarea AWJ
- Fig.4.46 Lățimea tăieturilor în zona superioară (w_s)
- Fig.4.47 Lățimea tăieturilor în zona inferioară (w_i)
- Fig.4.48 Reprezentare spațială a lățimii tăieturilor ($R^2=0,824$)
- Fig.4.49 Reprezentare spațială a lățimii tăieturilor ($R^2=0,794$)
- Fig.4.50 Conicitatea tăieturilor
- Fig.4.51 Unghiurile de înclinare ale fețelor tăieturilor
- Fig.4.52 Pregătirea probelor în vederea măsurării durității
- Fig.4.53 Microduritate Vickers
- Fig.4.54 Duritate tăieturilor pentru grosimea de $20mm$
- Fig.4.55 Duritate tăieturilor pentru grosimea de $30mm$
- Fig.4.56 Duritate tăieturilor pentru grosimea de $40mm$
- Fig.4.57 Distribuția influenței jetului de apă

Capitolul 5

- Fig.5.1 Modelul geometric al MT în cadrul analizei CFD
- Fig.5.2 Viteza apei prin MT conform CFD
- Fig.5.3 Eroziunea CFD prin MT
- Fig.5.4 Rata de eroziune a MT conform CFD
- Fig.5.5 Viteza de eroziune a MT conform CFD
- Fig.5.6 Dimensiunile tubului de amestec
- Fig.5.7 Distribuția de viteze la distanța duză-piesă de $1mm$
- Fig.5.8 Distribuția de viteze la distanța duză-piesă de $3mm$
- Fig.5.9 Distribuția de viteze CFD corelată cu lățimile tăieturilor
- Fig.5.10 Diagrama zonelor ecruisate de jetul de apă
- Fig.5.11 Analiza microstructurii oțelului P275NL2 în zona afectată
- Fig.5.12 Analiza microstructurii oțelului P275NL2 în zona neafectată

LISTĂ CU TABELE

Introducere

Tabel I.1 Caracteristicile procedeeilor tehnologice [5-12]

Capitolul 1

Tabel 1.1 Rata de eroziune a particulelor abrazive pentru materialul AISI 1020 [24]

Tabel 1.2 Constantele A_i din ecuația (1.26), [22]

Tabel 1.3 Valorile factorului A_i din ecuația (1.28), [22]

Capitolul 2

Tabel 2.1 Caracteristicile tehnice ale mașinii AWJ - WUXI YCWJ-380-1520 [51]

Tabel 2.2 Date cu privire la debitului de apă al mașinii AWJ

Tabel 2.3 Caracteristicile hidraulice ale apei [56, 77]

Tabel 2.4 Parametrii hidraulici prin duza de apă

Tabel 2.5 Caracteristicile hidraulice ale aerului [60, 61]

Tabel 2.6 Parametrii hidraulici prin tubul de abraziv

Tabel 2.7 Caracteristicile abrazivi folosiți la prelucrarea AWJ [17]

Tabel 2.8 Compoziția chimică a nisipului abraziv

Tabel 2.9 Caracteristicile fizice ale nisipului abraziv [66, 67]

Tabel 2.10 Granulozitatea nisipului AWJ

Tabel 2.11 Particule de nisip analizate pentru stabilirea factorului de formă

Tabel 2.12 Caracteristicile de formă ale particulelor de nisip

Tabel 2.13 Caracteristicile debitului de abraziv

Capitolul 3

Tabel 3.1 Caracteristicile curgerii turbulente prin duza de apă

Tabel 3.2 Caracteristicile geometrice CFD ale duzei de rubin

Tabel 3.3 Date referitoare la modelarea curgerii prin duza de rubin

Tabel 3.4 Dimensiunile orificiilor capului de tăiere

Tabel 3.5 Date referitoare la modelarea curgerii prin capul de tăiere

Tabel 3.6 Vitezele caracteristice prin duzele de apă

Tabel 3.7 Caracteristicile de curgere în cazul TA blocat

Tabel 3.8 Caracteristicile de curgere în cazul TA liber

Tabel 3.9 Valorile coeficienților din ecuațiile (3.27) și (3.28) [93]

Tabel 3.10 Date introduse la simularea CFD în Ansys-Workbench

Tabel 3.11 Debitul de nisip prin intrarea TA

Tabel 3.12 Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,19 mm

Tabel 3.13 Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,285 mm

Tabel 3.14 Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,38 mm

Tabel 3.15 Date utilizate la simularea CFD în cadrul Transient Time

Tabel 3.16 Date utilizate la simularea CFD în zona duză-piesă

Tabel 3.17 Valorile extinderii jetului de apă în CFD

Tabel 3.18 Valorile vitezelor apei în lungul axei jetului in CFD

Capitolul 4

Tabel 4.1 Parametrii tehnologici utilizați la încercările experimentale

Tabel 4.2 Compoziția chimică a oțelului analizat, [%]

Tabel 4.3 Caracteristicile mecanice ale oțelului P275NL2 [110]

Tabel 4.4 Parametrii de profil în cazul probei 10-1-9-S

Tabel 4.5	Rugozitatea și ondulația medie în cazul treptei de grosime de 10mm
Tabel 4.6	Rugozitatea și ondulația medie în cazul treptei de grosime de 20mm
Tabel 4.7	Rugozitatea și ondulația medie în cazul treptei de grosime de 30mm
Tabel 4.8	Rugozitatea și ondulația medie în cazul treptei de grosime de 40mm
Tabel 4.9	Coeficienții ecuațiilor curbelor de tendință pentru Ra^* și Wa^*
Tabel 4.10	Valorile extreme ale coeficienților ecuațiilor curbelor de tendință
Tabel 4.11	Valorile curburii jetului în cazul treptei de 10mm
Tabel 4.12	Relațiile curbelor de deviere ale jetului de apă
Tabel 4.13	Valorile unghiului de deviere, θ [grd]
Tabel 4.14	Valorile lățimilor tăieturilor în zona superioară, w_s [mm]
Tabel 4.15	Valorile lățimilor tăieturilor în zona inferioară, w_i [mm]
Tabel 4.16	Coeficienții ecuației din relația (4.22)
Tabel 4.17	Coeficienții ecuației din relația (4.23)
Tabel 4.18	Valorile conicităților tăieturilor, C [mm/mm]
Tabel 4.19	Valorile unghiului conicităților, α_k [grd]
Tabel 4.20	Valorile durtății HV pentru grosimea de 20mm
Tabel 4.21	Valorile durtății HV pentru grosimea de 30mm
Tabel 4.22	Valorile durtății HV pentru grosimea de 40mm
Tabel 4.23	Valorile zonei influențate [mm]

Capitolul 5

Tabel 5.1	Date utilizate la simularea CFD prin MT
Tabel 5.2	Evaluarea eroziunii prin MT conform CFD
Tabel 5.3	Caracteristicile geometrice ale tubului de amestec
Tabel 5.4	Pierderea de masă a MT obținută experimental
Tabel 5.5	Valorile eroziunii MT determinate experimental
Tabel 5.6	Caracteristicile grăunților cristalini
Tabel 5.7	Corelarea durtății cu indicele de mărime

INTRODUCERE

Valorificarea cât mai eficientă a materiei prime conduce la creșterea nivelului complexității echipamentelor, precum și la probleme legate de fabricarea și mentenanța acestora, prin adoptarea unor procedee tehnologice ce pot satisface condițiile impuse de realizarea produselor necesare desfășurării activităților industriale [1].

Calitatea suprafețelor prelucrate este o cerință ce trebuie urmărită la toate procedeele de prelucrare. Materialul P275NL2 studiat în această teză, este un oțel slab aliat ce se utilizează la construcția echipamentelor petroliere (conducte, mantale, virole etc), acest material fiind destinat confecționării aparaturii petrochimice ce lucrează în condiții de presiune ridicată.

Procedeul AWJ prezintă eficiență ridicată la prelucrarea materialelor de tip placă utilizate frecvent la fabricarea echipamentelor petroliere și de rafinării, motiv pentru care ne-am axat pe cercetarea prelucrabilității cu jet de apă a acestui material. În **fig.I.1** sunt prezentate câteva situații în care procedeul AWJ este mai avantajos de utilizat, cum ar fi: execuția marginilor tablelor destinate îmbinărilor sudate, precum și confecționarea plăcilor tubulare din componența schimbătoarelor de căldură, profile plane de mari dimensiuni sau cu geometrii complexe, elemente ale robinetelor petroliere de secționare, garnituri etc.

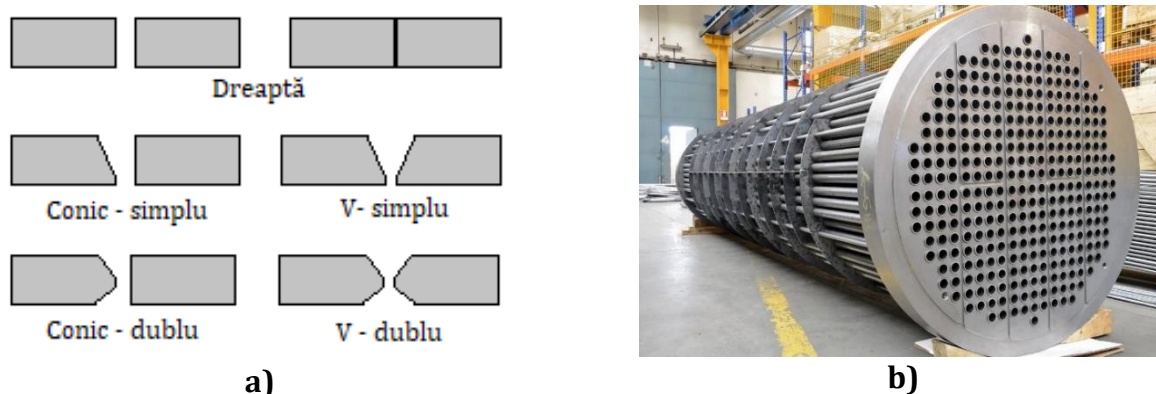


Figura I.1. Utilizarea procedeeului AWJ: (a) – Marginile tablelor pentru sudare [2]; (b) – Placa tubulară a unui schimbător de căldură [3]

În continuare sunt prezentate unele aspecte ce caracterizează procedeul AWJ și îl fac recomandat față de celelalte procedee tehnologice de fabricație:

- Prelucrarea se realizează cu pierderi minime de material, datorită grosimii relativ mici a jetului de apă;
- Se pot realiza diferite configurații geometrice 2D de dimensiuni mari într-un timp relativ scurt. Este foarte avantajos în cazul prelucrării materialelor de tip placă;
- Uzura elementelor active ale instalației AWJ este relativ scăzută, comparativ cu volumul reperelor executate;
- În majoritatea cazurilor, instalațiile AWJ sunt digitalizate (controlate prin sisteme CNC), ceea ce îl face un procedeu de fabricație foarte flexibil;
- Productivitate și precizie ridicată în comparație cu celelalte procedee uzuale de debitare a materialelor, după cum se poate observa în **fig.I.2**;
- Adaptabilitatea procedeeului la fabricarea pieselor cu diferite dimensiuni, geometrii și materiale cu diferite caracteristici fizico-mecanice.

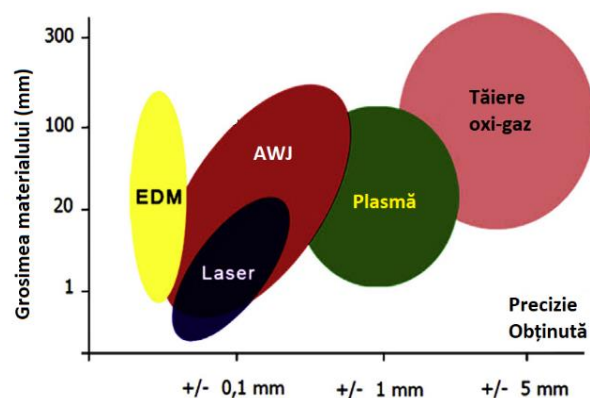


Figura. I.2. Precizia obținută prin diferite procedee de debitare [4]

Stabilirea parametrilor optimi de lucru pentru anumite situații, cât și influența acestora asupra calității suprafețelor prelucrate, s-a considerat că este utilă atât cercetătorilor, cât și specialiștilor din producție ce operează aceste instalații. Din cercetările bibliografice efectuate pe parcursul tezei nu s-au găsit date referitoare la prelucrarea AWJ a materialului P275NL2 și nici modul cum parametrii de lucru influențează calitatea acestuia.

Obiectivul general al tezei de doctorat este reprezentat de studiul prelucrabilității materialului P275NL2 utilizând procedeul tehnologic AWJ.

Obiective specifice ce au fost dezvoltate în cadrul tezei sunt:

- Studiul bibliografic cu privire la evaluarea teoretică și experimentală a procesului de eroziune produs asupra materialelor prezentate în cadrul tezei (cap. 1);
- Stabilirea parametrilor hidraulici de curgere în regim staționar specifici instalației de prelucrare cu jet de apă tip WUXI YCWJ-380-1520 (cap. 2);
- Analiza materialului abraziv utilizat la prelucrarea cu jet de apă (subcap. 2.6);
- Analiza teoretică a curgerii prin componentele active ale instalației de prelucrare AWJ și stabilirea ecuațiilor de mișcare (subcap. 3.1, 3.2);
- Studiul procesului de eroziune prin elementele active ale instalației WUXI YCWJ-380-1520 folosind analiza CFD (subcap. 3.3);
- Analiza teoretică a jetului de apă liber generat de MT cu orificiul de 0,76mm, utilizând analiza CFD (subcap. 3.4);
- Stabilirea optimă a parametrilor de lucru ai procedeului AWJ, în scopul obținerii unei calități superioare a suprafețelor materialului prelucrat (subcap. 4.2, 4.3);
- Studiul fenomenului de deviere a jetului de apă produs asupra materialului P275NL2 (subcap. 4.4);
- Stabilirea vitezei de tăiere a materialului P275NL2 prin analiza tăieturilor, precum și influența jetului asupra zonei adiacente acestora (subcap. 4.5, 4.6, 5.2);
- Evaluarea uzurii prin eroziune a tubului de amestec cu diametrul de 0,76mm prin analiză CFD și experimentală (subcap. 5.1).

Teza de doctorat "Cercetări teoretice și experimentale privind prelucrarea cu jet de apă a unor materiale metalice utilizate în industria petrolieră și petrochimică", prezintă un studiu al fenomenului de eroziune produs de jeturile abrazive de mare viteză asupra materialelor metalice din componența echipamentelor industriale. Această analiză s-a realizat utilizând

metode analitice și experimentale, cu ajutorul programelor de simulare CFD și utilizând instalația AWJ din dotarea departamentului *Inginerie Mecanică* din UPG Ploiești.

Teza de doctorat "*Cercetări teoretice și experimentale privind prelucrarea cu jet de apă a unor materiale metalice utilizate în industria petrolieră și petrochimică*", prezintă un studiu al fenomenului de eroziune produs de jeturile abrazive de mare viteză asupra materialelor metalice din componența echipamentelor industriale. Această analiză s-a realizat utilizând metode analitice și experimentale, cu ajutorul programelor de simulare CFD și utilizând instalația AWJ din dotarea departamentului *Inginerie Mecanică* din UPG Ploiești.

În **capitolul 1**, intitulat "*Studiu bibliografic asupra uzurii prin eroziune a materialelor*", se face o sinteză asupra procedurilor de elaborare ale semifabricatelor, atât în cazul celor uzuale, cât și în cazul procedurilor neconvenționale, cum este și cazul procedurii AWJ. Sunt prezentați factorii ce contribuie exclusiv în cadrul procesului de eroziune cu particule solide, mecanismele de îndepărtare de material prin abraziune, precum și modelele matematice dezvoltate de diverși cercetători obținute pe cale analitică, semiempirică sau empirică, de estimare a ratei de eroziune. De asemenea, sunt prezentate metodele moderne recomandate de estimare a eroziunii produsă în cadrul prelucrării AWJ cu ajutorul simulării CFD.

Capitolul 2, "*Instalația și materialele utilizate în cadrul analizei prelucrării AWJ*", are ca scop prezentarea instalației *WUXI YCWJ-380-1520*, precum și determinarea și analiza parametrilor geometrici și hidrodinamici, specifici materialelor utilizate în cadrul prelucrării AWJ studiate. S-au efectuat măsurători asupra elementelor active ale instalației, în scopul stabilirii caracteristicilor geometrice necesare modelării curgerii prin acestea. Este prezentat modul de stabilire al parametrilor hidraulici ai curgerii prin orificiul de rubin al HPN, cu ajutorul datelor obținute în cadrul măsurării volumului de umplere al cuvei mașinii într-un interval de timp. În același mod s-au stabilit parametrii de curgere prin orificiul TA, măsurând presiunea vacumatică produsă în camera de amestec, iar valorile acestor parametri s-au stabilit prin simulare CFD. În cadrul acestui capitol este prezentată și analiza materialului abraziv, în ceea ce privește compoziția chimică a acestuia, granulometria, factorul de formă al particulei de nisip, precum și debitul de abraziv generat de instalație în funcție de diviziunile de pe controllerul mașinii.

În **capitolul 3**, "*Studiu teoretic asupra fenomenului prelucrării AWJ*", s-a realizat analiza teoretică a curgerii erozive prin elementele active ale instalației *WUXI YCWJ-380-1520*, precum și studiul jetului de apă liber. S-a analizat curgerea prin orificiul de rubin al HPN cu diametrul de 0,25mm, utilizând două metode teoretice: evaluare prin calcul analitic și prin simulare CFD în Ansys Flotran, în scopul determinării legilor de mișcare ce guvernează regimul turbulent de curgere și compararea acestor rezultate. De asemenea, tot în cadrul analizei CFD s-a realizat un studiu în ceea ce privește curgerea prin CH utilizând diametrele (0,2; 0,25; 0,3)mm în cazul HPN și (0,76; 0,9; 1,02)mm în cazul MT, în scopul stabilirii dimensiunilor optime ale acestor elemente. În cadrul acestei analize s-a realizat și un studiu în ceea ce privește curgerea prin CH în situațiile când tubul de abraziv este liber sau blocat, cu scopul de a determina factorul de amplificare al vitezei la ieșirea din MT. S-a analizat, cu ajutorul simulării CFD-Fluent "*steady-state*" din Ansys, procesul de eroziune produs de particulele de nisip cu diametrele (0,19; 0,285; 0,38)mm în funcție de debitul de abraziv. În cadrul estimării eroziunii asupra elementelor active ale instalației, s-a realizat un studiu în ceea ce privește simularea CFD utilizând modul "*transient-time*" din Ansys

Workbench. În cadrul acestui capitol s-a realizat și analiza CFD a jetului de apă liber, prin reprezentarea grafică a distribuției de viteze la diferite distanțe duză-piesă.

În **capitolul 4**, "*Cercetări experimentale asupra prelucrării prin AWJ a materialului P275NL2*", sunt prezentate încercările experimentale realizate asupra materialului P275NL2 prin procedeul AWJ, considerând grosimile de material (10; 20; 30; 40)mm, vitezele de avans (4; 6; 9)mm/min și distanțele duză-piesă (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0)mm. S-au analizat parametrii de profil ai microasperităților suprafețelor tăieturilor, cu reprezentarea grafică a acestora în funcție de distanța duză-piesă și pentru fiecare zonă specifică de pe suprafața tăieturilor (zona: superioară, centrală și inferioară). Reprezentarea grafică s-a făcut pentru parametrii de profil: X_a , X_t și X_z , în cazul rugozității (R) și al ondulației suprafețelor (W). În funcție de reprezentarea grafică, s-au determinat legile de distribuție ale parametrilor R_a și W_a pentru fiecare treaptă de grosime, distanță duză-piesă și viteză de avans considerată. În cadrul încercărilor experimentale s-a analizat devierea jetului de apă produsă pe suprafețele tăieturilor și reprezentarea grafică a acestora în funcție de distanța duză-piesă, viteza de avans și treapta de grosime a materialului. S-a realizat analiza lățimii tăieturilor și a conicității acestora la distanțele duză-piesă considerate, prelucrate cu avansul de 4mm/min, în scopul stabilirii legilor de distribuție ale acestora în funcție de parametrii tehnologici utilizați. De asemenea, s-a realizat un studiu experimental al influenței jetului de apă asupra zonei adiacente tăieturilor, măsurând valorile durtății Vickers și reprezentarea grafică a acestora pentru fiecare treaptă de grosime, cu determinarea zonei ecruisate în funcție de parametrii procesului de prelucrare cu jet abraziv de apă.

Capitolul 5, "*Compararea rezultatelor teoretice cu cele obținute prin încercări experimentale*", prezintă similarități între valorile obținute în cadrul simulării CFD și rezultatele experimentale, în cazul analizei eroziunii prin MT. În acest caz, corelarea s-a făcut prin stabilirea unor legi matematice de variație a ratei și vitezei de eroziune în funcție de timpul de simulare CFD. Stabilirea acestor legi, s-a făcut astfel încât perioada de simulare să fie cât mai apropiată de perioada de lucru efectivă a MT. În acest capitol, s-a făcut corelarea dintre distribuția de viteze obținută prin simulare CFD în cazul jetului de apă liber și rezultatele măsurătorilor realizate asupra tăieturilor și zonelor adiacente ale acestora. Astfel, în cazul lățimii tăieturilor s-a determinat viteza particulei care produce tăierea materialului pentru distanțele limită dintre duză și piesă. În cazul influenței jetului în zona adiacentă tăieturilor s-a determinat viteza limită care produce ecruisarea materialului prin corelarea grafică cu valorile durtăților, precum și analiza microstructurii cristaline a materialului în zona afectată de jetul de apă.

În **capitolul 6**, "*Concluzii finale. Contribuții personale. Direcții viitoare de cercetare*", sunt scoase în evidență concluziile obținute pe parcursul elaborării tezei, elementele de originalitate, precum și direcțiile viitoare de cercetare în domeniul prelucrării materialelor metalice utilizând procedeul AWJ.

CAPITOLUL 1

STUDIU BIBLIOGRAFIC ASUPRA UZURII PRIN EROZIUNE A MATERIALELOR

1.1. Aspecte ale prelucrării cu jet de apă a materialelor metalice

Prelucrarea prin eroziune cu jet de apă datează dinaintea de jumătatea secolului al 19-lea, fiind folosită la dislocarea rocilor cu ajutorul presiunii de apă în procesul de extracție auriferă, folosit în California din 1853 până în 1886. În anul 1960, Aviația SUA a dezvoltat un sistem de înaltă presiune în scopul tăierii materialelor dure. Acest sistem utiliza o pompă ce dezvoltă o presiune de 100.000psi (690MPa), fiind capabilă să taie materiale cu caracteristici mecanice ridicate. Tot în această perioadă Inamaka a dezvoltat un sistem de înaltă presiune și a condus un experiment de tăiere a diferitelor materiale la presiuni de 1000MPa [5]. Procedeele prin prelucrare cu jet de apă se împart în mai multe categorii, după cum se prezintă în continuare.

- **Prelucrare cu jet de apă simplu.** Cu acest procedeu se pot tăia materiale cu duritate scăzută, cum ar fi: hârtia, materiale de etanșare, materiale plastice, materiale textile, materiale de construcții etc. Acest procedeu de tăiere cu jet de apă pur este extrem de precis, deoarece jetul de apă poate avea grosimi mai mici de 0,1mm [5, 6].

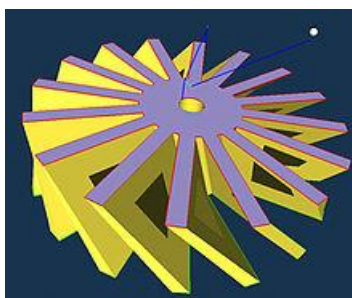
- **Prelucrare cu jet de apă abraziv.** Utilizând acest procedeu de tăiere cu jet de apă abraziv se pot prelucra materiale dure cum ar fi: metale, roci, sticlă sau materiale ceramice. Jetul de apă este folosit pentru a mări viteza particulelor abrazive antrenate de acesta. Prelucrarea cu jet de apă abraziv este asemănătoare cu teoria microașchierii [5, 6].

- **Curățarea/sablarea suprafețelor prin utilizarea jeturilor de apă.** În operațiile de curățare sau sablare prin procedee de prelucrare cu jet de apă sunt utilizate în special jeturi la viteze mari, în general 80-200 m/s. Distanța optimă este la aproximativ 5D (diametrul duzei), iar jetul își pierde din abilitățile de curățare la o distanță mai mare de 26D [5, 7].

- **Prelucrarea tridimensională cu ajutorul jetului de apă.** Prelucrarea cu jet de apă este capabilă să producă diverse tăieturi în material prelucrat, iar cu ajutorul programelor specializate și capetelor de prelucrare tridimensionale se pot realiza forme complexe, așa cum se arată în **fig.1.1**. În afară de sistemele de prelucrare tridimensionale mai sunt și brațele robotice, cum este prezentat în **fig.1.2**.



a)



b)

Figura 1.1. Prelucrare AWJ pe mașini multi-axe [5]: a) – cap de tăiere spațial; b) – modelarea piesei prelucrate



Figura 1.2. Braț robotic folosit la prelucrarea cu jet de apă [8]

- **Forajul sondelor cu ajutorul jetului abraziv (metodă de foraj neconvențională).** În acest procedeu nu există nici un contact între sapa de foraj și talpa sondei [9]. Pentru obținerea vitezelor mari ale jetului la forajul prin eroziune, sunt necesare presiuni extreme de mari de circulație a noroiului de foraj.

Prelucrarea cu jet abraziv de apă (AWJ) este un proces de îndepărtare a materialului cu ajutorul jetului abraziv de mare viteză. Fluidul de lucru este un amestec multifazic format din particule abrazive și aer ce pătrund în jetul de apă printr-un orificiu, așa cum se prezintă în **fig.1.3**. În general, capul de tăiere este controlat de un sistem CNC după două sau mai multe axe. Echipamentul utilizat la prelucrarea cu jet de apă este relativ simplu și cu un cost scăzut comparativ cu celelalte procedee de prelucrare neconvenționale [10].

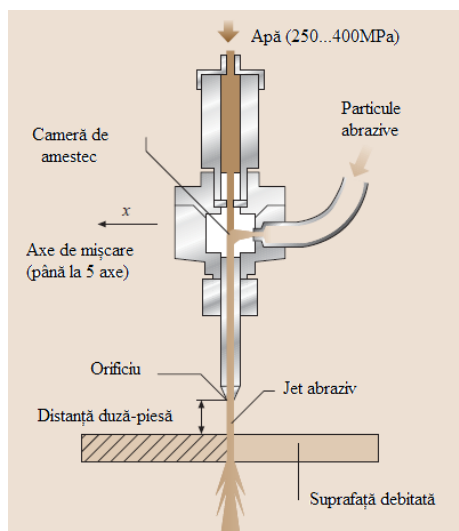


Figura 1.3. Schema de principiu a prelucrării AWJ [10]

Pentru a produce presiuni înalte și implicit viteze ridicate ale particulelor abrazive necesare prelucrării, mașinile de debitat cu jet de apă sunt construite cu anumite componente: unitatea de alimentare cu apă, unitatea de presiune hidrostatică (ce realizează presiune ridicată), amplificatorul (ce poate ridica presiunea apei la 400MPa, chiar și peste această valoare), amortizorul de pulsații, capul de tăiere în componența căruia fac parte duza de apă (HPN) și tubul de amestec (MT), precum și tancul de alimentare cu abraziv. Schița instalației de prelucrare AWJ este prezentată în **fig.1.4**. De asemenea, echipamentele de prelucrare cu apă au încorporate mese de prindere și fixare, precum și sisteme CNC [8].

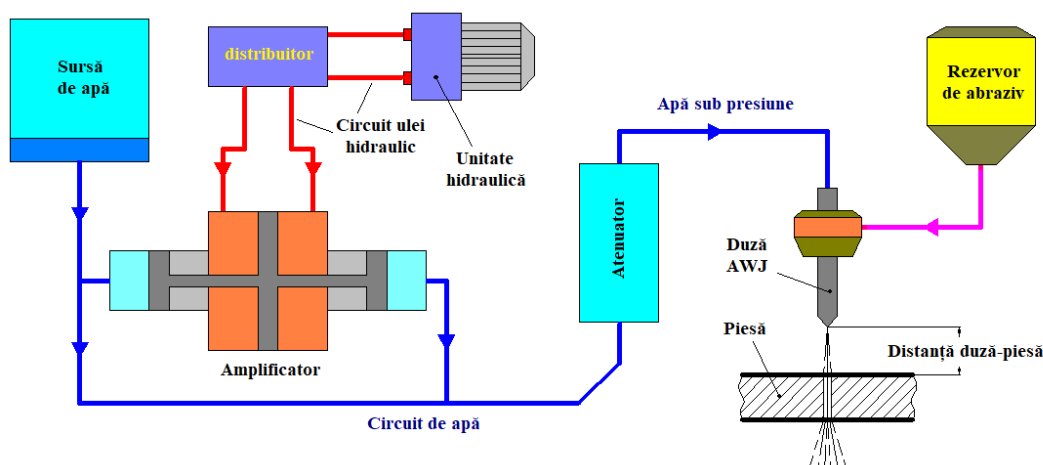


Figura 1.4. Schema de principiu a instalației de prelucrare cu jet de apă [11]

1.2. Parametri ce influențează prelucrarea cu jet de apă

Parametri ce influențează procesul de prelucrare AWJ se împart în două categorii:

- Parametrii procesului tehnologic de prelucrare;
- Parametrii procesului de eroziune.

Procesul de eroziune prin prelucrarea cu jet de apă este influențat de un număr destul de mare de factori și parametri. În cele ce urmează vor fi prezentați cei mai importanți parametri ce influențează eroziunea.

- **Forma particulei.** S-a observat că forma particulei are o influență semnificativă asupra eroziunii. Levi și Chik [12, 13], Au observat că eroziunea obținută cu ajutorul particulelor ascuțite este de patru ori mai mare comparativ cu rezultatele obținute în cazul particulelor rotunde.

- **Dimensiunea particulelor** [12, 13]. Particulele cu o dimensiune mai mare au o energie cinetică mai mare, chiar dacă ele au o viteză de impact mai mică decât particulele de mici dimensiuni. În fig.1.5 se arată influența dimensiunii particulelor într-un experiment realizat de Tilly.

- **Materialul particulei.** În experimentele conduse de Levy și colaboratorii săi [12], aceștia au cercetat efectele durității particulelor în procesul de eroziune. Rata de eroziune produsă de cinci materiale abrazive (apatită, calciu, SiO_2 , Al_2O_3 , SiC) sunt reprezentate în fig.1.6. Pentru abrazivi mai moi, precum calcitul (CaCO_3) și apatită ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$), rata de eroziune este foarte scăzută deoarece, particulele moi se descompun în mai multe bucăți atunci când lovesc suprafața.

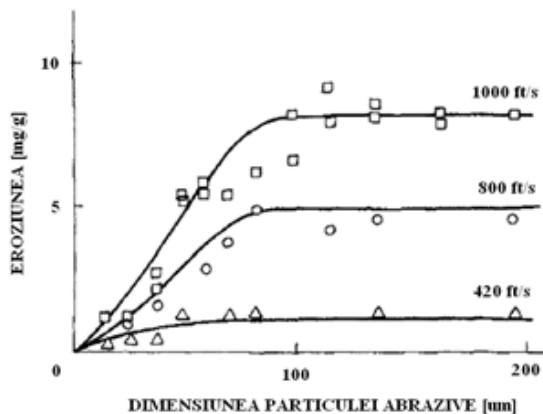


Figura 1.5. Rata de eroziune pentru un oțel cu 11%Cr, [12, 14]

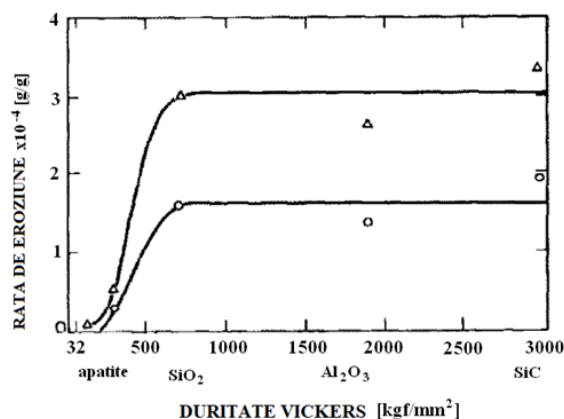


Figura 1.6. Rata de eroziune a oțelului AISI1020 pentru cinci elemente erodente [12, 14]

- **Proprietățile fluidului abraziv.** Proprietățile fluidului transportor pot influențează procesul de eroziune prin modificarea viteza particulelor. Vâscozitatea și densitatea, afectează comportarea particulelor, influențând modelului de eroziune și magnitudinea acestuia. O concentrație locală de particule mai ridicată înseamnă o interacțiune de tip particulă-particulă mai mare, ducând la apariția fenomenului de ecranare [14].

- **Proprietățile materialului erodat.** În unele experimente, s-a observat că duritatea Vickers a unui material este corelată cu rata de eroziune. Finnie [12] a stabilit că volumul de material îndepărtat pentru un oțel normalizat este proporțional cu inversul durității *HV*.

- **Unghiul de impact.** Rata de eroziune în funcție de unghiul de impact variază de la materialele ductile la cele fragile, așa cum este prezentată în **fig.1.7**. La materialele ductile rata de eroziune crește treptat până la o valoare maximă (între 15° și 40°), după care descrește. Eroziunea maximă a materialelor fragile apare la unghiuri de impact apropiate de normala la suprafața erodată.

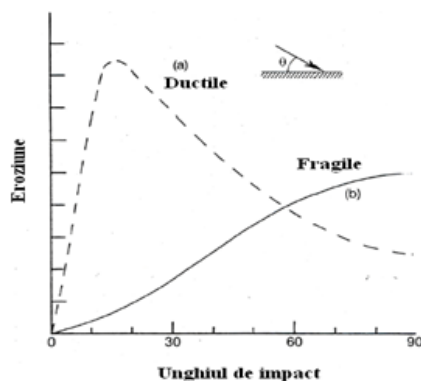


Figura 1.7. Variația eroziunii în funcție de unghiul de impact pentru materialele ductile și fragile [12, 13, 15, 16, 17]

- **Viteza de impact.** O ecuație teoretică pentru a estima viteza de eroziune a fost dezvoltată de Finnie în 1960 [12], în care, viteza de eroziune (v_e) este proporțională cu pătratul vitezei de impact (v_p), ce este atribuită energiei cinetice a particulei.

- **Concentrația de particule.** Wang și colab. [12] au realizat experimente cu o concentrație a particulelor între 1...8% din greutatea masei de fluid. Rezultatele au arătat o dependență a ratei de eroziune (ER) cu concentrația de particule (Φ_p), dată de relația (1.1).

$$ER = \frac{k}{\Phi_p^{0.19}} \quad (1.1)$$

Distanța dintre duză și piesă. Distanța dintre duză-piesă are efect asupra rugozității suprafeței și lățimii tăieturii [18]. Rugozitatea suprafeței crește odată cu creșterea distanței dintre duză și materialul prelucrat. Comportarea variației distanței duză-piesă asupra rugozității suprafeței este arătată în **fig1.8a**. Similar se observă că lățimea tăieturii crește odată cu creșterea distanței dintre duză și piesă. Aceasta se arată în **fig.1.8b**.

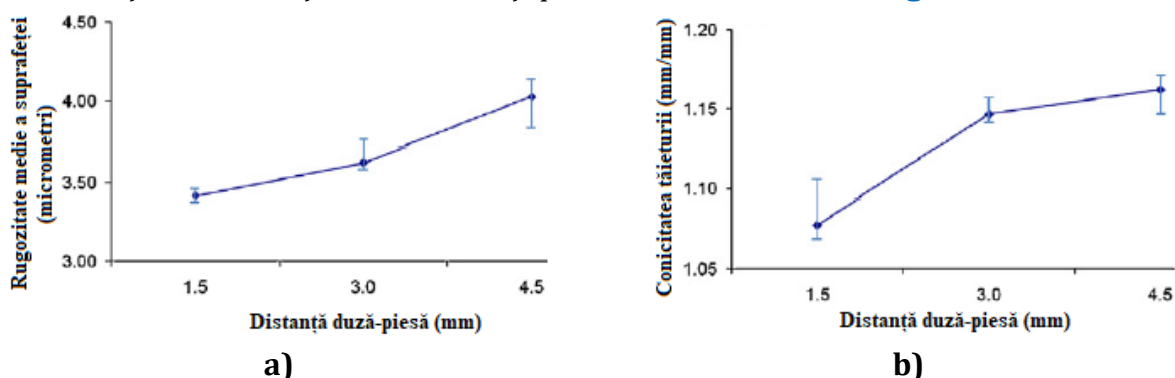


Figura 1.8. Efectul distanței dintre duză și piesă [19]: a) – efectul asupra rugozității suprafeței; b) – efectul asupra lățimii tăieturii

- **Temperatura [12, 14].** Sunt propuse diferite ipoteze pentru a explica rolul temperaturii în mecanismul de eroziune. Smeltzer și colab. (1970) au observat că rata de

eroziune crește odată cu creșterea temperaturii. Totuși, efectele temperaturii în procesul de eroziune nu sunt tocmai clare, dar se consideră că aceasta ar avea influențe limitate.

1.4. Modele matematice pentru evaluarea eroziunii materialelor metalice

• **Modele analitice.** Finnie [13, 14, 20] a fost primul cercetător care a analizat eroziunea cu jet de apă. Modelul lui estimează eroziunea produsă de o particulă considerând condițiile de curgere ale fluidului și mecanismele de îndepărtare de material. El a propus două ecuații de estimarea volumului de material îndepărtat de o singură particulă abrazivă pentru un unghi de impact scăzut și unul ridicat.

$$V_{indpt} = \frac{M \cdot v_p^2}{c \cdot \psi \cdot k} \left[\sin(2\alpha) - \frac{6}{k} \sin^2 \alpha \right], \text{dacă } \tan \alpha \leq \frac{k}{6} \quad (1.2)$$

$$V_{indpt} = \frac{M \cdot v_p^2}{c \cdot \psi \cdot k} \left(\frac{k \cdot \cos^2 \alpha}{\alpha} \right), \text{dacă } \tan \alpha \geq \frac{k}{6} \quad (1.3)$$

,unde: M - masa totală a particulelor abrazive care lovesc materialul [kg]; v_p - viteza particulei abrazive [m/s]; c - constantă ce ține cont de presiunea de contact pe suprafață materialului [-]; ψ - factor al raportului dintre lungimea de contact pe adâncimea de tăiere [-]; k - indice al componentei verticale a forței totale ce acționează asupra particulei [-]; α - unghiul de impact [grd].

Bitter [12, 13, 16] propune deformări și tăieri repetate ca două mecanisme de eroziune și a dezvoltat două modele pentru a estima rata de eroziune produsă de aceste două mecanisme, pentru materiale ductile și fragile. În prima parte a studiului, el a dezvoltat o ecuație bazată pe bilanțul energetic pentru o ciocnire elasto-plastică, pentru a estima eroziunea produsă de mecanismul de deformare.

$$ER_{VP} = \frac{M \cdot [(v_p \sin \alpha) - k]}{2 \cdot c_2} \quad (1.4)$$

,unde: ER_{VP} - uzura prin deformare [m³]; M - masa totală a particulelor abrazive care lovesc materialul [kg]; v_p - viteza particulei abrazive [m/s]; c_2 - factor de corecție al uzurii prin deformare [-]; k - constantă determinată de proprietățile elastice ale materialului [-];

În cea de-a doua parte a luat în considerare efectul așchierii, după cum urmează:

$$ER_{VC1} = \frac{2Mv_p[(v_p \sin \alpha) - k]}{\sqrt{v_p \cdot \sin \alpha}} \left\{ V_p \cos \alpha - \frac{C[(v_p \sin \alpha) - k]^2}{\sqrt{v_p \cdot \sin \alpha}} \right\}, \text{pentru } \alpha \geq \alpha_{p0} \quad (1.5)$$

$$ER_{VC2} = \frac{M \left[v_p^2 \cos^2 \alpha - k_1 \sqrt{[(v_p \sin \alpha) - k]^3} \right]}{2\chi}, \text{pentru } \alpha \leq \alpha_{p0} \quad (1.6)$$

,unde: ER_{VC1} - pierderea de material prin tăiere, atunci când particula rămâne în material după ciocnire [m³]; ER_{VC2} - pierderea de material prin tăiere, atunci când particula părăsește suprafața după ciocnire [m³]; k_1 - constantă determinată de proprietățile elastice ale materialului [-]; C - constantă [-]; χ - factor de corecție al uzurii prin tăiere [-]; α_{p0} - unghiul

de impact la care componenta orizontală devine zero, caz când particula părăsește suprafața materialului prelucrat [grd].

Eroziunea totală este suma eroziunilor produse de aceste două mecanisme, deformări și tăieri repetate, dată de relația:

$$ER_{VT} = ER_{VP} + ER_{VC} \quad (1.7)$$

• **Modele semiempirice.** Adicional la ecuațiile de eroziune teoretice, numeroase ecuații au fost dezvoltate bazându-se pe teste experimentale. Multe din aceste ecuații au fost prezentate în forma generală propusă de Finnie [12].

$$v_e = k \cdot V_p^n \cdot f(\alpha) \quad (1.8)$$

unde: v_e - viteza de eroziune [m/s]; $f(\alpha)$ - funcție ce depinde de unghiurile de impact; k - constantă ce depinde de proprietățile materialului prelucrat [-]; n - exponent ce poate lua valorile de 2,3 sau 2,4.

• **Modele empirice. American Petroleum Institute (API) [14]** a realizat cele mai timpurii ecuații empirice pentru estimarea vitezei de eroziune. Este stabilită următoarea formulă:

$$v_e = \frac{C_1}{\sqrt{\rho_m}} \quad (1.9)$$

,unde: C_1 - constantă empirică [-]. În această expresie, v_e este exprimată în [ft/s], iar ρ_m este densitatea amestecului de fluid exprimat în [lb/ft³]. Atunci când condițiile de lucru sunt necorosive și fără particule solide, API a propus următoarele valori pentru constanta empirică: 100 pentru condiții de lucru continue și curate și 125 pentru condiții de lucru intermitente.

1.5. Determinarea eroziunii materialelor metalice în timpul procesului de prelucrare cu jet abraziv de apă prin analiză CFD

În cazul instalațiilor de tăiere cu jet de apă, curgerea prin tubul de amestec se poate realiza prin simulări de tip CFD, folosind programe specializate de tip ANSYS Fluent. Curgerea prin tubul de amestec se presupune a fi de tip multifazic, iar în acest caz fluidul se tratează ca fiind continuu și incompresibil. Viteza particulelor abrazive se presupune ca fiind solidară cu fluidul transportor. Rata de eroziune la peretele tubului de amestec poate fi definită, conform [21], de ecuația:

$$ER = \sum_{p=1}^n \frac{Q_{abr} \cdot C(d_p) \cdot f(\alpha) \cdot v_p^{b(v)}}{A_s} \quad (1.10)$$

,unde: $C(d_p)$ - este o funcție ce ține cont de diametrul particulei abrazive; $b(v)$ - este o funcție a vitezei relative a particulelor; A_s - aria de impact de pe suprafața tubului. Implicit se dau valori pentru: $C=1,8 \cdot 10^9$, $f=1$, $b=0$. Densitatea ratei de eroziune este măsurată în unități de kg/s·m², iar aceasta reprezintă o valoare calitativă și nu una fizică.

Pentru modelarea eroziunii materialului piesei de prelucrat prin procedeul AWJ utilizând programe de tip LS-DYNA, există conform [22, 23, 24], două metode de determinare a acesteia:

- Metoda SPH (smooth particle hydrodynamics)
- Metoda ALE (Arbitrary Lagrangian-Euler)

Ambele metode sunt utilizate pentru modelarea jetului abraziv, iar materialul prelucrat este modelat conform metodei cu element finit (FEM).

1.6. Aspecte cu privire la geometria suprafețelor generate prin procedeul AWJ

O caracteristică importantă a procedurii de prelucrare AWJ îl reprezintă fenomenul de deviere al jetului de apă. În cazul unui material de grosime constantă, devierea jetului se poate pune în evidență prin faptul că există o diferență între punctele extreme (de intrare și de ieșire) ale jetului în materialul prelucrat, măsurată după direcția de avans a capului de tăiere, așa cum se arată în schema din **fig.1.9**.

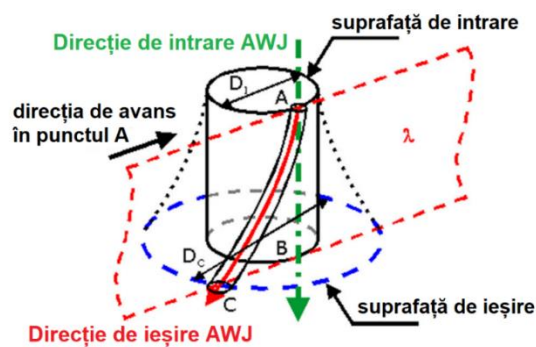


Figura 1.9. Schema de principiu a evaluării devierii jetului de apă [25]

Din lucrarea [25] se observă că parametrul ce caracterizează acest fenomen îl reprezintă unghiul dintre tangenta la urma lăsată de jetul abraziv pe peretele tăieturii (linia AC) și direcția de intrare a jetului în materialul prelucrat (linia AB). Acest parametru poartă denumirea de unghi de deviere (notat cu θ).

Datorită turbulențelor din timpul curgerii, jetul de apă liber capătă o formă conică la ieșire din duză, iar diferite studii au arătat că diametrul de extindere al jetului este proporțional cu distanța duză-piesă [26]. În **fig.1.10** este reprezentată schema de principiu a unui jet de apă liber.

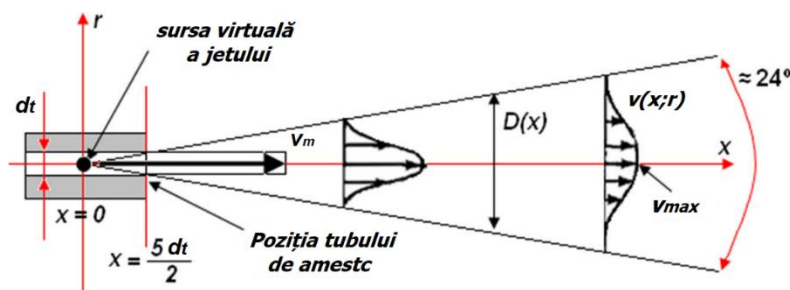


Figura 1.10. Schema extinderii unui jet de fluid [26]

Conform [26], profilul de viteze în secțiunea transversală a unui jet poate fi definit ca o funcție Gauss dată de relația (1.44).

$$v(x, r) = v_{max} \cdot \exp\left(-\frac{50r^2}{x^2}\right) \quad (1.11)$$

, în care: x – reprezintă distanța măsurată în aval de-a lungul jetului față de o sursă virtuală [m]; r – reprezintă raza de extindere a jetului [m]; v_{max} – reprezintă viteza maximă din axa jetului [m/s]. Profilul vitezei jetul de apă de-a lungul axei de simetrie își mărește zona de influență pe măsură ce tubul de amestec se îndepărtează de suprafața materialului țintă.

1.7. Concluzii

➤ Procedul de prelucrare cu jet de apă (AWJ) este un procedeu neconvențional de prelucrare a materialelor metalice și nemetalice din componența utilajelor din construcția de mașini, precum și a echipamentelor petroliere și petrochimice;

➤ Forma particulelor abrazive are o mare influență asupra procesului de eroziune, deoarece o formă cât mai ascuțită a acestora duce la o îndepărtare semnificativă de material similar cu fenomenul pe care îl produce o sculă așchietoare în timpul prelucrării;

➤ Dimensiunea particulelor influențează procesul de eroziune prin faptul că, acestea având o dimensiune mai mare au implicit și o masă mai mare, rezultând o energie cinetică cu un impact considerabil asupra suprafeței materialului prelucrat;

➤ Proprietățile fizice ale particulei abrazive are un rol deosebit în timpul procesului de eroziune, precum și cele ale materialului cu care intră în contact. Din încercări experimentale s-a observat că pentru particule cu duritatea 700HV rata de eroziune rămâne constantă;

➤ În cazul materialelor ductile rata de eroziune crește până la o valoare maximă corespunzătoare unui unghi de impact cuprins între 15° și 40° , după care descrește. La materialele fragile eroziunea crește cu cât acest unghi se apropie de normala la suprafață;

➤ Distanța dintre duza capului de tăiere și materialul prelucrat are influență asupra calității suprafeței prelucrate, precum și asupra formei tăieturii produse de jetul de apă;

➤ Există câteva limitări ale ecuațiilor dezvoltate de cercetători în ceea ce privește modelarea matematică a fenomenul de eroziune, după cum urmează:

- Ecuațiile empirice sunt ușor de utilizat, dar există întotdeauna incertitudini în extrapolarea lor;
- Unii cercetători au dezvoltat modelele mecanice de estimare a eroziunii într-o formă mult comprimată;
- Modelul lui Bitter estimează rata de eroziune prin același mecanism, atât pentru materialele ductile, cât și fragile;
- Modelele empirice sunt dezvoltate luând în considerare anumite condiții de curgere, cum ar fi: viteza, tipul de abraziv, tipul de material etc.

➤ Modelarea curgerii fluidului abraziv prin capul de tăiere al instalației de prelucrare cu jet de apă și a eroziunii materialului prelucrat se face folosind programe specializate de tip CFD, LS-DYNA, ALE, SPH. Toate modelele de curgere și de eroziune existente în literatura de specialitate au fost realizate în anumite condiții particulare de lucru, nefiind universal valabile sau aplicabile, ele depinzând de o multitudine de parametri interdependenți, așa cum s-au prezentat în paragrafele anterioare;

➤ Este necesar să se realizeze o modelare originală, ceea ce s-a efectuat în *capitolul 3*. Scopul acestei modelări este de a determina din punct de vedere teoretic eroziunea produsă asupra elementelor active ale instalației, precum și influența geometriei acestora asupra curgerii fluidului abraziv.

CAPITOLUL 2

INSTALAȚIA ȘI MATERIALELE UTILIZATE ÎN CADRUL ANALIZEI PRELUCRĂRII AWJ

2.1. Instalația de prelucrare cu jet de apă

Încercările experimentale de prelucrare a materialului metalic prin procedeul AWJ, precum și analiza curgerii erozive evaluată în teză, s-au realizat pe mașina de debitat cu jet de apă tip **WUXI YCWJ-380-1520**, prezentată în **fig.2.1a**. Mașina de debitare AWJ are în componența sa următoarele: masa de tăiere CNC, sistemul de înaltă presiune, programul software CAD/CAM, capul de tăiere, supapa de apă de înaltă presiune și sistemul de control al granulelor de nisip. Modelul de afișaj este prezentat în **fig.2.1b**, acest fiind salvat pentru fiecare ciclu de pornire al mașinii, în scopul înregistrării timpilor de lucru necesari evaluărilor ulterioare.

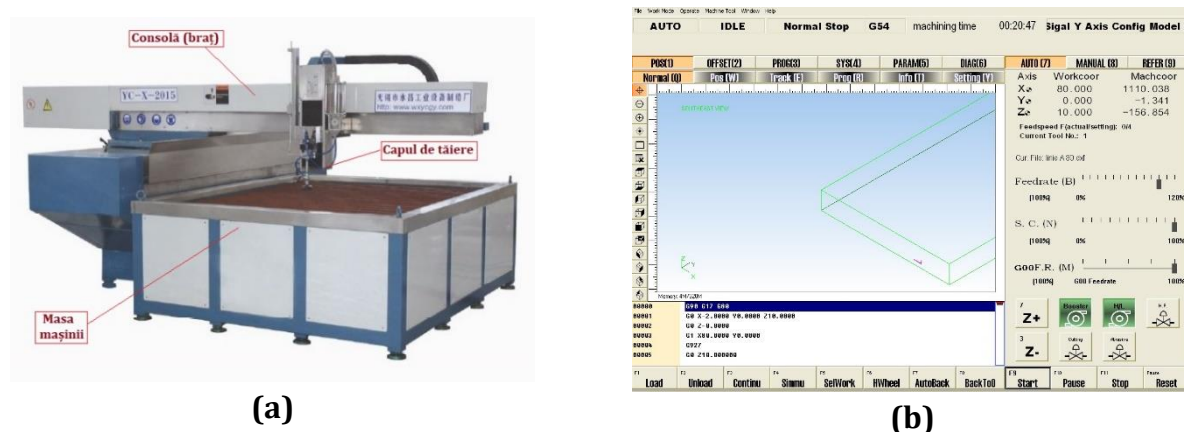


Figura. 2.1. Instalația de prelucrare AWJ: (a) – Mașina de debitat AWJ - *WUXI YCWJ-380-1520* [27]; (b) – Afișajul mașinii

În **tab.2.1** sunt prezentate principalele caracteristici tehnice și de lucru ale mașinii AWJ din dotarea departamentului Inginerie Mecanică din cadrul UPG Ploiești.

Tabelul 2.1. Caracteristicile tehnice ale mașinii AWJ - *WUXI YCWJ-380-1520* [27]

• Structură:	Tip braț în consolă
• Suprafață de tăiere:	1600 x 2100mm
• Deplasare maximă pe axe (X, Y, Z):	(1500; 2000; 200)mm
• Avans X, Y:	0 – 15 m/min
• Precizia de debitare:	$\pm 0,1$ mm
• Presiunea maximă:	380MPa
• Debit maxim:	3,7 l/min
• Capacitate container abraziv:	100 litri

Majoritatea instalațiilor actuale de prelucrare AWJ dezvoltă presiuni în jurul valorii de 380MPa [28, 29]. Pentru stabilirea parametrilor reali de funcționare ai mașinii, sunt necesare efectuarea unor măsurători pe bază experimentală ce vor fi prezentate pe parcursul acestui capitol.

2.2. Componentele active ale mașinii de debitat cu jet de apă

Geometria părților active ale mașinii de debitat cu jet de apă, tip WUXI YCWJ-380-1520, nefiind furnizată de către producător, a fost necesară efectuarea de măsurători asupra acestora. Ansamblul acestor componente active ale mașinii sunt prezentate în **fig.2.2**. Principalul element din componența mașinii de prelucrat cu jet de apă îl reprezintă ansamblul capului de tăiere format din următoarele componente:

➤ **Duza de apă**, numită și duză de înaltă presiune (HPN), reprezintă subansamblul principal al capului de tăiere, prin intermediul căreia se creează presiunea din instalație. Aceasta are la rândul său două componente:

- **Corpul metalic al duzei**, realizată din oțel inoxidabil;
- **Duza de rubin**, cu orificiul de 0,25mm;

➤ **Corpul din oțel** al ansamblului capului de tăiere, în interiorul acestuia se realizează amestecul dintre partea fluidă și materialul abraziv într-o regiune numită cameră de amestec.

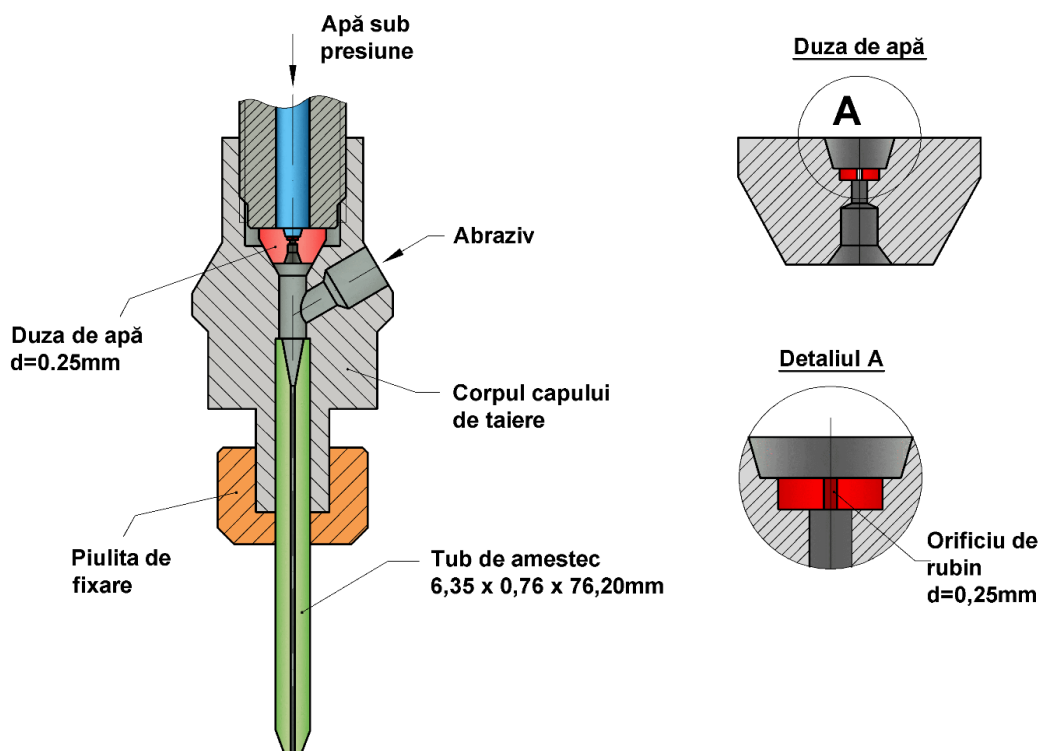


Figura 2.2. Ansamblul elementelor active ale mașinii de prelucrat cu jet de apă

➤ **Tubul de amestec** (sau tubul de concentrare) reprezintă componenta principală în ceea ce privește formarea jetului abraziv, aceasta fiind cel mai intens supus uzurii prin eroziune. În cazul analizat acesta are orificiul de 0,76mm. S-a stabilit valoarea de 13grd a semiunghiului conului interior al tubului, corespunzător diametrului obținut prin măsurare microscopică.

Analiza materialului MT și a compoziției chimice a fost realizată cu ajutorul microscopului de analiză metalografică SEM din laboratorul *INOE Măgurele*. În urma analizei SEM a compoziției chimice a rezultat un material pentru MT ce are ca principale elemente componente C și W, în cantitățile procentuale de 33,69%, respectiv 61,96%.

2.3. Calculul debitului de apă generat de instalația WJ

Pentru studiul hidraulic asupra elementelor active ale mașinii de tăiat cu jet de apă de tip WUXI YCWJ-380-1520 este necesară cunoașterea debitului de apă pe care mașina îl generează. S-a stabilit debitul de apă prin metode experimentale, calculând volumul de apă pe care mașina îl umple într-un interval de timp Δt_u . Acesta este dat de relația (2.1).

$$V_a = A_{cv} \cdot \Delta h \quad (2.1)$$

Debitul de apă generat de mașină este dat de relația (2.2) și reprezintă cantitatea de volum de lichid generat în unitatea de timp [30, 31]. Valorile obținute în urma măsurătorilor, precum și rezultatele obținute din calculul debitului de apă sunt prezentate în tab.2.2.

$$Q_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta t_u} \quad (2.2)$$

Tabelul 2.2. Date cu privire la debitului de apă al mașinii AWJ

Aria cuvei, A_{cv} [m ²]	Diferența de nivel, Δh [m]	Volumul de apă, $V_a \cdot 10^{-2}$ [m ³]	Timpul de umplere, Δt_u [s]	Debitul de apă, $Q_a \cdot 10^{-5}$ [m ³ /s]
3,8824	0,012	4,6588	1525	3,05495

Din analiza efectuată se poate trage concluzia că, în cazul mașinii de tăiat cu jet de apă de tip WUXI YCWJ-380-1520 și utilizând o duză de rubin cu diametrul de 0,25 mm, debitul de apă generat de aceasta este 1,832 l/m.

2.4. Stabilirea parametrilor hidraulici ai mișcării staționare a curgerii prin duza de apă

În calculele hidraulice este necesar să se cunoască parametrii mișcării fluidului din elementele componente ale capului de tăiere. Cel mai important element din calculul acestui studiu îl reprezintă duza de apă, al cărei orificiu este de 0,25mm. Ca prim parametru hidraulic este necesară cunoașterea vitezei medii a apei în secțiunea transversală a duzei de rubin de diametru d_a . Conform [32, 33], expresia acestei viteze este dată de relația (2.3).

$$v_m = \frac{4 \cdot Q_a}{\pi \cdot d_a^2} \quad (2.3)$$

, în care: v_m – viteza medie de curgere a apei [m/s]; Q_a – reprezintă debitul de apă, [m³/s]; d_a – diametrul orificiului de rubin al HPN, [m].

Dacă orificiul duzei de rubin poate fi analizat ca o conductă, atunci se poate calcula pierderea de presiune longitudinală prin aceasta. Indiferent de regimul de curgere, căderea de presiune în cazul analizat este dată de relația (2.4) [32, 33].

$$\Delta p_a = \rho_a \frac{v_m^2}{2} \cdot \frac{l_a}{d_a} \cdot \lambda \quad (2.4)$$

, în care: Δp_a – căderea de presiune în lungul orificiului de rubin [Pa]; l_a – lungimea orificiului prin rubin, [m]; λ – reprezintă coeficient de rezistență hidraulică, [-]. Coeficientul de rezistență hidraulică λ , a fost determinat cu relația lui Nikuradse. Valorile numerice ale parametrilor hidraulici enumerați mai sus, în cazul duzei de apă cu orificiul de 0,25mm, sunt prezentate în tab.2.3.

Tabelul 2.3. Parametrii hidraulici prin duza de apă

Viteza medie a apei, v_m [m/s]	Numărul Reynolds, Re [-]	Coeficient de rezistență hidraulică, λ [-]	Căderea de presiune, $\Delta p_a \cdot 10^5$ [Pa]
622,35	155500	0,062	263,781

2.5. Stabilirea parametrilor hidraulici prin tubul de abraziv

S-a măsurat vacuumul creat de jetul de apă în camera de amestec a capului de tăiere. Conform indicației aparatului de măsură, s-a obținut o presiune vacumetrică de 0,625 kgf/cm², aceasta fiind egală cu 0,613·10⁵ Pa.

În **fig.2.3** este prezentat conturul de viteze prin tubul de amestec al instalației AWJ, obținut în urma simulării CFD. Așa cum se poate observa, valorile maxime însumate ale vitezelor aerului sunt distribuite pe o rază de aproximativ 0,85mm față de axa de simetrie a tubului și sunt cuprinse în intervalul 3,5...3,945 m/s. Forma grafică a distribuției de viteze ale aerului obținute la ieșirea din TA, după direcție verticală și orizontală dirijate, sunt prezentate în **fig.2.4**. Conform analizei adoptate, se observă o distribuție parabolică a acestora în secțiunea de curgere.

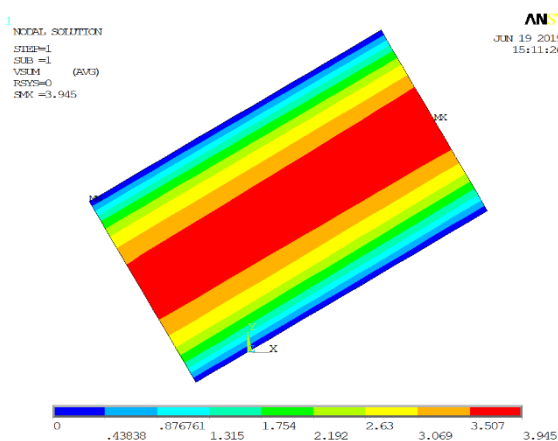


Figura 2.3. Conturul de viteze prin TA

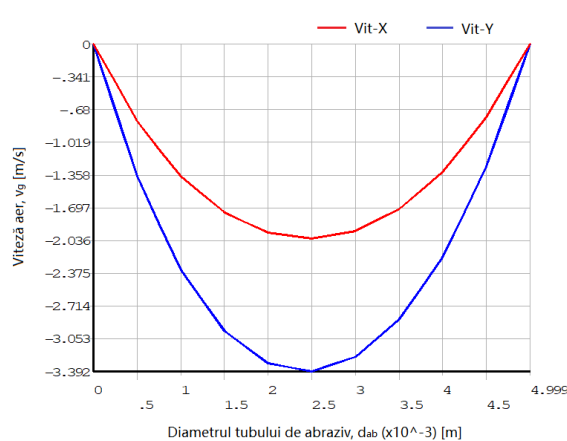


Figura 2.4. Distribuția de viteze prin TA

Valorile parametrilor hidraulici prin tubul de abraziv obținuți în urma determinării cu analiză CFD, sunt prezentați în **tab.2.4**. Valorile vitezelor sunt afișate ca mărime în modul, știind sensul de curgere al fluidului.

Tabelul 2.4. Parametrii hidraulici prin tubul de abraziv

Viteza medie, v_g [m/s]	Viteza medie după axa X, v_{gx} [m/s]	Viteza medie după axa Y, v_{gy} [m/s]	Debitul de aer, Q_g [m ³ /s]	Nr. Reynolds, Re [-]
2,542	2,19	1,289	4,991·10 ⁻⁵	748,96

După cum se poate observa în **tab.2.4**, valoarea numărului Reynolds este mai mică de 2300, ceea ce înseamnă că regimul de curgere prin tubul de abraziv este de tip laminar. Datorită faptului că prin TA circulă și particule solide, este posibil ca acestea să influențeze tipul curgerii.

2.6. Analiza materialului abraziv

În unele încercări teoretice și experimentale de modelare a procesului de prelucrare cu jet de apă este necesar să se cunoască unele caracteristici fizico-chimice ale materialului abraziv. Din acest punct de vedere se va face o analiză chimică a nisipului utilizat la AWJ, utilizând microscopul *Hitachi S3400-N*, ce este un microscop electronic SEM. În **fig.2.5** se prezintă imaginea particulelor, cât și analiza chimică a nisipului.

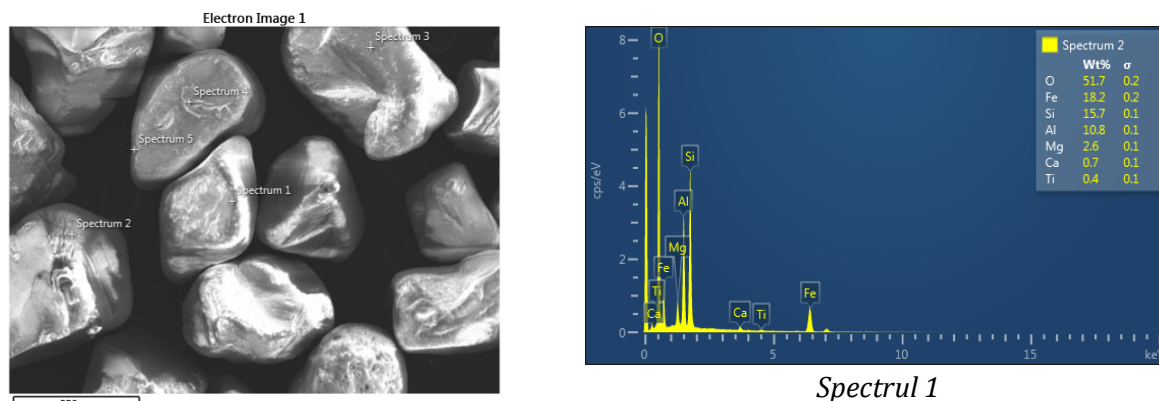


Figura 2.5. Analiza spectrală SEM asupra nisipului abraziv

Compoziția chimică a nisipului abraziv de tip Granat utilizat la mașina de tăiat cu jet de apă este prezentată în **tab.2.5**. Această compoziție chimică a fost reprezentată ținând seama de imaginile analizate, precum și de analizele efectuate în [34].

Tabelul 2.5. Compoziția chimică a nisipului abraziv

Compus chimic	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Conținut [%]	37,20 37,90	27,80 29,85	16,60 18,10	4,70 4,51	4,95 9,48	2,5 3,1	0,05	0,5

Din analiza spectrală prezentată în **fig.2.5**, precum și din datele prezentate în **tab.2.5** se poate trage concluzia că nisipul abraziv este alcătuit în principal din oxid de siliciu (SiO₂) urmat de oxidul de fier III (Fe₂O₃).

Pentru studiul influenței dimensiunii grăunților de nisip asupra proceselor de eroziune din cadrul prelucrării cu jet de apă, este necesară efectuarea granulometriei nisipului și stabilirea gradului de uniformitate al acestuia.

Conform [35], prin granulație medie (M50) se înțelege mărimea teoretică a ochiului sitei prin care trece 50% din cantitatea de nisip evaluată (exclusiv partea levigabilă). Granulația medie M50 a fost determinată din curba cumulativă a granulozității nisipului obținut prin cernere reprezentată în **fig.2.6**.

Gradul de uniformitate se calculează în funcție de granulația medie M50 și este dat de relația (2.5) [35]. Și reprezintă diferența dintre procentul de nisip care trece prin sita 4/3 din M50 și sita 2/3 din M50.

$$GU = \frac{4}{3} M50 - \frac{2}{3} M50 \quad (2.5)$$

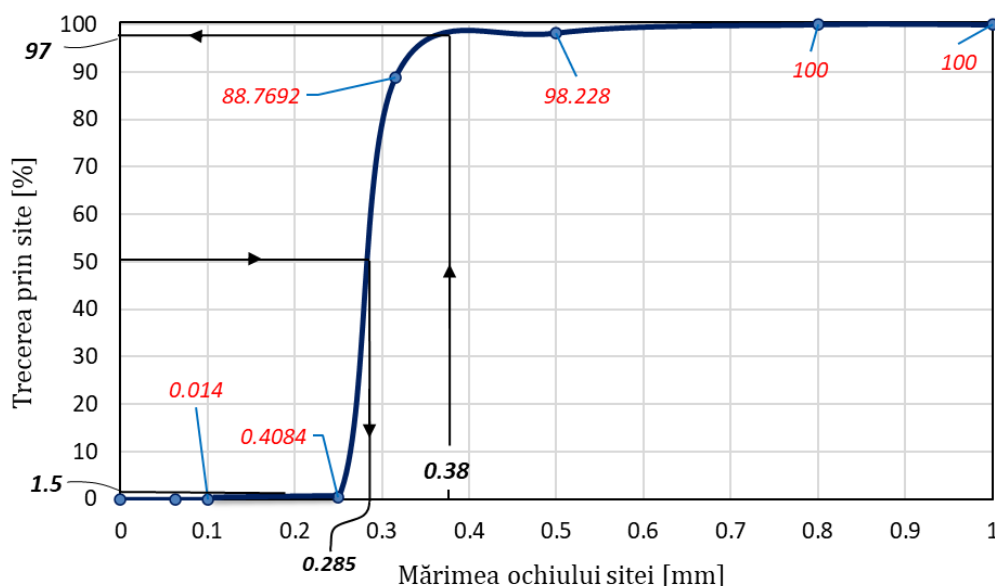


Figura 2.6. Curba cumulativă a granulației nisipului abraziv

Valorile termenilor din relația (2.5) sunt:

$$\frac{4}{3}M50 = \frac{4}{3} \cdot 0,285 = 0,38 \quad (2.6)$$

$$\frac{2}{3}M50 = \frac{2}{3} \cdot 0,285 = 0,19 \quad (2.7)$$

Din curba din [fig.2.6](#) se poate deduce că prin sita cu dimensiunea laturii ochiului de 0,38 mm trece o cantitate de nisip de 97%, iar prin sita cu dimensiunea ochiului de 0,19 mm trece o cantitate de nisip de 2%. Din relația (2.8) se determină valoarea gradului de uniformitate în cazul nisipului analizat:

$$GU = 97 - 2 = 95\% \quad (2.8)$$

Valoarea gradului de uniformitate fiind de 95% se poate concluziona că nisipul de tip Granat utilizat la prelucrarea cu jet de apă este foarte uniform [\[36\]](#).

Forma granulelor abrazive este un factor important în ceea ce privește procesul de eroziune, având influențe diferite și semnificative asupra materialelor supuse eroziunii, precum și a procesului în sine. Expresia analitică pentru calculul factorului de formă conform metodei dezvoltate de Wadell este dată de expresia (2.9) [\[37\]](#).

$$\Psi_i = \frac{A_{Pi}}{A_{Si}} \quad (2.9)$$

, în care: Ψ_i - factor de formă al particulei [-]; A_{Pi} - aria unei particule abrazive măsurată în plan [μm^2]; A_{Si} - aria cercului care înscris particula abrazivă, [μm^2].

Imaginile au fost prelevate pe un eșantion de doisprezece particule, iar trei din aceste imagini sunt prezentate în [fig.2.7](#). Stabilirea ariei suprafeței particulei de nisip (A_{Pi}), precum și aria cercului ce înscris particula (A_{Si}) în planul considerat, s-au realizat folosind imaginile obținute cu ajutorul microscopului, acestea fiind inserate în programul de reprezentare grafică AutoCAD.

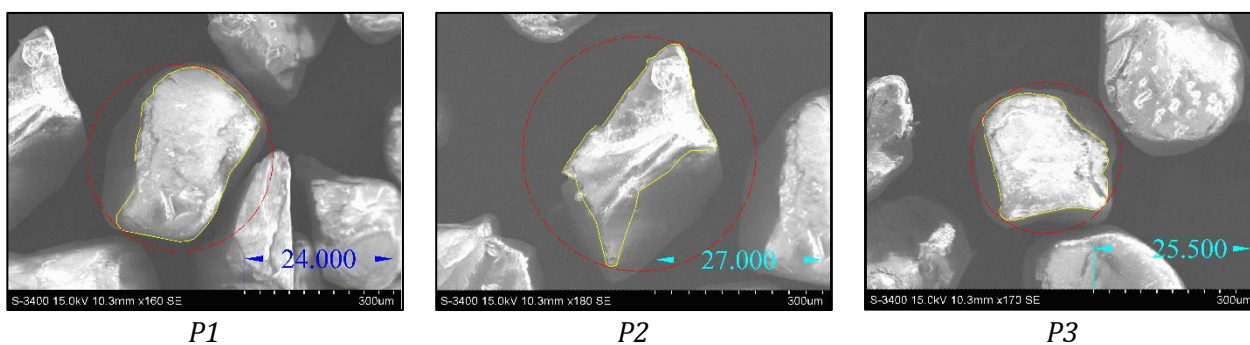


Figura 2.7. Particule de nisip analizate pentru stabilirea factorului de formă

Factorul de formă global ce va intra în simulările cu element finit ale curgerii jetului de apă s-a stabilit ca fiind media aritmetică a factorilor de formă pentru fiecare particulă abrazivă în parte Ψ_{ii} , utilizând relația (2.10).

$$\Psi_i = \frac{\sum_{i=1}^{10}(\Psi_{ii})}{n} = 0,6202 \quad (2.10)$$

În cadrul modelării CFD a curgerii fluidului abraziv, este necesar să se impună unele condiții ce țin de cantitatea de abraziv pe care mașina o generează. În acest sens s-a evaluat debitul de abraziv generat de mașina AWJ tip WUXI YCWJ-380-1520. Variația debitului de nisip în funcție de gradația mașinii este reprezentată în diagrama din **fig.2.8**. Cu ajutorul aplicației Excel a fost posibilă aproximarea acestui debit printr-o curbă teoretică.

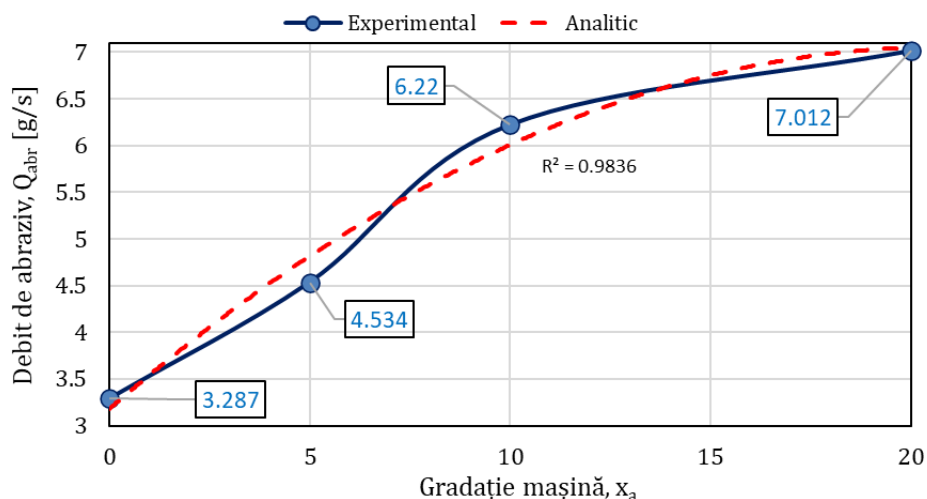


Figura 2.8. Reprezentarea grafică a debitului de abraziv

Curba experimentală se poate aproxima, cel mai precis, cu o curbă teoretică de ordin II având forma matematică dată de relația (2.11). Această aproximare parabolică este valabilă numai în intervalul de gradație 0-20.

$$Q_{abr}(x_a) = -0,0089 \cdot x_a^2 + 0,372 \cdot x_a + 3,1807 \quad (2.11)$$

, în care: Q_{abr} – reprezintă debitul masic de abraziv, [g/s]; x_a - reprezintă numărul diviziunii din gradația mașinii corespunzătoare debitului de abraziv efectiv consumat [-].

2.7. Concluzii

➤ Componentele principale din ansamblul capului de tăiere sunt duza de apă și tubul de amestec. Duza de apă este prevăzută cu un orificiu cu diametru de 0,25mm și o grosime de

0,55mm realizat în masa de rubin sinterizat. Tubul de amestec are diametrul de 0,76mm și este confecționat dintr-un material cu un înalt grad de rezistență la uzură (carbură de wolfram). În urma măsurătorilor s-a adoptat un unghi al conului tubului de amestec de 13grd, iar lungimea activă a tubului (zona cilindrică interioară) rezultând de 68,62mm;

➤ Debitul de apă a fost stabilit prin măsurători executate asupra volumului de apă din cuva mașinii și s-a obținut ca fiind de 1,832 l/min. Cunoscând debitul de apă și elementele geometrice ale secțiunii de curgere s-au calculat parametrii hidraulici ai mișcării staționare în lungul orificiului de rubin al duzei de apă. Acești parametri sunt: viteza medie de curgere a apei având valoarea de 622,35 m/s, regimul de curgere calculat cu criteriul $Re=155500$, precum și căderea de presiune în lungul orificiului de rubin unde s-a obținut valoarea de $263,781 \cdot 10^5$ Pa;

➤ S-a măsurat presiunea vacumetrică pe TA, iar în urma analizei CFD a rezultat o viteză medie a aerului prin acest tub de 2,542 m/s. Distribuția de viteze prin TA este de tip parabolic, fapt confirmat și de valoarea numărului Reynolds corespunzător regimului laminar de curgere;

➤ S-a stabilit Compoziția chimică a materialului abraziv rezultând că acesta are în componență SiO_2 în procent de 37% urmat de Fe_2O_3 în proporție de 27% și oxid de aluminiu cu 16%, acestea din urmă dau culoarea roșiatică a nisipului. Dimensiunea medie a granulei de nisip este de 0,285mm, aceasta fiind obținută în urma rezultatelor obținute prin metoda granulometrică;

➤ În urma analizei granulometrice a nisipului abraziv, s-a obținut dimensiunea medie $M50=0,285$ mm. Dimensiunile grăunților de nisip sunt în principal cuprinse în intervalul 0,19...0,38 mm. Granulațiile de 0,285 și limitele de 0,19mm, respectiv 0,38mm au fost utilizate în cadrul analizei procesului de eroziune.

➤ Factorul de formă al particulelor abrazive a fost stabilit folosind metoda Wadell de raportare a suprafeței vizibile a particulei la aria cercului circumscris particulei. În urma analizei efectuate a rezultat un factor de formă $\Psi_f=0,6202$;

➤ Debitul de abraziv a fost stabilit prin încercări experimentale în funcție de gradația controllerului mașinii, în intervalul de diviziuni cuprins între 0 -20. Debitul de abraziv generat de mașină în acest interval de diviziuni are valori cuprinse între 3,287...7,012 g/s, iar legea de variație poate fi descrisă de o parabolă dată de relația (2.11).

CAPITOLUL 3

STUDIU TEORETIC ASUPRA FENOMENULUI PRELUCRĂRII AWJ

3.1. Analiza curgerii apei prin orificiul de rubin al duzei de înaltă presiune

• **Studiul curgerii apei prin metoda analitică.** În studiul mișcării turbulente printr-o conductă de secțiune circulară se ține cont de frecarea care apare între fluid și perețele conductei, introducându-se noțiunea de viteză de frecare, dată de relația (3.1) [32, 38].

$$v_f = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho_a}} = 27,59 \frac{m}{s} \quad (3.1)$$

, în care: τ_p – reprezintă tensiunea tangențială la perețele orificiului de rubin [Pa]; ρ_a – reprezintă densitatea apei [kg/m³]. La viteze mari de curgere, valoarea medie a efortului unitar tangențial la perete se poate determina, conform [39], utilizând relația (3.2).

$$\tau_p = 0,5 \cdot \rho_m \cdot f_f \cdot v_m^2 = 7,6 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (3.2)$$

Cunoscând valoarea vitezei de frecare se poate defini o lungime de referință dată de relația (3.3) [32], cu ajutorul căreia se pot scrie legile de distribuție ale vitezelor, precum și mărimea intervalelor zonelor de curgere.

$$y_f = \frac{\mu_a}{\sqrt{\rho_a \cdot \tau_p}} = 3,653 \cdot 10^{-8} \text{ m} \quad (3.3)$$

Grosimile straturilor de curgere în regim turbulent, precum și valorile vitezelor pe aceste intervale obținute pe cale analitică, în cazul duzei de înaltă presiune cu orificiul de rubin de 0,25 mm utilizată la mașina de debitat cu jet de apă tip WUXI YCWJ-380-1520, sunt prezentate în **tab.3.1**.

Tabelul 3.1. Caracteristicile curgerii turbulente prin duza de apă

Tipul stratului	Interval limite strat [mm]		Viteza maximă [m/s]
	Inferioară	Superioară	
Substrat vâscos	0	$1,812 \cdot 10^{-4}$	136,61
Stratul intermediar	$1,812 \cdot 10^{-4}$	$1,087 \cdot 10^{-3}$	455
Stratul complet turbulent	$1,087 \cdot 10^{-3}$	$1,812 \cdot 10^{-2}$	562,33
Miezul turbulent	$1,812 \cdot 10^{-2}$	0,125	636,43

Se observă că limita inferioară a miezului turbulent al mișcării se află la distanța de 0,01812mm de perețele orificiului de rubin. Dacă am considera faptul că zona a patra de curgere începe la aproximativ 15% din raza duzei (măsurată de la perete), atunci acest strat are o grosime de 0,01875mm de perețele orificiului de rubin al duzei. Diferența dintre aceste valori este de $6,3 \cdot 10^{-4}$ mm, aceasta fiind comparabilă cu lungimea de referință y_f .

În diagrama din **fig.3.1** este reprezentată variația vitezei medii prin orificiul duzei de apă în funcție de grosimile fiecărui strat, obținute pe cale analitică. Curba teoretică are o

alură acceptabilă ($R^2=0,9277$) pentru valori ale vitezei în stratul intermediar cuprinse între 445...465 m/s.

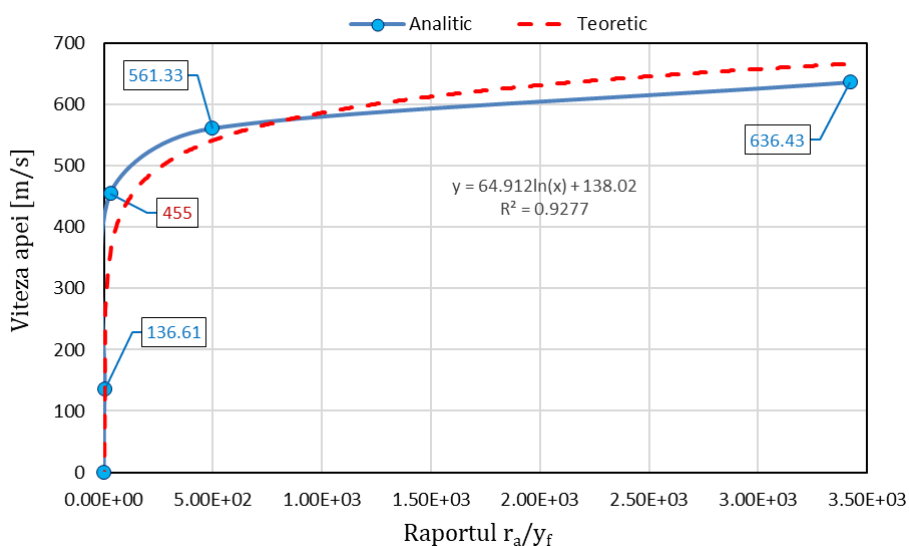


Figura 3.1. Legea de variație a vitezei apei prin duza de rubin obținută pe cale analitică

Același lucru se poate spune și despre curba obținută pe cale teoretică, a cărei ecuație este reprezentată pe diagramă. Dacă împărțim această ecuație la viteza de frecare (v_f) se obține legea de repartiție a vitezei în secțiunea orificiului de rubin, dată de relația (3.4).

$$\frac{v}{v_f} = 2,352 \cdot \ln(x) + 5,002 \quad (3.4)$$

Prin analogie cu relația vitezei în stratul logaritmic, se pot identifica constantele din ecuație ca fiind: $A=2,352$ și $B=5,002$.

- **Studiul curgerii apei prin metoda analitică.** Studiul curgerii prin orificiul de rubin în cadrul analizei CFD s-a făcut folosind Ansys FLOTTRAN-CFD, iar elementul de analiză fiind FLUID141. După cum se poate observa, presiunea la intrarea în duza de apă nu este constantă. Graficul din [fig.3.2](#) indică o variație neliniară a presiunii la intrare pe o distanță de 0,1125mm de la axa de simetrie cu o diferență de presiune de $24,708 \cdot 10^5$ Pa, iar pe intervalul de la 0,1125mm până la peretele duzei se poate observa o distribuție aproximativ uniformă.

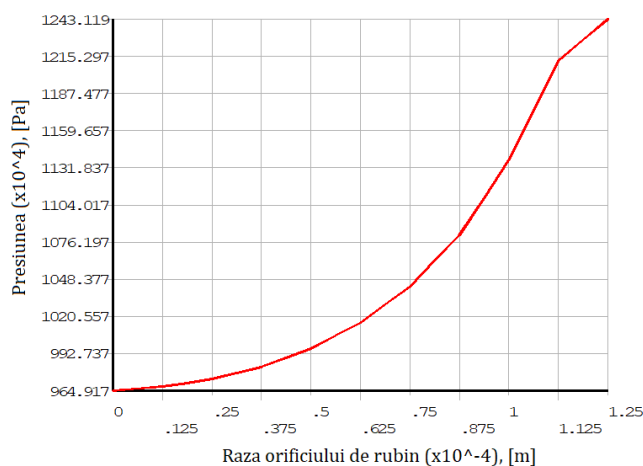


Figura 3.2. Distribuția presiunii apei la intrarea în duza de rubin

În diagrama din **fig.3.3** este reprezentată variația vitezei apei la ieșirea din orificiul de rubin obținută prin analiza CFD.

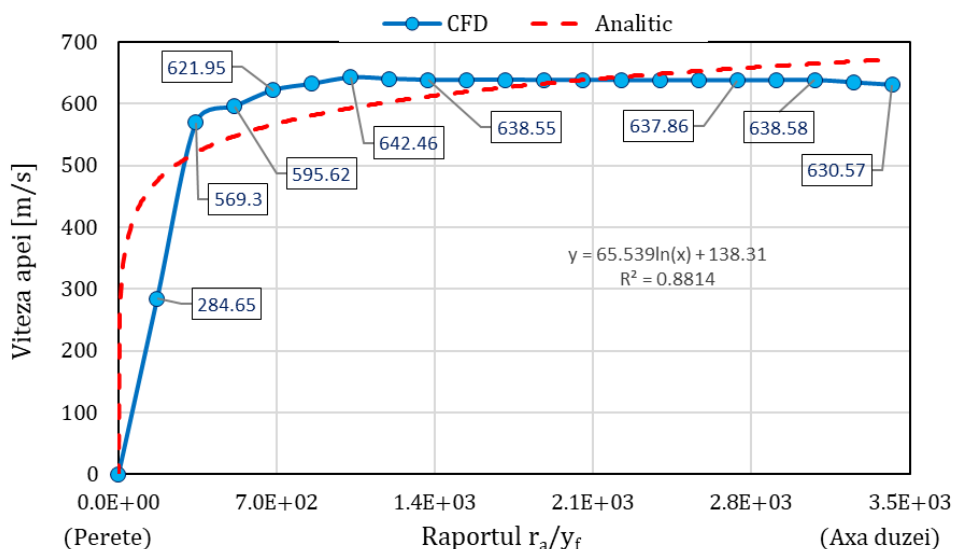


Figura 3.3. Curbele de variație ale vitezei apei la ieșirea din duza de rubin folosind Ansys Flotran-CFD

Prin comparare cu diagrama analitică din **fig.3.1** se observă o valoare a vitezei apropiată de aceasta (578,91 m/s) la distanța de 0,018 mm de peretele duzei, adică la sfârșitul stratului complet turbulent. Legea teoretică de repartiție a vitezei este una logaritmică, a cărei expresie dată de relația (3.5). La fel ca și în cazul anterior, se pot identifica constantele A și B, ca fiind: A=2,375 și B=5,013.

$$\frac{v}{v_f} = 2,375 \cdot \ln(x) + 5,013 \quad (3.5)$$

3.2. Analiza 2D a curgerii prin capul de tăiere al mașinii AWJ

În această parte a studiului se face o analiză 2D a curgerii apei prin elementele active ale capului de tăiere din componența mașinii AWJ din dotarea departamentului IMN din UPG Ploiești. Pentru această analiză s-au considerat trei game de dimensiuni ale orificiului duzei de apă și ale tubului de amestec, prezentate în **tab.3.2**, conform specificațiilor oferite de producător [40]. O parte din analiza prezentată în acest subcapitol este prezentată în [41].

Tabelul 3.2. Dimensiunile orificiilor capului de tăiere

Diametrul orificiului de rubin, d_a [mm]	Diametrul tubului de amestec, d_t [mm]	Viteza medie prin orificiul de rubin, v_m [m/s]
0,20	0,76	972,40
0,25	0,90	622,35
0,30	1,02	432,18

Valorile vitezelor în zona adiacentă duzei de rubin pentru cele trei dimensiuni analizate sunt prezentate în **tab.3.3**. Această caracteristică grafică influențează natura difuză a curgerii jeturilor, aceasta ducând la variația tensiunilor Reynolds normale și de forfecare în secțiunea de curgere a jetului.

Tabelul 3.3. Vitezele caracteristice prin duzele de apă

Diametrul orificiului, d_a [mm]	0,20	0,25	0,30
Viteza apei în axa de simetrie, v_{ax} [m/s]	996,35	623,38	423,64
Viteza de vârf, v_{pk} [m/s]	1051,7	641,46	443,92
Distanța de la axă a v_{pk} , [mm]	0,020	0,050	0,090
Viteza maximă a apei, [m/s]	1108	726,206	563,308

Modelarea curgerii prin cele trei dimensiuni adoptate ale tubului de amestec s-a realizat în două moduri: cu intrarea blocată a tubului de acces a materialului abraziv și cu intrarea liberă prin tubul de abraziv.

- **Intrarea blocată prin tubul de abraziv.** În cadrul acestei analize s-au blocat gradele de libertate (DOF) după linia de intrare a materialului abraziv în camera de amestec. În **fig.3.4** este prezentat conturul de viteze în cazul simulării curgerii folosind duza de presiune cu diametrul de 0,25mm și tubul de amestec de 0,76mm.

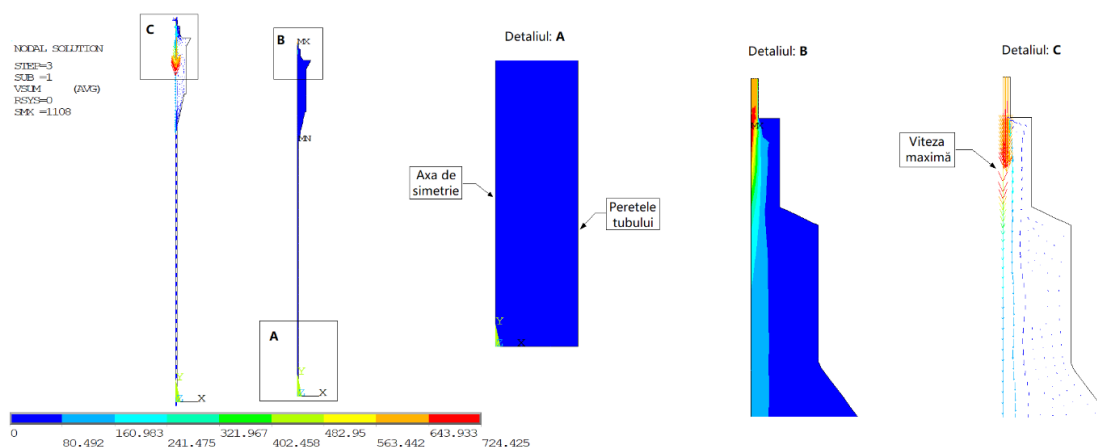


Figura 3.4. Conturul de viteze în cazul TA blocat

Valorile numerice ale vitezelor de curgere la ieșirea din MT în cazul TA blocat, pentru cele trei dimensiuni adoptate ale diametrelor (d_t), sunt prezentate în **tab.3.4**. Grosimea stratului de perete s-a determinat în funcție de punctul în care graficul de viteze își schimbă semnificativ panta.

Tabelul 3.4. Caracteristicile de curgere în cazul TA blocat

Diametrul MT, d_t [mm]	0,76	0,90	1,02
Grosimea stratului de perete, [mm]	0,133	0,158	0,179
Viteza maximă, v_{max} [m/s]	83,824	59,847	46,636
Viteza medie CFD, v_{CFD} [m/s]	65,041	46,398	36,134
Viteza medie teoretică, v_{th} [m/s]	67,343	48,021	37,38
Eroare vitezelor, ε_r [%]	3,41	3,37	3,33
Nr. Reynolds, Re	3015,9	2546,78	2246,76

- **Intrarea liberă prin tubul de abraziv.** În cadrul acestei analize s-a luat în considerare faptul că fluidul din mediul de abraziv intră în camera de amestec cu același debit, indiferent de dimensiunile duzelor adoptate. Deoarece, construcția capului de tăiere

este nesimetrică, s-a făcut ipoteza că fluidul abraziv intră în camera de amestec print-o suprafață laterală generată de intrarea TA. Forma grafică a distribuției vitezelor apei prin orificiile adoptate ale MT este asemănătoare cu cele analizate în cazul TA blocat, cu excepția valorilor acestora, după cum se arată în **fig.3.5**. Caracteristicile de curgere rezultate în urma analizei CFD prin elementele active ale capului de tăiere, în cazul deblocării circuitului TA, sunt prezentate în **tab.3.5**.

Tabelul 3.5. Caracteristicile de curgere în cazul TA liber

Diametrul MT, d_t [mm]	0,76	0,90	1,02
Viteza medie CFD, v_{CFD} [m/s]	169,553	120,947	94,186
Viteza maximă, v_M [m/s]	217,57	155,31	121,01
Nr. Reynolds, Re	$1,276 \cdot 10^5$	$1,078 \cdot 10^5$	$0,951 \cdot 10^5$
Tensiunea tangențială la perete, τ_p [Pa]	$5,895 \cdot 10^4$	$3,115 \cdot 10^4$	$1,943 \cdot 10^4$
Viteza de frecare, v_f [m/s]	7,685	5,586	4,412
Lungimea de referință, y_f [m]	$1,314 \cdot 10^{-7}$	$1,808 \cdot 10^{-7}$	$2,289 \cdot 10^{-7}$

Pentru a scoate în evidență fenomenul de amplificare produs de ansamblul CH cu ajutorul circuitului TA, s-a introdus noțiunea de factor de amplificare (c_a), atât în cazul vitezei medii, cât și în cazul vitezei maxime. Expresiile acestora sunt date de relațiile (3.6) și (3.7).

$$c_{a,m} = \frac{v_{m,BL}}{v_{m,DBL}} = 2,606 \quad (3.6)$$

$$c_{a,M} = \frac{v_{M,BL}}{v_{M,DBL}} = 2,595 \quad (3.7)$$

În **fig.3.6** este reprezentată grafic distribuția vitezelor apei la ieșirea din CH, în cazul tubul de amestec cu diametrul de 0,76mm, în funcție de raportul dintre raza tubului și lungimea de referință. Așa cum se poate observa, forma grafică a distribuției vitezelor CFD este specifică curgerii turbulente, fapt demonstrat și de valoarea numărului Re.

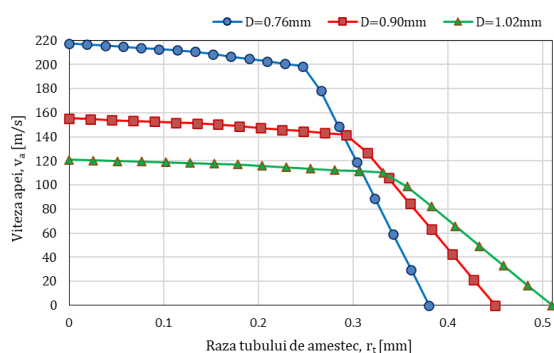


Figura 3.5. Variația vitezei apei prin MT în cazul TA liber

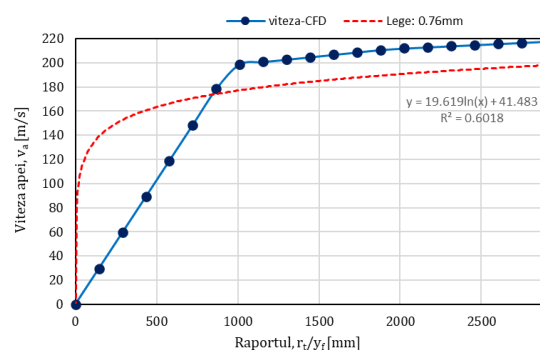


Figura 3.6. Variația vitezei apei prin MT cu diametrul 0,76mm

Legea de repartiție a vitezelor apei în secțiunea transversală a tubului este dată de relația (3.8), iar prin analogie cu legea logaritmică ce descrie mișcarea turbulentă, se pot identifica constantele: $A=2,552$ și $B=5,397$.

$$\frac{v}{v_f} = 2,552 \cdot \ln(x) + 5,397 \quad (3.8)$$

3.3. Analiza teoretică a eroziunii elementelor active din componența mașinii de prelucrat cu jet de apă tip YCWJ-380-1520

În această parte a studiului se face o analiză tridimensională a curgerii fluidului abraziv prin elementele active ale mașinii de debitat cu jet de apă tip WUXI YCWJ-380-1520, utilizând programul de tip CFD din Ansys-Fluent. Rezultatele obținute în urma analizei CFD a eroziunii produse de particulele cu diametrele de (0,19; 0,285; 0,38)mm asupra componentelor active ale mașinii de debitat cu jet de apă tip WUXI YCWJ-380-1520 sunt prezentate în **tab.3.6**.

Tabelul 3.6. Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,19 mm

Gradație mașină, x_a	0	5	10	15	20
Rata de eroziune, ER_{19} ($\times 10^{-6}$) [kg/m ² ·s]	1,092276	1,308244	1,493233	1,652131	2,022878
Rata de eroziune, ER_{285} ($\times 10^{-6}$) [kg/m ² ·s]	2,456068	2,955192	4,456159	5,524016	6,119593
Rata de eroziune, ER_{38} ($\times 10^{-6}$) [kg/m ² ·s]	3,646755	5,465438	6,715589	6,495351	7,123866

În imaginile prezentate în **fig.3.7** se observă că valorile maxime ale ratei de eroziune apar în două puncte izolate situate la intrarea în zona conică a tubului de amestec, iar valorile minime apar către periferiile acestor două zone.

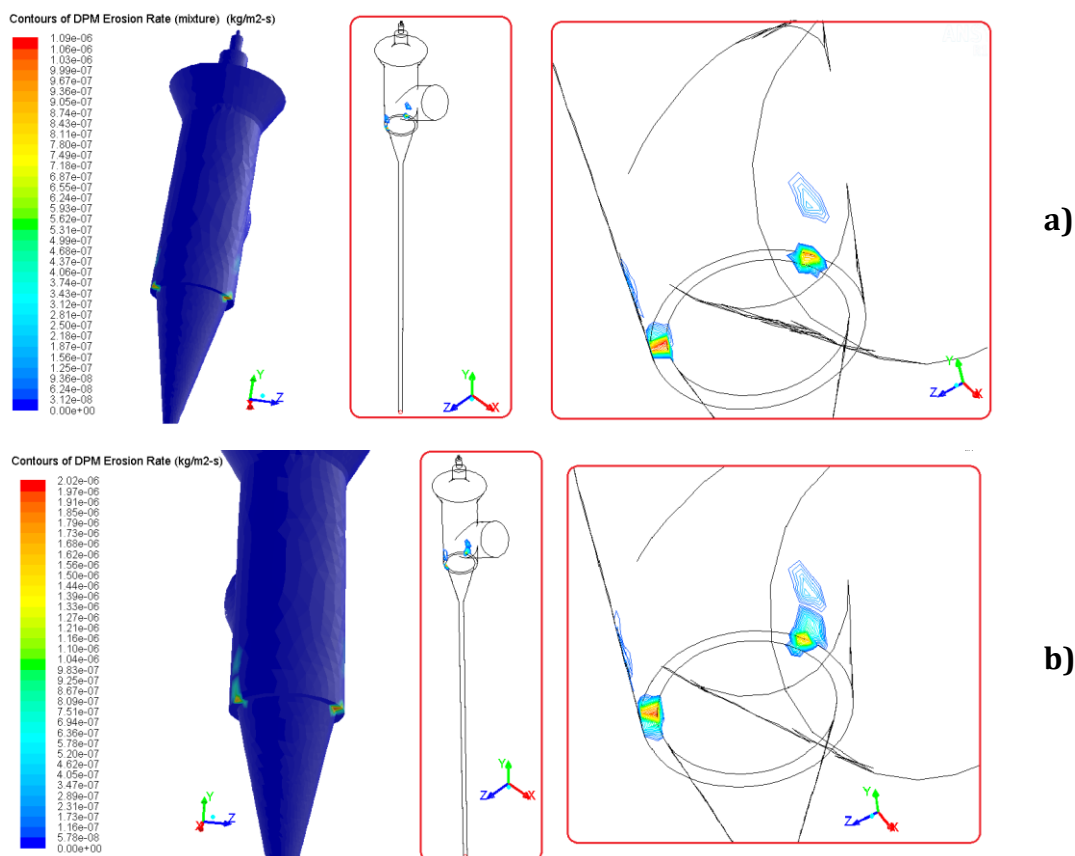


Figura 3.7. Eroziunea produsă de particulele cu diametrul 0,19mm: (a) – gradația $x_a=0$; (b) – gradația $x_a=20$

În diagramele din **fig.3.8**, **fig.3.9** și **fig.3.10** este reprezentată variația ratei de eroziune în funcție de debitul de abraziv pentru cele trei dimensiuni de particule, obținute în urma simulării CFD.

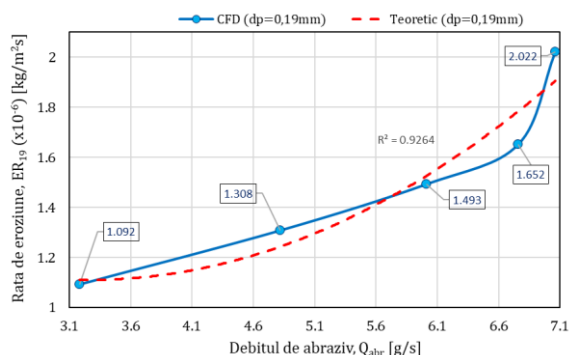


Figura 3.8. Graficul ER produsă de particulele cu diametrul 0,190 mm

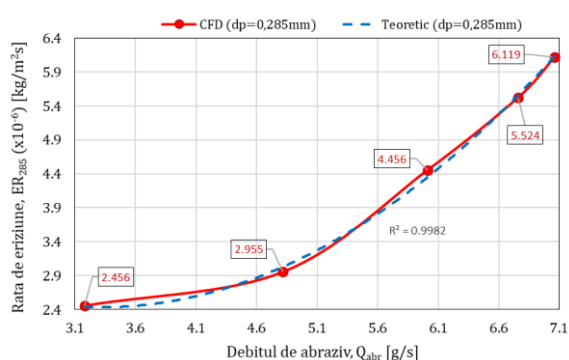


Figura 3.9. Graficul ER produsă de particulele cu diametrul 0,285 mm

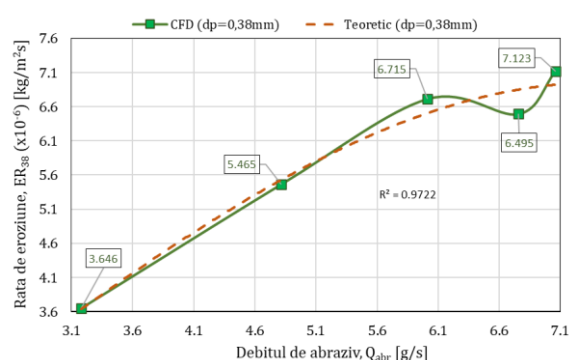


Figura 3.10. Graficul ER produsă de particulele cu diametrul 0,380 mm

Legile de variație ale ratei de eroziune obținută în urma simulării CFD a curgerii prin elementele active ale mașinii AWJ tip WUXI YCWJ-380-1520, sunt date de relațiile (3.9), (3.10) și (3.11).

$$ER_{19} = 0,0553 \cdot Q_{abr}^2 - 0,3612 \cdot Q_{abr} + 1,7004 \quad (3.9)$$

$$ER_{285} = 0,2635 \cdot Q_{abr}^2 - 1,7467 \cdot Q_{abr} + 5,3282 \quad (3.10)$$

$$ER_{38} = -0,0173 \cdot Q_{abr}^3 + 0,1218 \cdot Q_{abr}^2 + 1,0221 \cdot Q_{abr} - 0,2904 \quad (3.11)$$

, în care: ER_{19} , ER_{285} , ER_{38} – reprezintă rata de eroziune produsă de particulele cu diametrul mediu de 0,19mm, 0,285mm, respectiv 0,38mm, [kg/m²s]; Q_{abr} – reprezintă debitul de abraziv al mașinii în intervalul de diviziuni 0-20, [g/s].

3.4. Analiza CFD a jetului de apă liber

Se urmărește un studiu al formei jetului de apă liber generat de mașina de tăiat cu apă de tip WUXI YCWJ-380-1520, precum și scoaterea în evidență a zonelor de influență ale acestora. Conturul câmpului de viteze ale jetului de apă pe o distanță duză-piesă de 70mm este reprezentat în **fig.3.11**. În această imagine se poate observa că viteza maximă a fluidului are valoarea de 213,2 m/s și apare în centrul axei de simetrie a tubului de amestec. Zona principală a unui jet de apă liber este chiar zona din mijlocul acestuia, numită și zonă centrală sau miezul jetului, după cum se arată în **fig.3.12**.

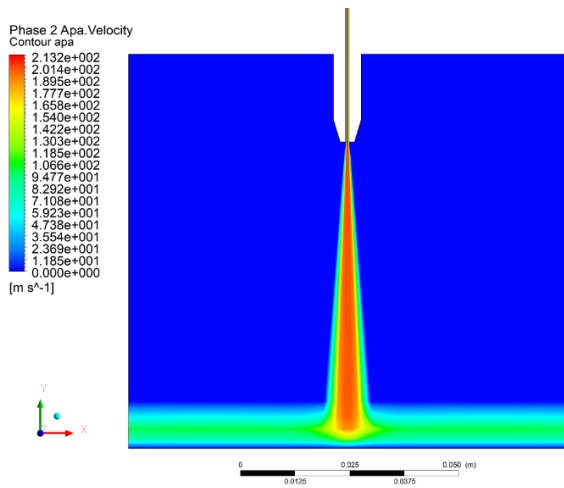


Figura 3.11. Conturul vitezelor jetului de apă liber

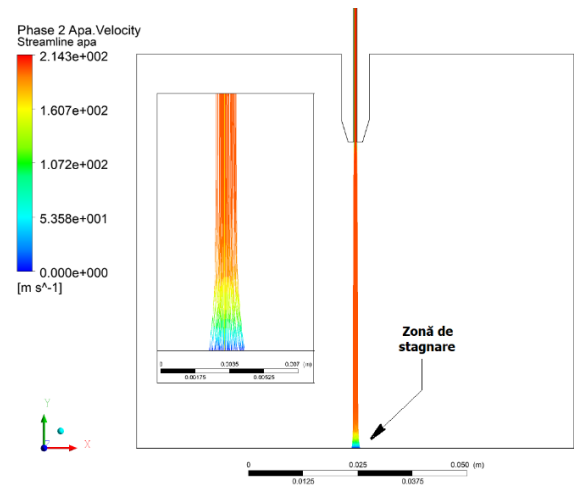


Figura 3.12. Liniile de curent ale jetului de apă liber

Pentru a cunoaște influențele jetului de apă asupra materialului analizat, este necesar să se stabilească zonele de influență pe care acesta le are din punct de vedere al extinderii jetului de la axa de simetrie. După cum se observă în [fig.3.13](#) jetul de apă plan analizat prezintă două zone principale de influență delimitate de cele două grafice din diagramă.

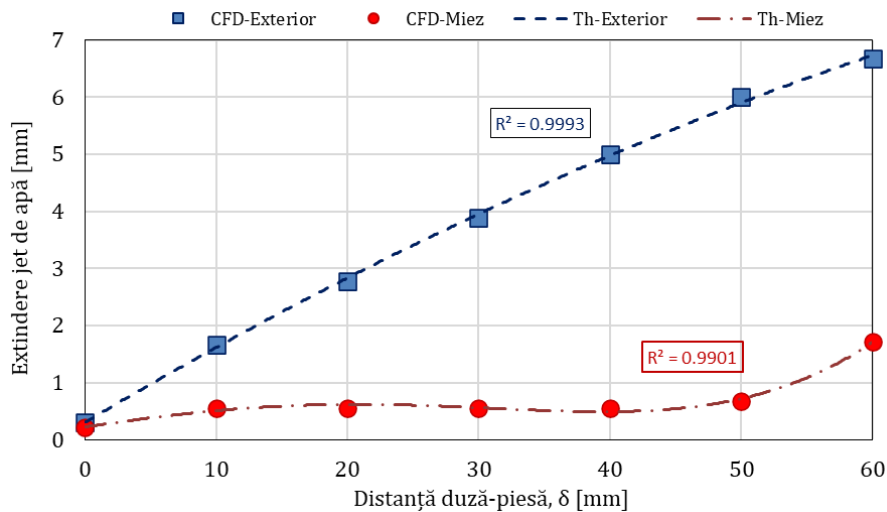


Figura 3.13. Extinderea jetului de apă liber

Prima zonă de influență a jetului de apă este zona centrală și are o influență puternică asupra prelucrării materialelor, deoarece aceasta formează structura "solidă" a jetului. o lege polinomială de ordin IV dată de relația (3.12). A doua zonă de influență apare la periferia jetului și este caracterizată de o variație semnificativă a vitezei. Legea de variație a extinderii jetului în zona periferică poate fi asimilată cu o parabolă, a cărei ecuație este dată de relația (3.13), valabilă pe distanța duză-piesă de 60mm.

$$E_{mz} = (6 \cdot 10^{-7}) \cdot \delta^4 - (4 \cdot 10^{-5}) \cdot \delta^3 - (2 \cdot 10^{-4}) \cdot \delta^2 + 0,0334 \cdot \delta + 0,2225 \quad (3.12)$$

$$E_{ex} = -(5 \cdot 10^{-4}) \cdot \delta^2 + 0,136 \cdot \delta + 0,3043 \quad (3.13)$$

, în care: E_{mz} - reprezintă extinderea jetului în zona centrală măsurată de la axa de simetrie a acestuia [mm]; E_{ex} - este extinderea jetului în zona exterioară [mm]; δ - reprezintă distanța măsurată de la fața duzei [mm].

3.5. Concluzii

➤ Deoarece regimul de curgere prin orificiul duzei de rubin este turbulent, studiul analitic s-a făcut ținând cont că în secțiunea transversală a duzei apar patru zone de curgere măsurate de la perete la axa de simetrie, grosimile acestor straturi, precum și vitezele medii obținute au fost determinate. Legea logaritmică determinată în cadrul analizei analitice are constantele $A=2,352$ și $B=5,002$ (relația 3.4);

➤ Studiul curgerii prin duza de apă din cadrul analizei CFD s-a făcut utilizând modulul Flotran-CFD din Ansys, iar ca tip de element s-a folosit Fluid141. Căderea de presiune obținută în cadrul acestei simulări prezintă două valori: în axa de simetrie este de 9,649MPa, iar la peretele duzei are valoarea de 12,431 MPa. Legea de distribuție a vitezelor medii de curgere obținută în acest caz este una de tip logaritmic (relația 3.5), iar coeficienții acestei ecuații au valorile $A=2,375$ și $B=5,013$;

➤ Din analiza 2D a curgerii prin elementele active ale instalației AWJ utilizând metoda CFD din Ansys, s-au formulat următoarele observații:

- Cele mai mari valori ale vitezei apei s-au obținut în cazul HPN cu diametrul de 0,2mm, aceasta fiind în jurul valorii valori de 1100 m/s;
- Din analiza curgerii prin tuburi în situațiile TA blocat/liber se observă o creștere a vitezelor apei în cazul TA liber cu un factor de amplificare de 2,606 în cazul vitezei medii și 2,595 în cazul vitezei maxime;
- În cazul tubului de amestec cu diametrul de 0,76mm (dimensiune uzuală pentru mașina tip *WUXI YCWJ-380-1520*) s-a obținut viteza medie a apei la ieșire de 170m/s, iar cea maximă în jurul valorii de 217m/s;
- S-au stabilit coeficienții și legea de distribuție ai vitezelor în secțiunea transversală a MT cu diametrul de 0,76mm (relația 3.8).

➤ Estimarea ratei de eroziune s-a făcut în funcție de debitul de abraziv considerând trei dimensiuni medii ale particulelor de nisip (0,19mm; 0,285mm; 0,38 mm), utilizând Ansys Workbench. În cazul ER produse de particulele cu diametrul de 0,19mm s-au obținut valori de $(1,09...2,022) \cdot 10^{-6}$ kg/m²s, iar legea de distribuție poate fi reprezentată printr-o parabolă (relația 3.9). În cazul particulelor de nisip cu diametrul de 0,285mm legea de distribuție a ER poate fi exprimată printr-o lege parabolică (relația 3.10), iar în cazul particulelor cu diametrul de 0,38mm ER poate fi exprimată printr-o lege polinomială de ordin III (3.11);

➤ În cadrul studiului jetului de apă liber s-a realizat modelul geometric 2D, considerându-se o distanță duză-piesă de 70mm și viteza de intrare a apei de 200 m/s. În urma simulării s-au observat:

- Zona centrală jetul de apă liber prezintă o extindere uniformă în intervalul duză-piesă cuprins între 10mm și 50mm de la ieșirea din MT, valoarea medie a razei jetului fiind de 0,556mm măsurată de la axa de simetrie. Extinderea jetului în această zonă se face după o lege polinomială de ordin IV (relația 3.12);
- Zona periferică este caracterizată de o extindere relativ mare a jetului liber cu valori cuprinse între 0,3mm la ieșirea din tub și 6,67mm în apropierea peretelui țintă. În această zonă viteza crește rapid de la valoarea zero la cea maximă, iar legea de extindere a acestei zone variază după o lege parabolică (relația 3.13).

CAPITOLUL 4

CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA PRELUCRĂRII PRIN AWJ A MATERIALULUI P275NL2

4.1. Proiectarea încercărilor experimentale de prelucrare AWJ

Ținând cont de capacitățile și caracteristicile mașinii AWJ tip WUXI YCWJ-380-1520, precum și de caracteristicile materialului prelucrat (oțel nealiat), s-a adoptat ca forma geometrică a piesei supuse încercărilor experimentale, schița prezentat în **fig.4.1**.

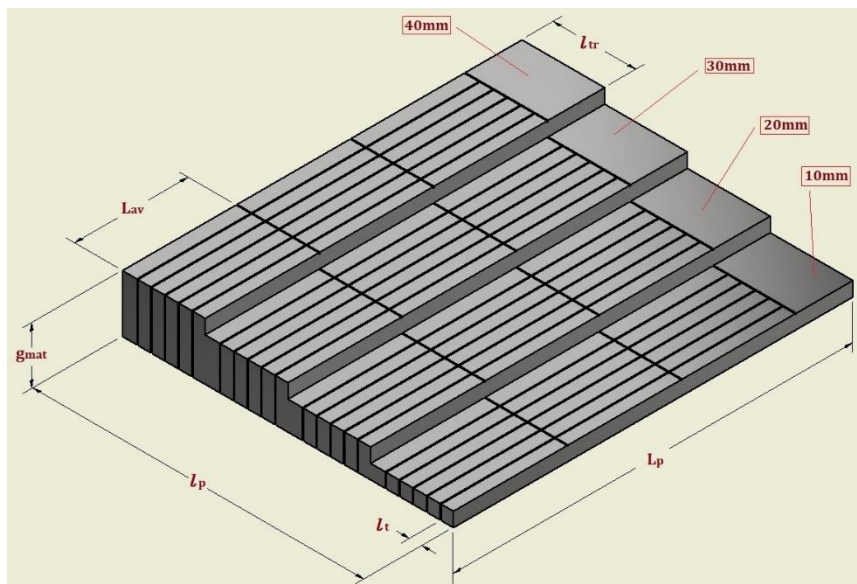


Figura 4.1. Schița piesei evaluată experimental prin AWJ

Pentru a scoate în evidență efectele parametrilor tehnologici ai procedurii AWJ asupra caracteristicilor materialului prelucrat, precum și efectele jetului de apă asupra tăieturilor, s-au adoptat ca parametri de lucru mărimile prezentate în **tab.4.1**.

Tabelul 4.1. Parametrii tehnologici utilizați la încercările experimentale

Grosimea trepte de material g_{mat} , [mm]:	4 trepte: 10; 20; 30; 40
Distanța duză-piesă δ , [mm]:	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
Avansul de lucru f , [mm/min]:	4; 6; 9
Lungimea prelucrată cu o treaptă de avans L_{av} , [mm]:	80

4.2. Cercetări experimentale privind evaluarea caracteristicilor microgeometrice ale suprafețelor prelucrate

Pentru determinarea caracteristicilor microgeometrice ale suprafețelor s-a utilizat profilometrul de tip SURTRONIC 3+, valorile obținute fiind prelucrate cu ajutorul programului TalyProfile Lite 2.1. Datorită multitudinii parametrilor furnizați de acest program, s-au luat în considerare numai parametrii ce țin de devierea medie aritmetică X_a , înălțimea totală a profilului microasperităților X_t și înălțimea maximă a acestora X_z , în cazul rugozității (R) și al ondulației (W) măsurate pe lungimea suprafeței considerate. Pe fiecare

suprafață a tăieturii s-au identificat trei zone distincte. Aceste zone sunt: zona superioară (S), situată la intrarea jetului în material; zona inferioară (J), situată la ieșirea jetului din material; zona centrală (C) situată între celelalte două.

S-au realizat reprezentările grafice ale parametrilor de profil (Ra , Rt , Rz , Wa , Wt , Wz) în funcție de parametrii de lucru. În **fig.4.2** și **fig.4.3** sunt prezentate două variații ale acestor parametrii, în cazul rugozității (R) și al ondulației (W).

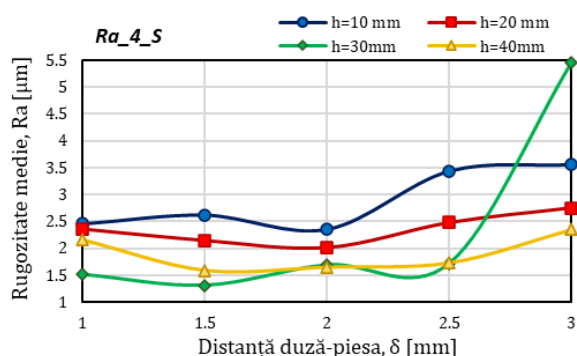


Figura 4.2. Rugozitatea medie Ra , avans $4\text{mm}/\text{min}$, zona superioară a tăieturii [42]

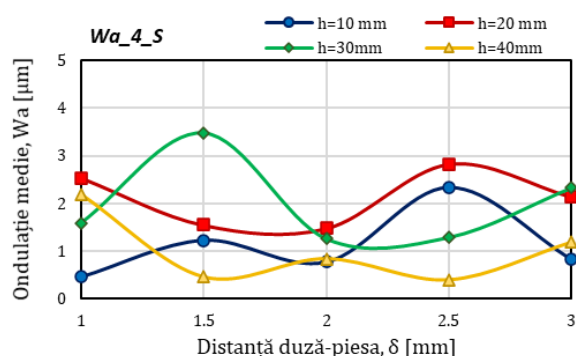


Figura 4.3. Ondulația medie Wa , avans $4\text{mm}/\text{min}$, zona superioară a tăieturii

Valoarea minimă în cazul rugozității medii Ra este de $1,31\ \mu\text{m}$ și a fost obținută în cazul (Ra , $f=4\ \text{mm}/\text{min}$, sup.), iar cea maximă este de $10,3\ \mu\text{m}$ și este dată de graficul din (Ra , $f=9\ \text{mm}/\text{min}$, inf.), la prelucrarea grosimii de 30mm a materialului. Valoarea maximă a ondulației medii Wa s-au obținut și în acest caz la prelucrarea treptei de grosime de 30mm și este de $13,9\ \mu\text{m}$, iar cea minimă este de $0,407\ \mu\text{m}$ obținută în cazul prelucrării treptei de grosime de 40mm .

4.3. Evaluarea analitică a parametrilor de profil pentru materialul analizat

Deoarece, atât rugozitatea medie, cât și ondulația suprafețelor diferă pe grosimea materialului prelucrat, pentru simplificarea analizei s-a adoptat o medie a acestor două mărimi reprezentată de media aritmetică a valorilor obținute pe zonele suprafețelor tăieturilor, prelucrate cu avansurile de lucru și distanțele duză-piesă considerate. Această medie este dată de relația (4.1).

$$Xa^* = \frac{\sum Xa_i}{n} \quad (4.1)$$

, în care: Xa^* - reprezintă valoarea medie a mărimii analizate (Ra^* sau Wa^*) pe suprafața tăieturii [μm]; Xa - reprezintă valoarea rugozității sau a ondulației medii în zona măsurată [μm]; n_z - reprezintă numărul de zone măsurate de pe suprafața tăieturii. În cazul grosimii de 10mm a materialului $n_z=2$, iar pentru restul grosimilor prelucrate $n_z=3$.

Din **fig.4.4** se observă că rugozitatea medie în lungul tăieturii urcă până la valoarea $2,81\ \mu\text{m}$ după care scade până la valoarea minimă de $2,54\ \mu\text{m}$, după care aceasta are o creștere până la valoarea de $2,99\ \mu\text{m}$ în cazul distanței de 3mm dintre duză și piesă. În cazul ondulației medii pentru avansul de $4\text{mm}/\text{min}$ prezentată în **fig.4.5** se poate observa că aceasta are o creștere bruscă până la valoarea de $1,7$ pe intervalul de distanță ($1\text{...}1,5\text{mm}$

dintre duză și piesă, după care aceasta are o variație relativ lină pe restul intervalului, atingând valoarea maximă de 1,89 la distanța de 2,5mm dintre duză și capul de tăiere.

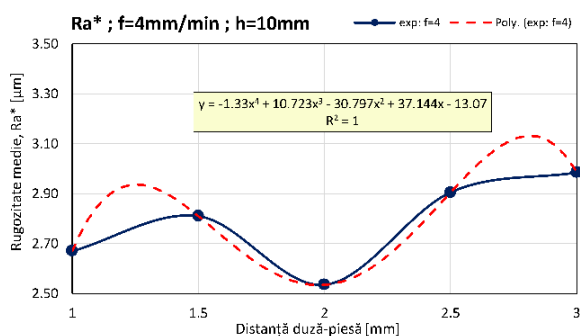


Figura 4.4. Media rugozității Ra^* , avans 4mm/min , grosimea treptei 10mm [42]

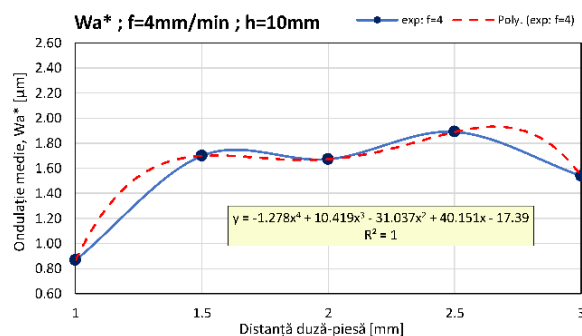


Figura 4.5. Media ondulației Wa^* , avans 4mm/min , grosimea treptei 10mm

Atât rugozitatea medie, cât și ondulația suprafeței în funcție de distanța duză-piesă, sunt distribuite după o curbă de ordinul patru a cărei formă este dată de relația (4.2).

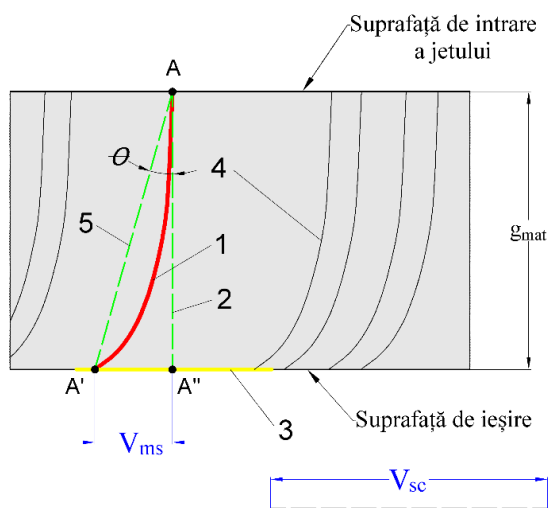
$$Xa^* = A \cdot \delta^4 + B \cdot \delta^3 + C \cdot \delta^2 + D \cdot \delta + E \quad (4.2)$$

, în care: Xa^* - reprezintă, după caz, mărimea rugozității sau a ondulației medii a suprafețelor prelucrate [μm]; δ - reprezintă distanța dintre duză și piesă [mm]; A, B, C, D, E - coeficienți. Acești coeficienți sunt prezentați tabelar în funcție de avansul transversal al capului de tăiere și pentru fiecare treaptă de grosime a materialului. Pe baza ecuațiilor obținute s-a construit, cu ajutorul programului *Visual Studio 2019*, o aplicație a cărei interfață este prezentată în **fig.4.6**. Aplicația permite specialiștilor din producție estimarea rugozității și ondulației în funcție de parametrii de lucru ai instalației *WUXI YCWJ-380-1520*, precum și alegerea optimă a acestora.

Figura 4.6. Interfața programului de estimare Ra și Wa [42]

4.4. Cercetări experimentale privind devierea jetului de apă

Așa cum s-a remarcat în studiul bibliografic, devierea jetului de apă este caracterizată de faptul că jetul de lichid este curbat pe măsură ce acesta parcurge grosimea materialului prelucrat, lăsând o urmă vizibilă pe peretele tăieturii. Schema de principiu a evaluării devierii jetului de apă în cazul materialului analizat este prezentată în **fig.4.7**. În acest subcapitol s-a analizat devierea jetului de apă reprezentat de linia $A'A''$.



- 1 – traiectoria jetului de apă;
- 2 – linie tangentă la traiectoria jetului;
- 3 – linie de bază;
- 4 – urma jetului de apă în materialul prelucrat;
- 5 – linia unghiului de deviere.

Figura 4.7. Măsurarea devierii jetului de apă

Reprezentările grafice ale curburii jetului de apă în funcție de distanța duză-piesă, pentru fiecare valoare a vitezei de avans considerată și pentru fiecare treaptă de grosime, sunt prezentate în **fig.4.8**, **fig.4.9**, **fig.4.10**, **fig.4.11**.

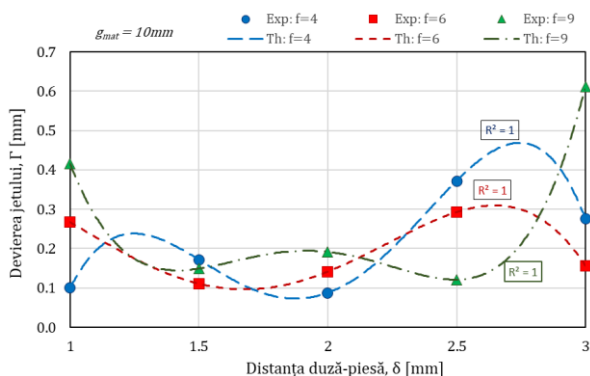


Figura 4.8. Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de 10mm

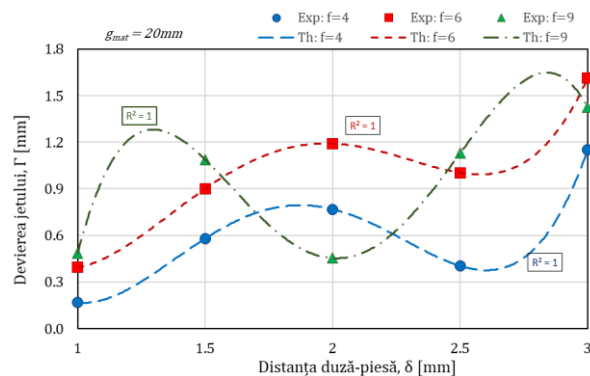


Figura 4.9. Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de 20mm

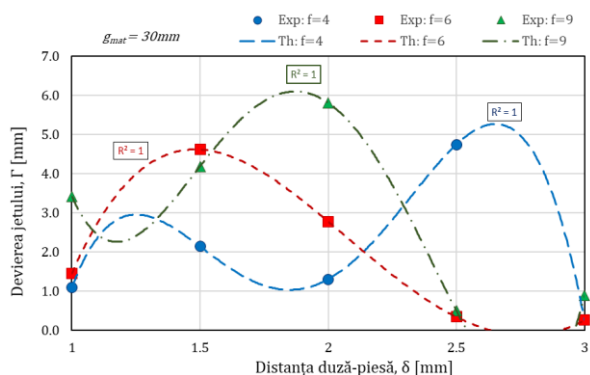


Figura 4.10. Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de 30mm

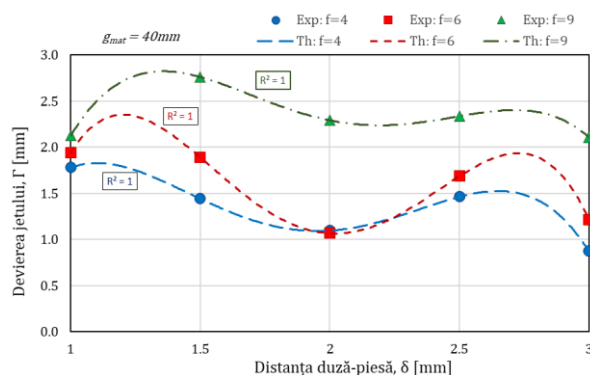


Figura 4.11. Reprezentarea grafică a curburii jetului de apă pentru treapta de 40mm

S-au obținut ecuațiile curbelor de tendință în cazul devierii jetului de apă în funcție de grosimea materialului, avansul și distanța duză-piesă. În relația (4.3) este prezentată ecuația curbei de tendință a devierii jetului de apă în cazul prelucrării treptei de 10mm cu avansul 4mm/min și la distanța duză-piesă de 1mm. Devierea jetului de apă în funcție de

distanța dintre capul de tăiere și suprafața materialului prelucrat variază după o lege polinomială de ordinul IV.

$$\Gamma = -0,852 \cdot \delta^4 + 6,664 \cdot \delta^3 - 18,59 \cdot \delta^2 + 21,884 \cdot \delta - 9,0072 \quad (4.3)$$

În care: Γ – reprezintă devierea jetului de apă măsurată la ieșirea din material [mm]; δ – reprezintă distanța dintre duză și piesă [mm]. De altfel, tot în acest capitol s-a făcut o analiză a unghiului de deviere θ .

4.5. Cercetări experimentale ale lățimii și conicității tăieturilor pentru materialul prelucrat prin procedeul AWJ

Pentru studiul conicității și al lățimii tăieturilor în procesul de prelucrare cu jet de apă, s-au efectuat prelucrări în materialul analizat, conform schiței prezentate în **fig.4.12**. Piesa analizată este formată din patru trepte de grosime (aceste grosimi sunt de: 10mm, 20mm, 30mm și 40mm), fiecare fiind prelucrate la distanțele duză-piesă considerate, cu avansul de lucru de 4mm/min.

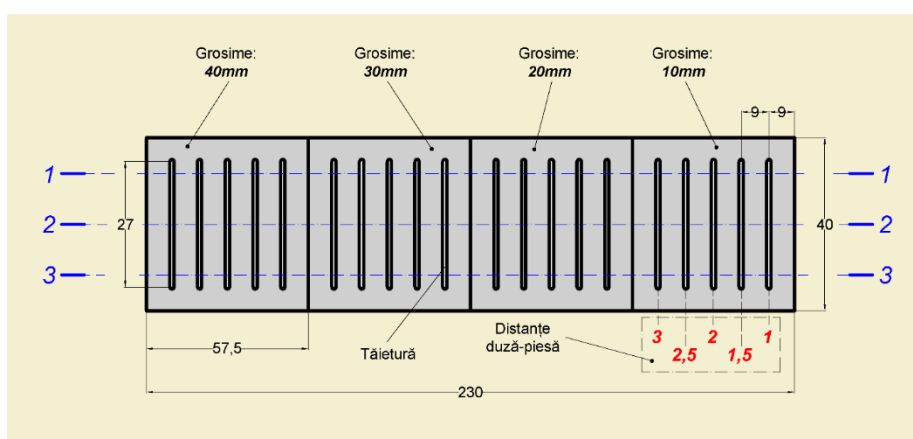


Figura 4.12. Schema prelucrării probelor pentru lățimea și conicitatea tăieturilor

- **Analiza lățimii tăieturilor.** S-a realizat reprezentarea grafică a lățimilor tăieturilor în funcție de distanța duză-piesă la partea superioară a materialului prelucrat, este prezentată în **fig.4.13**, iar în **fig.4.14** este prezentată forma grafică a variației lățimii tăieturilor în zona de ieșire a jetului din material, în funcție de adâncimea de pătrundere a acestuia. Valorile medii ale lățimii tăieturilor la partea superioară a materialului sunt de 0,859mm la DDP=1mm și 1,052 la DDP=3mm.

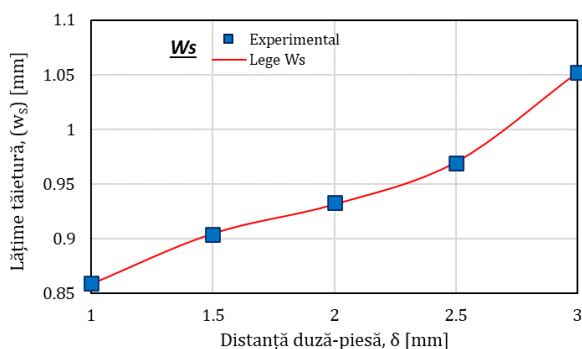


Figura 4.13. Lățimea tăieturilor în zona superioară (w_s)

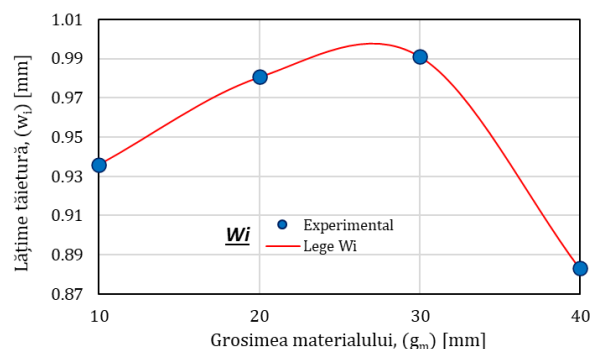


Figura 4.14. Lățimea tăieturilor în zona inferioară (w_i)

Ecuția de tendință în cazul lățimii tăieturii la partea superioară a materialului este dată de relația (4.4), iar la partea inferioară a materialului, lățimea tăieturii variază după o lege logaritmică a cărei ecuație este dată de relația (4.5).

$$w_s = 0,042 \cdot \delta^3 - 0,228 \cdot \delta^2 + 0,463 \cdot \delta + 0,5814 \quad (4.4)$$

$$w_i = 1,002 - 4,78 \cdot 10^{-19} \cdot \exp(g_m) - 2,869 \frac{\ln(g_m)}{g_m^2} \quad (4.5)$$

, în care: w_s - reprezintă lățimea tăieturii pe suprafața de intrare a jetului în material, [mm]; w_i - reprezintă lățimea tăieturii pe suprafața de ieșire a jetului din material, [mm]; g_m - reprezintă distanța duză-piesă, [mm]; δ - reprezintă distanța duză-piesă, [mm].

• **Analiza conicității tăieturilor.** În **fig.4.15** este reprezentată variația conicităților tăieturilor în funcție de distanța dintre duză și piesă pentru cele patru grosimi ale materialului prelucrat. Reprezentarea grafică a unghiurilor conicităților în funcție de adâncimea materialului prelucrat pentru fiecare distanță duză-piesă, este prezentată în **fig.4.16**. Cea mai mică valoare obținută a conicității este de $5,48 \cdot 10^{-3}$ mm/mm.

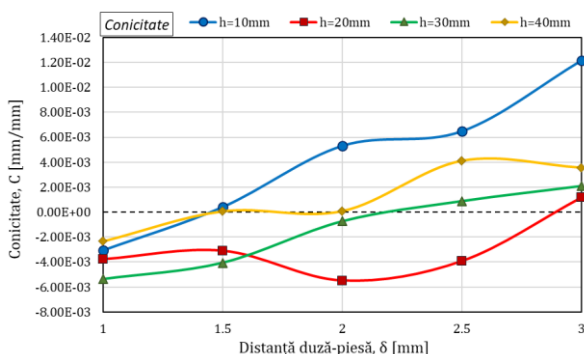


Figura 4.15. Conicitatea tăieturilor

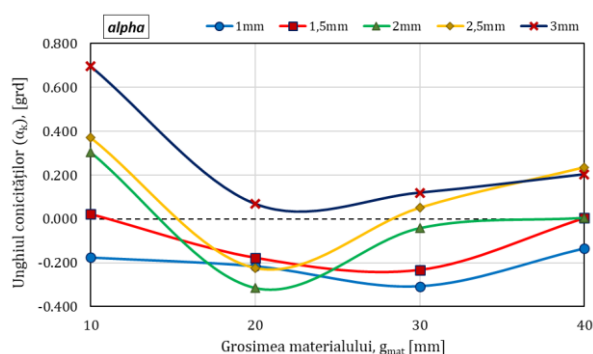


Figura 4.16. Unghiurile de înclinare ale fețelor tăieturilor

Cele mai mici valori ale unghiului de înclinare al fețelor tăieturii s-a obținut pentru grosimea de 40mm a materialului utilizând o distanță duză-piesă cuprinsă între 1,5mm și 2mm, acesta având valorile de (0,004...0,005) grd. Din analiza efectuată s-a observat că nu este recomandat ca o grosime mică de material să fie prelucrată cu avans de lucru mic (de ordinul 4mm/min).

4.6. Cercetări experimentale privind modificarea durității materialului în zona adiacentă a tăieturilor

S-a analizat zona alăturată fiecărei tăieturi pentru a observa modificările produse de jetul abraziv din punct de vedere al durității stratului superficial. Pentru fiecare probă s-a măsurat duritate Vickers a stratului superficial din vecinătatea tăieturii, începând de la o distanța de 0,05mm de marginea tăieturii. Intervalul de măsurare între amprente a fost stabilit ca fiind de 0,07mm. Deoarece, duritate Brinell a oțelului **P275 NL** este de **167HB**, prin echivalare, conform [43, 44] a rezultat o duritate Vickers de **176HV**. În scopul obținerii durităților în vecinătatea tăieturilor s-a utilizat microdurimetrul *Emcotest DuraScan 20* din dotarea departamentului INM al UPG Ploiești, având sarcini de testare cuprinse între 0,01 și

10 kgf [45, 46]. Încercarea a fost realizată conform specificațiilor SR EN ISO 6507-1:2018, iar sarcina de testare a fost de 0,2 kgf.

Reprezentarea grafică a durității HV în zona de influență a jetului pentru fiecare distanță duză-piesă considerată și pentru treptele de grosime de 20mm, 30mm și 40mm, sunt prezentate în fig.4.16, fig.4.17 și fig.4.18. Valorile durităților obținute sunt cuprinse în jurul valorilor de 190...200HV pentru cele din vecinătatea tăieturilor și între 160...170HV către exteriorul acestora, cu excepția unor valori ce ies din acest interval.

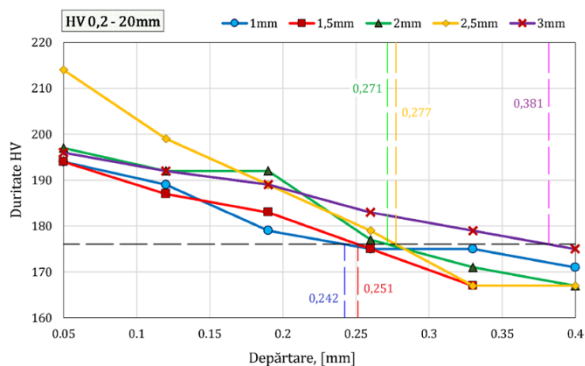


Figura 4.16. Duritate tăieturilor pentru grosimea de 20mm

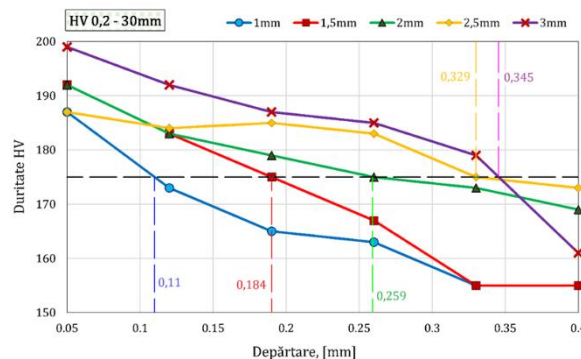


Figura 4.17. Duritate tăieturilor pentru grosimea de 30mm

Influența jetului de apă asupra zonei de material din vecinătatea tăieturilor este reprezentată în diagrama din fig.4.19. Această diagramă a fost ridicată luându-se în considerare media aritmetică a depărtărilor față de tăietură pentru cele trei grosimi.

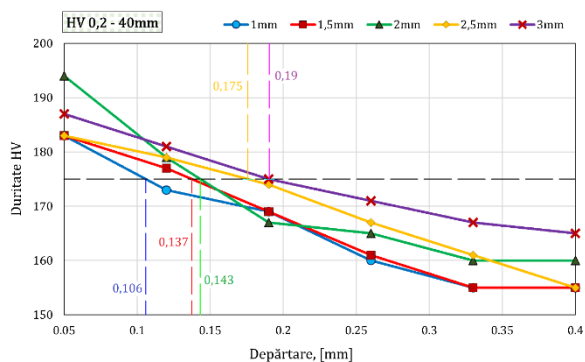


Figura 4.18. Duritate tăieturilor pentru grosimea de 40mm

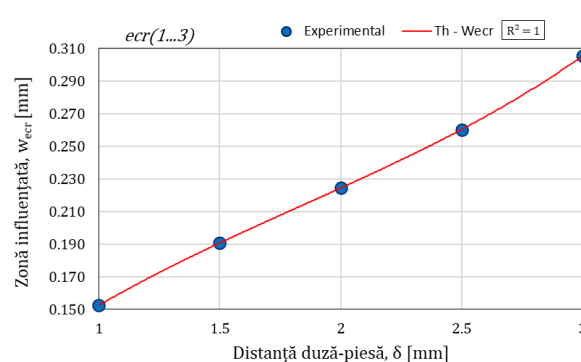


Figura 4.19. Distribuția influenței jetului de apă

Dependența zonei influențate de jetul de apă variază după o lege polinomială de ordinul trei, a cărei ecuație este dată de relația (4.6). Această lege este valabilă numai în zona adiacentă tăieturilor și nu ține cont de valoarea lățimii acestora.

$$w_{ecr} = 0,0092 \cdot \delta^3 - 0,0504 \cdot \delta^2 + 0,1591 \cdot \delta + 0,0347 \quad (4.6)$$

, în care: w_{ecr} - reprezintă lățimea zonei influențată de jetul de apă măsurată de la marginea tăieturii, [mm]; δ - reprezintă distanța duză-piesă, [mm].

4.7. Concluzii

- Pentru fiecare treaptă de grosime a materialului analizată s-au distins trei zone ale suprafeței tăieturii. Aceste zone sunt: zona superioară (S), situată la intrarea jetului în material; zona inferioară (I), situată la ieșirea jetului din material; zona centrală (C) situată în zona de trecere dintre cele două;
- Rugozitatea medie Ra și ondulația medie Wa prezintă o formă grafică sub formă de undă, aceasta fiind dependentă de forma asperităților suprafețelor prelucrate și de parametrii de prelucrare. Distribuirea valorilor măsurate ale rugozității și ondulației nu a respectat o lege strictă;
- Curbele de tendință ale rugozității Ra și a ondulației Wa obținute, s-a observat că pot fi împărțite în trei categorii, în funcție de forma grafică a acestora în intervalul duză-piesă considerat: cu o singură undă, cu două unde sau cu trei unde;
- S-au găsit legile de variație a rugozității Ra și a ondulației Wa ale suprafeței prelucrate cu jet abraziv de apă, în funcție de grosimea materialului, mărimea avansului, distanța duză-piesă. Atât rugozitatea medie cât și ondulația suprafeței în funcție de distanța duză-piesă, sunt distribuite după o curbă de ordinul IV (relația 4.2);
- S-au obținut valorile unghiului de deviere și devierea jetului (I) în funcție de treapta de grosime a materialului, mărimea avansului, distanța duză-piesă. Valorile devierii jetului (I) sunt cuprinse între 0,088...5,812mm. În cazul unghiului de deviere, valorile extreme s-au obținut pentru treapta de grosime de 30mm a materialului prelucrată cu avansul de lucru de 9mm/min la distanța duză-piesă de 2mm, aceste valori fiind cuprinse în intervalul 0,479...10,963grd;
- În cadrul analizei lățimii tăieturilor la partea superioară, valoarea maximă obținută este de 1,052mm la distanța duză-piesă de 3mm, iar cea minimă are media de 0,859mm obținută la valoarea de 1mm a distanței duză-piesă. Legea de distribuție obținută în acest caz este reprezentată de o ecuație polinomială de ordinul III (4.4);
- La partea inferioară a materialului lățimea tăieturilor prezintă o tendință crescătoare pe adâncimea de 30mm a materialului, după care aceasta scade cu o pantă ridicată până la adâncimea de 40mm a materialului. S-a obținut legea de distribuție a acesteia care este de tip logaritmic (4.5);
- Valorile optime (cele apropiate de valoarea zero) s-au obținut pentru grosimea de 40mm la distanța duză-piesă cuprinsă în intervalul 1,5...2mm, iar pentru a obține o tăietură cât mai uniformă pe toată adâncimea materialului nu este recomandat ca o grosime mică să fie prelucrată cu avans de lucru mic (de ordinul 4mm/min);
- Pentru analiza influenței jetului de apă asupra microstructurii materialului din vecinătatea tăieturilor s-a efectuat măsurarea durității în zonele adiacente acestora, iar intervalul de măsurare între amprente a fost stabilit ca fiind de 0,07mm. S-a determinat zona în care jetul abraziv de apă a influențat microstructura materialului prelucrat. S-a obținut mărimea zonei ecruisate în funcție de valorile avansului și distanța duză-piesă, stabilindu-se legea de influență a jetului abraziv de apă asupra zonei ecruisate (relația 4.6).

CAPITOLUL 5

COMPARAREA REZULTATELOR TEORETICE CU CELE OBTINUTE PRIN ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE

5.1. Compararea rezultatelor CFD cu rezultatele experimentale în cazul uzurii tubului de amestec

Deoarece, unele dintre aceste elemente active (ex: duza de înalta presiune) trebuie analizate în cadrul ansamblului tehnico-funcțional, s-a adoptat numai analiza tubului de amestec (MT) din instalația AWJ, din punct de vedere al simulării CFD și compararea rezultatelor cu cele obținute pe cale experimentală. Rata de eroziune obținută în urma analizei CFD reprezintă raportul dintre eroziunea obținută pe pereții interior al tubului de amestec și perioada de simulare, așa cum se arată în relația (5.1).

$$ER_a = \frac{Er_a}{t_s} \quad (5.1)$$

, în care: ER_a – reprezintă rata de eroziune obținută prin simulare CFD [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]; Er_a – reprezintă eroziunea materialului obținută în urma simulării CFD [kg/m^2]; t_s – perioada de simulare CFD [s].

Viteza de eroziune reprezintă raportul dintre rata de eroziune obținută prin simulare CFD și densitatea materialului tubului de amestec, conform relației (5.2).

$$v_{e,a} = \frac{ER_a}{\rho_{WC}} \quad (5.2)$$

, în care: $v_{e,a}$ – reprezintă viteza de eroziune obținută pe cale analitică (CFD) [mm/s]; ρ_{WC} – reprezintă densitatea carburii de wolfram ($15,63 \text{ g}/\text{cm}^3$, conform [47]).

Reprezentarea grafică a ratei de eroziune obținută în urma simulării CFD a tubului de amestec (ER-CFD) este prezentată în **fig.5.1**. Această reprezentare s-a făcut pe perioada de simulare de 0,8s în contextul în care la momentul inițierii simulării ($t_s=0$), eroziunea este aproximativ nulă comparativ cu celelalte valori obținute.

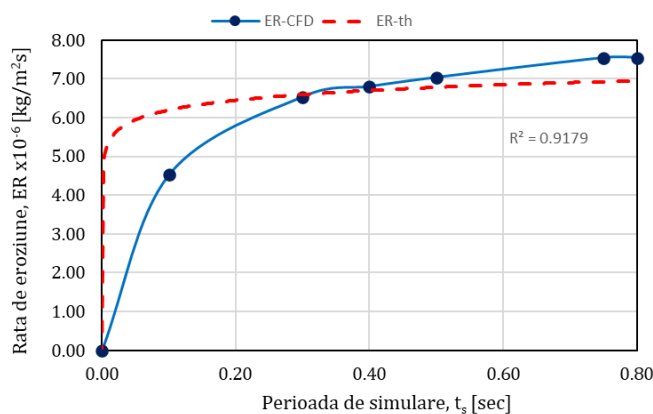


Figura 5.1. Rata de eroziune a MT conform CFD

S-a obținut curba de variație a ratei de eroziune în funcție de perioada de simulare CFD, ca o lege de tip logaritmă dată de relația (5.3). Aceasta a fost obținută la un factor de potrivire de 91,79% față de rezultatele simulării. Legea de variație a vitezei de eroziune a

tubului de amestec este dată de relația (5.4), în contextul în care s-a păstrat același factor de potrivire ca și în cazul ratei de eroziune.

$$ER_{th} = 0,3639 \cdot \ln(t_s) + 7,0313 \quad (5.3)$$

$$v_{e,th} = 0,2325 \cdot \ln(t_s) + 4,4986 \quad (5.4)$$

, în care: ER_{th} – reprezintă rata de eroziune teoretică exprimată prin curba de tendință, pentru care valorile obținute prin simulare CFD corespund cu situația reală [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]; $v_{e,th}$ – reprezintă viteza de eroziune teoretică [mm/s].

Masa MT a fost măsurată pe balanța analitică tip *Mettler H35*, înainte de efectuarea încercărilor experimentale și la finalul acestora. Mașina AWJ tip *WUXI YCWJ-380-1520* a înregistrat perioadele de funcționare, iar în **tab.5.1** sunt prezentate valorile obținute în cazul tubului de amestec analizat.

Tabelul 5.1. Pierderea de masă a MT obținută experimental

Masa inițială, [g]	Masa finală, [g]	Diferența de masă, Δm [g]	Timpul de lucru, t_m	
			[ore]	[secunde]
35,2886	35,2064	0,0822	9,366	33717

Dacă se face raportul dintre pierderea de masă a tubului de amestec și aria suprafeței active a acestuia, se obține eroziunea reală produsă de particulele abrazive pe peretele tubului, aceasta fiind dată de relația (5.5).

$$Er_{exp} = \frac{\Delta m}{S_L} \quad (5.5)$$

, în care: Er_{exp} – reprezintă eroziunea MT obținută pe cale experimentală [kg/m^2]; Δm – pierderea de masă a MT obținută în urma procesului de eroziune [kg]; S_L – aria suprafeței active a MT ($225,17 \text{ mm}^2$). Evaluarea experimentală a procesului de eroziune asupra tubului de amestec, este prezentată în **tab.5.2**.

Tabelul 5.2. Valorile eroziunii MT determinate experimental

Mărimea	Eroziunea, Er_{exp} [kg/m^2]	Rata de eroziune, ER_{exp} [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	Viteza de eroziune, $v_{e,exp}$ [mm/s]
Valoarea	0,365	$10,82 \cdot 10^{-6}$	$6,922 \cdot 10^{-7}$

În cazul încercărilor noastre experimentale, MT este confecționat din Carbură de Wolfram. Există situații în care MT este confecționat din alte materiale ceramice, cum este cazul analizat în lucrarea [48].

5.2. Influența jetului de apă asupra materialului prelucrat P275NL2

În această parte a tezei se face o comparație între rezultatele obținute prin simulare CFD a jetului de apă liber și rezultatele experimentale obținute în urma măsurărilor efectuate pe materialul analizat. Se va determina viteza care produce tăierea materialului, cât și viteza particulelor care influențează prin ecrusare zona adiacentă tăieturilor.

În **fig.5.2** este prezentată distribuția de viteze a jetului de apă liber pentru distanța duză-piesă de 1mm și 3mm, corelată cu lățimile tăieturilor obținute pe cale experimentală. Așa cum se poate observa, din această diagramă valorile obținute ale vitezelor de tăiere a materialului P275NL2 prin procedeul de prelucrare AWJ sunt cuprinsă în intervalul 95,66 m/s și 104,66 m/s. Aceste valori au fost obținute prin suprapunerea rezultatelor experimentale peste cele obținute cu ajutorul simulării CFD a jetului de apă liber dezvoltat de mașina AWJ tip WUXI YCWJ-380-1520.

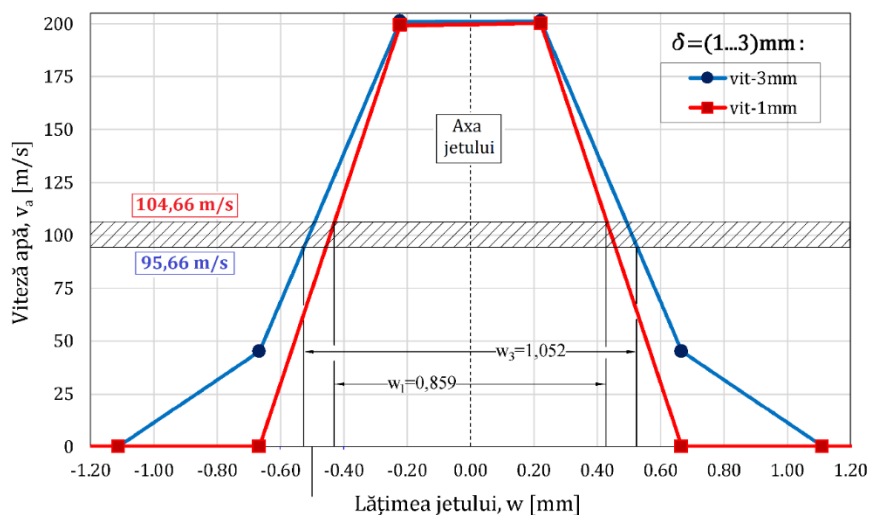


Figura 5.2. Distribuția de viteze CFD corelată cu lățimile tăieturilor

Pentru a evalua influența jetului de apă asupra ecrisării materialului analizat, s-a construit diagrama din **fig.5.3**, în care este reprezentată variația vitezei jetului de apă liber în funcție de lățimea acestuia pentru limitele intervalului duză-piesă considerat.

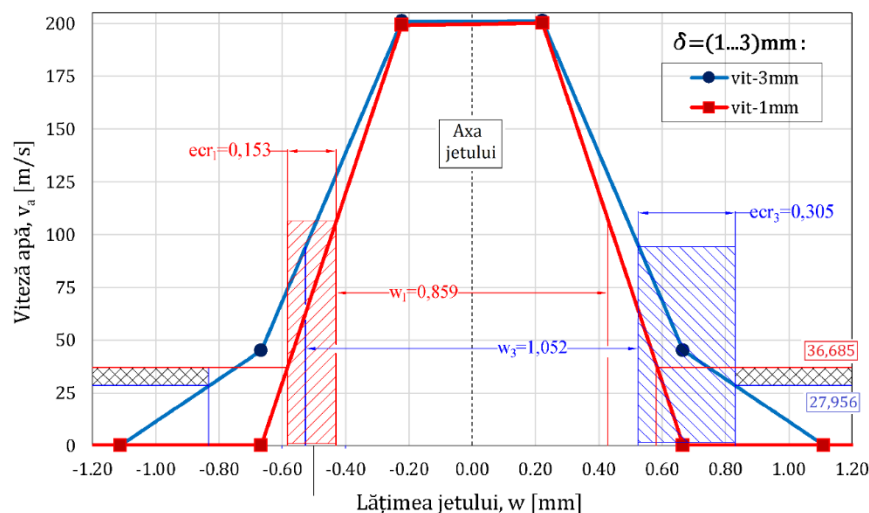


Figura 5.3. Diagrama zonelor ecrisate de jetul de apă

S-a obținut valoarea vitezei limită de impact ce ecrisează zona adiacentă tăieturii $\delta=1\text{mm}$ (ecr_1), valoarea numerică a acesteia fiind de 36,685 m/s. În mod analog se obține zona ecrisată a materialului la $\delta=3\text{mm}$ (ecr_3), iar prin intersectarea liniei ce delimitează marginea exterioară a stratului ecrisat cu graficul distribuție de viteze a jetului de apă liber, s-a obținut valoarea vitezei limită ce influențează zona adiacentă tăieturii în acest caz, valoarea numerică a acesteia fiind de 27,956 m/s.

5.3. Analiza microstructurii materialului

S-a determinat indicele convențional al mărimii grăuntelui (G) conform specificațiilor prezentate în **EN ISO 643:2020 (ASTM E112)**, folosind metoda de evaluare prin comparare cu imagini-tip. S-au analizat imaginile metalografice în zona afectată de jetul de apă (zona **A**) și în zona neafectată (zona **N**). În **fig.5.4** este prezentată imaginea microstructurii materialului obținută în vecinătatea tăieturii prin microscopie SEM, iar în **fig.5.5** într-o zonă neafectată de jetul de apă.

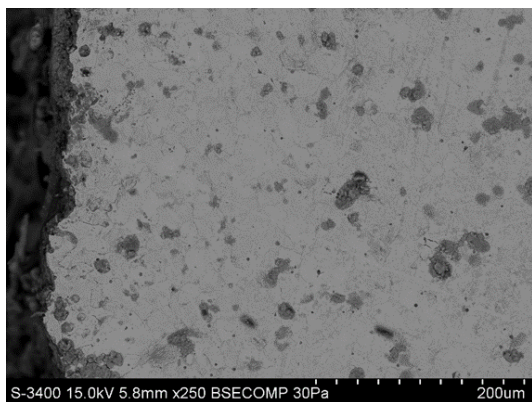


Figura 5.4. Analiza microstructurii oțelului P275NL2 în zona *afectată*

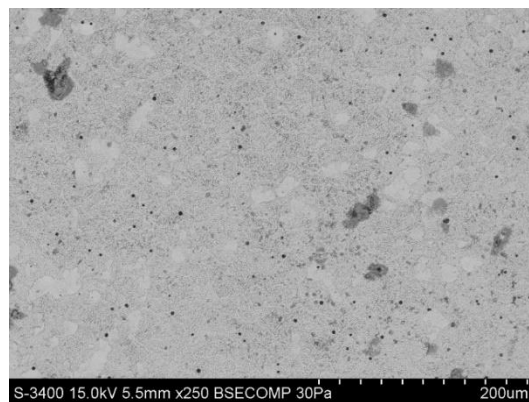


Figura 5.5. Analiza microstructurii oțelului P275NL2 în zona *neafectată*

Deoarece mărirea imaginii analizate este diferită de 100, indicele convențional de mărire al grăuntelui se determină cu relația (5.6) [49].

$$G = G_g + 6,64 \cdot \log \left(\frac{g_n}{100} \right) \quad (5.6)$$

, în care: G – reprezintă indicele convențional al măririi grăuntelui; G_g – reprezintă factorul de comparare al imaginii structurii cu mărirea de 100; g_n – este mărirea imaginii.

În **tab.5.3** sunt prezentate caracteristicile grăunților cristalini obținute în urma analizei microstructurale a materialului, pentru cele două zone studiate, iar diametrul mediu al grăunților s-a adoptat din [50]. În **tab.5.4** este prezentată corelarea rezultatelor obținute prin analiză metalografică a dimensiunii grăunților cu rezultatele durității obținute în cele două zone de interes.

Tabelul 5.3. Caracteristicile grăunților cristalini

	Indice de comparare, G_g [-]	Indice de mărime, G [-]	Arie grăunte, a_g [mm ²]	Număr de grăunți, m_g [grăunți/mm ²]	Diametru grăunte, d_{gr} [μm]
Zonă A	6	8,6	0,012	3200	18,9
Zonă N	5.5	8,1	0,017	2263	22,5

Tabelul 5.4. Corelarea durității cu indicele de mărime

	Zonă Afectată	Zonă Neafectată	Raport zone: N/A	Modificare procentuală
Duritate medie, HV	192,133	176	0,916	8,39
Indice de mărime, G [-]	8,642	8,142	0,942	5,78

Prin compararea analizei de mai sus cu imaginea microstructurii într-o zone neafectată de jetul de apă prezentată în **fig.5.5**, se observă o structură mai grosolană a grăunților de perlită în zona neafectată de impactul granulelor de nisip.

5.4. Concluzii

➤ Deoarece fenomenul de eroziune este foarte complex, din analiza CFD și experimentală făcută asupra tubului de amestec (MT) din componența instalației de prelucrare AWJ, s-au obținut următoarele concluzii:

- S-a obținut viteza de eroziune a MT cu valoarea de $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/oră pe perioada reală de funcționare 33717 secunde (9 ore, 21 min, 57 sec);
- S-a obținut legea de distribuție a ratei de eroziune ER_{th} date de relația (5.3), pentru un timp de 33715,21 sec (9 ore, 21 min, 55 sec);
- S-a obținut legea de distribuție a vitezei de eroziune $v_{e,th}$ date de relația (5.4), pentru un timp de 33631,7 secunde (9 ore, 20 min, 32 sec).

➤ S-au analizat lățimile tăieturilor obținute pe cale experimentală cu cele obținute în cadrul simulărilor CFD, pentru distanțele extreme duză-piesă de 1 mm, respectiv 3 mm. La distanța duză-piesă de 1 mm, lățimea tăieturii este de 0,859 mm și a rezultat că materialul a fost îndepărtat de jetul de apă cu o viteză de tăiere de aproximativ 104,66 m/s. Pentru distanța duză-piesă de 3 mm, valoarea vitezei de tăiere de 95,66 m/s. Analizând valorile vitezei pentru cele două cazuri extreme ale distanței duză-piesă, se poate trage concluzia că eroarea maximă obținută între simulare CFD și rezultatele experimentale este de 9%;

➤ S-a determinat lățimea zonei ecruisate în funcție de distanța duză-piesă considerată. S-au determinat vitezele jetului ce produc ecruisarea suprafeței materialului (27,956-36,685) m/s. S-a confirmat corectitudinea modelului teoretic cu valorile experimentale obținute, deoarece eroarea în lățimea stratului ecruisat de 0,02 mm este extrem de redusă;

➤ S-a realizat analiza microstructurii materialului din vecinătatea tăieturilor și s-a obținut indicele convențional al măririi grăunțului $G=8,6$ și diametrul mediu al grăunțului de 0,0189 mm, conform ASTM E112 (EN ISO 643:2020). În vecinătatea tăieturilor, structura cristalină este mai fină, comparativ cu zona neafectată de jetul de apă, unde se observă o dimensiune mai mare a cristalelor de perlită;

➤ S-a realizat compararea indicelui convențional de mărire al grăunțului cu duritatea materialului din zonele analizate, rezultând faptul că structura cristalină a materialului este afectată de jetul de apă prin modificarea grăunților (cu 5,78%) și implicit a durității în zona tăieturilor (cu 8,39%). Se observă o modificare procentuală a durității mai mare decât cea a modificării dimensiunii grăunților în zona influențată de jet în timpul prelucrării. Se produce o creștere a durității corelată cu o scădere a dimensiunii grăunților în zona influențată de jet în timpul prelucrării.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.2. Contribuții personale

A. Studiul bibliografic:

- Realizarea unei sinteze asupra procedeele tehnologice uzuale și neconvenționale de elaborare a semifabricatelor din industria constructoare de mașini;
- S-a realizat o sinteză asupra fenomenului de eroziune produs de jeturile abrazive de mare viteză, precum și a mecanismelor de generare a eroziunii în funcție de natura materialului erodat, cu scoaterea în evidență a factorilor și parametrilor ce influențează procedeul de prelucrarea AWJ;
- Sinteza modelelor matematice de estimare a eroziunii dezvoltate de diverși cercetători, precum și evaluarea resurselor software de analiză a fenomenului de eroziune produs asupra elementelor geometrice ale instalației și a materialelor studiate în teză.

B. Studiul teoretic:

- Analiza curgerii apei prin orificiul de rubin al HPN cu diametrul de 0,25mm prin metoda analitică și simulare CFD. Stabilirea legilor de distribuție a vitezei apei în regim turbulent conform rezultatelor obținute prin cele două metode (relațiile 3.14 și 3.18; în rezumat: 3.4 și 3.5);
- Stabilirea dimensiunilor optime ale orificiilor HPN și MT din punct de vedere al parametrilor hidraulici de curgere a apei, utilizând simulare CFD;
- Analiza fenomenului de eroziune asupra elementelor active ale instalației WUXI YCWJ-380-1520, utilizând simularea CFD prin rulare în regim *steady-state* și *transient-time*. Stabilirea unor legi matematice de variație a ratei de eroziune prin elementele CH în funcție de debitul de abraziv, produsă de cele trei dimensiuni ale granulelor de nisip (relațiile 3.30, 3.31, 3.32; în rezumat: 3.9, 3.10, 3.11);
- Stabilirea pe cale analitică a legilor de variație a rugozității (Ra) și ondulației (Wa) în funcție de regimul de lucru utilizat la prelucrarea AWJ a materialului P275NL2 (relația 4.5; în rezumat: 4.2);
- S-a realizat o aplicație "prietenosă" prin care operatorii instalației AWJ își pot selecta parametrii de lucru, grosimea materialului, avansul, distanța duză-piesă, în vederea obținerii parametrilor microgeometrici doriți;
- Analiza fenomenului de deviere a jetului de apă (Γ) produs asupra materialului P275NL2, prin stabilirea legilor de variație în funcție de distanța duză-piesă, pentru fiecare viteză de avans și treaptă de grosime considerată (relațiile 4.7...4.18; în rezumat: 4.3);
- Stabilirea pe cale teoretico-experimentală a unor legi ce guvernează procesul de formare a tăieturilor generate prin procedeul AWJ, (relațiile 4.20 și 4.21; în rezumat: 4.4 și 4.5).

C. Studiul experimental:

- Realizarea de măsurători asupra elementelor active ale instalației WUXI YCWJ-380-1520, în scopul de a prezenta o imagine cât mai clară asupra modelului geometric ce intervine în studiul fenomenului de eroziune;
- Determinarea parametrilor hidrodinamici dezvoltați de instalația AWJ, prin stabilirea debitelor de curgere ale fazelor solidă, lichidă și gazoasă;
- Evaluarea calitativă și cantitativă a materialului abraziv prin stabilirea debitului de curgere dezvoltat de instalație, factorul de formă al particulelor de nisip, granulometria și compoziția chimică a acestuia;
- Proiectarea optimă a parametrilor tehnologici care să reflecte influența procedurii AWJ asupra calității suprafeței materialului prelucrat;
- Evaluarea microgeometriei suprafețelor tăieturilor și reprezentarea grafică a parametrilor de profil ai microasperităților, pentru fiecare zonă caracteristică de pe suprafețele tăieturilor și în funcție de parametrii tehnologici ai procesului AWJ;
- Stabilirea distribuțiilor de viteze ale jetului de apă liber și obținerea mărimii vitezelor particulelor ce au produs tăiere, respectiv ecrusarea materialului studiat;
- Studiul influenței jetului de particule asupra microstructurii cristaline din vecinătatea tăieturilor, cu determinarea gradului de modificare procentuală a grăunților;

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Fenomenul de eroziune produs asupra materialelor și instalațiilor prezentate în această lucrare, poate fi extins la următoarele direcții de cercetare:

- Studiu multifazic de curgere prin elementele active ale mașinii, folosind modele teoretice de tip lichid-gaz (metoda Lockhart-Martinelli, Brill-Beggs etc) și validarea acestora cu ajutorul simulărilor CFD;
- Studiul creșterii perioadei de funcționare a duzei de înaltă presiune și a tubului de amestec prin acoperirea acestora cu straturi subțiri din ceramici de a treia generație depuse pe suprafața activă.

Observație. Teza de doctorat conține un număr de **138** relații și conține un număr de **148** surse bibliografice.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] Antonescu N.N., Ulmanu V., *Fabricarea, Repararea și Întreținerea Utilajului Chimic și Petrochimic*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- [2] ***https://en.wikipedia.org/wiki/Welding_joint (accesat: Mai, 2020)
- [3] ***<http://heatexchan.blogspot.com/2017/02/the-calculation-of-fixed-tubesheet.html> (accesat: Mai, 2020)
- [4] Akkurt, A., *The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy*, Engineering Science and Technology, International Journal, vol. 18, no.3, pp.303-308, 2015
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter (accesat: 26 Iunie, 2017)
- [6] <https://www.omax.com/learn/history-of-waterjet> (accesat: 26 Iunie, 2017)
- [7] Zeng, J., Kim, T.J., *An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting*, Wear, vol. 193, no. 2, pp. 207-217, May 1996
- [8] Popa, L., Ispas, A., *Research on The Influence of Working Parameters on Cutting Water Jet*, Nonconventional Technologies Review Romania, September, pp.64-71, 2013
- [9] Brook, N., Summers, D.A., *The penetration of rock by high speed water jets*, Int J Rock Mech Min Sci, Vol.6, pp.249-258, 1969
- [10] Grote K.H., Antonsson E.K., *Springer handbook of mechanical engineering*, Springer Science & Business Media, ISBN: 978-3-540-49131-6, New-York, USA, 2008
- [11] Pătîrnac I., Rîpeanu G. R., *Review on Erosion Processes at Abrasive Waterjet Machining*, BULETINUL Universității Petrol – Gaze din Ploiești, Seria Tehnică, Vol. LXIX No. 4, pp. 28-44, 2017
- [12] Mansouri, A., *A combined CFD experimental method for developing an erosion equation for both gas-sand and liquid-sand flows. Ph. D. Thesis*, The University of Tulsa, USA, 2016
- [13] Yadav G., Tiwari S., Rajput A., Jatola R., Jain M. L., *A Review: Erosion Wear Models*, International Conference on Emerging Trends in Mechanical Engineering, ICETME, 27-28 may 2016
- [14] Parsi, M., Najafifard, K.N.F., Hassani, S., McLaury, B.S., Shirazi, S.A., *A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications*, Journal of Natural Gas Science and Engineering, vol.21, pp.850-873, 2014
- [15] Anwar, S., *Modelling of Abrasive Waterjet Milled Footprints*, Ph. D. Thesis, University of Nottingham, October 2013
- [16] Bitter, J., *A study of erosion phenomena, part 1*, Wear, vol. 6, no.1, pp. 161-190, 1963
- [17] Tudor, I., *Tribologie*, Editura Universitatii din Ploiesti, 2001
- [18] Arola, D., Ramulu, M., *A study of kerf characteristics in abrasive waterjet machining of graphite/epoxy composite*, Journal of engineering materials and technology, vol. 118, no. 2, pp. 256-265, 1996
- [19] Azmir, M.A., Ahsan, A.K., *A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, no. 20, pp. 6168-6173, 2009
- [20] Finnie, I., *Some observations on the erosion of ductile metals*, Wear, Vol.19, July 2, 1972
- [21] Kamarudin, N.H., Prasada, R.A.K., Azhari, A., *CFD Based Erosion Modelling of Abrasive Waterjet Nozzle using Discrete Phase Method*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol.114, 2016
- [22] Feng, Y., Jianming, W., Feihong, L., *Numerical simulation of single particle acceleration process by SPH coupled FEM for abrasive waterjet cutting*, International Journal, Advanced Design and Manufacturing Technology, vol. 59, no. 10, pp. 193-200, 2012
- [23] Shahverdi, H., Zohoor, M., Mousavi, S. M., *Numerical Simulation of Abrasive Water jet Cutting Process using the SPH and ALE Methods*, International Journal, Advanced Design and Manufacturing Technology, vol. 5, no. 1, pp. 43-50, 2011
- [24] Junqing M., Qingen W., Yechao M., *Numerical simulation study on erosion mechanism of pre-mixed abrasive water jet*, Sage Journals, Advances in mechanical Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 1-10, 2017
- [25] Hlavac L.M., Hlavacova I.M., Arleo F., Viganò F., Annoni M.P.G., Geryk V., *Shape distortion reduction method for abrasive water jet (AWJ) cutting*, Precision Engineering, Vol. 53, pp. 194-202, 2018
- [26] Alberti A., Artaza T., Suarez A., Rivero A., Girot F., *An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations*, International Journal of Advanced Manufacturing and Technology, Vol. 86, pp.691-704, 2016
- [27] ***<https://chinawaterjet.com/ycwaterjet/products/full-set-yc-water-jet-cutting-machine/> (accesat: Mai, 2019)

- [28] Krajcarz D., *Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting*, 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013, Procedia Engineering, vol. 69, pp. 838-843, 2014
- [29] Axinte D.A., Karpuschewski B., Kong M.C., Beaucamp A.T., Anwar S., Miller D., Pertz M., *High Energy Fluid Jet Machining (HEFJet-Mach): From scientific and technological advances to niche industrial applications*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 63, pp. 751-771, 2014
- [30] Roberto I., Nossen J., Investigation of oil-water flow in concentric and fully eccentric annulipipes, Chemical Engineering Science: X, vol. 4, 100042, 2019
- [31] Saxena A., Pathak A.K., Ojha K., Sharma S., Experimental and modeling hydraulic studies of foam drilling fluid flowing through vertical smooth pipes, Egyptian Journal of Petroleum, vol. 26, no.2, pp. 279-290, 2017
- [32] Oroveanu T, Stan A, Talle V, *Transportul petrolului*, Ed. Tehnica, pp 32-32, Bucuresti 1985
- [33] Crețu I., Stan Al., *Transportul fluidelor prin conducte. Aplicații și probleme*, Editura tehnică, București 1984
- [34] ***<https://gritsablare.ro/docs/fisa-granat-ro.pdf> (accesat: 18 Iulie 2019)
- [35] Ulmanu V., Zecheru Gh., Minescu M., Săvulescu M.J., Tehnologia materialelor. Îndrumar de laborator, Institutul de Petrol și Gaze, Ploiești 1987
- [36] ***STAS 5609-87, Nisip pentru turnătorie. Condiții tehnice generale de calitate
- [37] Rodriguez, J., Edeskar, T., Knutsson, S., *Particle shape quantities and measurement techniques: a review*, The Electronic journal of geotechnical engineering, vol.18/A, pp.169-198, 2013
- [38] Nucci C., Spena A.R., *Mean velocity profiles of two-dimensional fully developed turbulent flows*, Comptes Rendus Mecanique, vol. 340, pp. 629-640, 2012
- [39] ***NORSOK M-506. CO2 corrosion rate calculation model. Norwegian Standard
- [40] ***<https://www.cerazit.com/en/products/wear-protection/list/detail/product-detail/water-jet-nozzles> (accesat: Mai, 2019)
- [41] Pătîrnac I., Rîpeanu G. R., E Laudacescu., *Abrasive flow modelling through active parts water jet machine using CFD simulation*, International Conference on Tribology (ROTRIB'19), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 724, No.1, pp. 1-7, 2020
- [42] Patirnac, I., Ripeanu, R.G., Laudacescu, E., *The Influence of the AWJM Working Parameters on Manufactured Surfaces Microgeometry*, The 7th International Conference on Manufacturing and Materials Engineering – ICMMEN 2020, July 2 - 3, 2020 –Thessaloniki, Greece (acceptat pentru publicare)
- [43] ***https://www.engineeringtoolbox.com/bhn-brinell-hardness-number-d_1365.html (accesat: 21 Februarie 2020)
- [44] ***https://www.efunda.com/units/hardness/convert_hardness.cfm?HD=HB%20%28Tungsten%203000%29&Cat=Steel#ConvInto (accesat: 21 Februarie 2020)
- [45] Mohamed Y.S., El-Gamal H., Zaghoul M.M.Y., *Micro-hardness behavior of fiber reinforced thermosetting composites embedded with cellulose nanocrystals*, Alexandria Engineering Journal, vol. 57, pp. 4113-4119, 2018
- [46] Mkaddem A., Bahloul R., Dal Santo P., Potiron A., *Experimental characterisation in sheet forming processes by using Vickers micro-hardness technique*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 180, pp. 1-8, 2006
- [47] https://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten_carbide (accesat: 25 Martie 2020)
- [48] Peter H.-T. Liu, *Advanced Waterjet Technology for Machining*, Curved and Layered Structures, vol. 6, pp. 41-56, 2019
- [49] EN ISO 643:2020 - Steels - Micrographic determination of the apparent grain size
- [50] ASTM E112-10 - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size