

MODELAREA PROCESULUI DE SUDARE LASER ÎN REGIM KEYHOLE A MATERIALELOR METALICE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ
de către

fiz. Remus Boboescu

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Alexandru Nichici
prof.univ.dr.ing. Dorin Dehelean
prof.univ.dr.ing. Radu Iovănaș
conf.univ.dr.ing. Eugen Florin Cicală

Ziua susținerii tezei: 28 iunie 2010

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | 12. Ingineria sistemelor |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2010

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Sudarea laser este unul din procesele industriale cu o largă răspândire. În procesele de sudare laser modelarea experimentală în scopul cunoașterii și controlului procesului este un subiect actual deoarece practic problemele legate de condițiile de prelucrare și cele de material practic nu pot fi epuizate. Sudarea laser aduce prin prezența simultană a topirii, vaporizării și mișcării topiturii în baia de sudare o serie de fenomene fizice a căror cunoaștere este importantă pentru controlul procesului de sudare. Studiul fenomenelor fizice este însoțit de modelare analitică.

Teza de doctorat „ Modelarea procesului de sudare laser în regim keyhole a materialelor metalice” abordează două direcții de cercetare una asupra procesului de sudare și condițiilor în care poate fi realizat acesta iar cealaltă asupra fenomenelor fizice care au loc în timpul procesului de sudare laser. Lucrarea demonstrează că cele două direcții de cercetare se întrepătrund. În lucrare se prezintă metode de cercetare în sudarea laser. Acestea au ca obiect central sudura și caracteristicile sale. Se prezintă mai multe metode de analiză a matematică a rezultatelor experimentale. Se arată că acestea pot fi corelate între ele, astfel se pun în evidență aspecte fenomenologice și tehnologice ale procesului de sudare. Studiul experimental al procesului de sudare propus în lucrare permite evidențierea unor aspecte elementare ale procesului tehnologic de sudare cu fascicol laser și ale transformărilor de material din sudură. Studiul prezentat poate servi ca bază de cunoaștere și argumente în domeniul sudării laser și general în prelucrarea cu fascicol laser a materialelor.

Pe această cale doresc să mulțumesc domnului profesor dr. Jean Marie Jouvard de la Universite de Bourgogne care a inițiat acest proiect științific. De asemenea mulțumesc pentru ajutorul dat în realizarea părții experimentale domnului conferențiar dr Eugen Cicală și domnului profesor dr. Dominique Grevey .

Mulțumesc pentru sprijinul acordat pe parcursul activității din acești ani colegilor din Catedra de Tehnologie Mecanică, departamentul Mașini Mecanice, Utilaje și Tehnologii din Facultatea de Mecanică și colegilor din Laboratorul „Treatements et materiaux” de la IUT le Creusot France.

Mulțumesc, de asemenea, pentru ajutorul dat la analiza probelor experimentale domnilor profesor dr. Ion Mitelea și profesor dr. Livius Miloș, precum și personalului tehnic din Catedrele Tehnologie Mecanică , Sudură și Studiul Materialelor, care m-au ajutat efectiv la prelucrarea și examinarea primară a probelor.

Mulțumesc familiei care pe parcursul întregii perioade de activitate m-a sprijinit și m-a ajutat.

Timișoara, iunie 2010

Remus Boboescu

Boboescu, Remus

Modelarea procesului de sudare laser în regim keyhole a materialelor metalice

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 27, Editura Politehnica, 2010, 252 pagini, 142 figuri, 32 tabele, 150 ecuații/ formule, 204 referințe/ note bibliografice

ISSN:1842-8967

ISBN: 978-606-554-117-7

Cuvinte cheie: sudare laser, regim keyhole, transformare de fază, oțel carbon, experiment factorial, microstructuri

Rezumat,

S-a realizat sudarea folosind un laser Nd:YAG pe plăci de oțel carbon. În sudarea laser datorită vaporizării intense apare o cavitate în material numită keyhole. S-a analizat teoretic și experimental propagarea frontului de topire în materil. Procesul de sudare laser este controlat prin variația puterii laserului, vitezei de sudare și distanței dintre planul focal și suprafața piesei (defocalizarea). Se analizează mărimi care caracterizează secțiunea prin sudură, mărimi care caracterizează suprafața sudurii și modificări ale structurii materialului în zona sudurii.S-a realizat modelare experimentală a sudării laser însoțită de studiu statistic.

Cuprins

Cuprins.....	5
Lista notațiilor și abrevierilor	8
Introducere.....	11
1. Metode de investigare și modelare a sudării laser în regim keyhole („gaură de cheie”).....	16
1.1 Utilizarea radiației laser la prelucrarea materialelor.....	16
1.1.1 Definierea , propagarea și focalizarea radiației laser.....	16
1.1.2 Interacțiunea dintre radiația laser și material.....	21
1.1.3 Sisteme tehnologice laser pentru sudare.....	24
1.2 Procese de sudare cu laser a materialelor metalice.....	28
1.2.1 Aspecte tehnologice ale procesul de sudare laser.....	28
1.2.2 Procedee de sudare laser.....	32
1.3 Fenomenul de keyhole în baia de sudare.....	34
1.4 Metode și mijloace de cercetare a procesului de sudare în regim keyhole	43
1.4.1 Investigații asupra fenomenelor care au loc în timpul procesului de sudare (on-line).....	44
1.4.2 Investigații asupra sudurilor (off-line).....	52
1.4.3 Modelarea matematică a procesului de sudare laser.....	59
1.4.3.1 Modelarea analitică și numerică în sudarea laser.....	59
1.4.3.2 Modelarea experimentală în sudarea laser.....	68
1.5 Obiective ale cercetării doctorale.....	73
1.6 Concluzii.....	76
2. O evaluare integratoare a evoluției și rolului fenomenelor termice în procesele de sudare laser.....	78
2.1 Introducere în problemele termice.....	78
2.2 Încălzirea materialului iradiat.....	81
2.3 Transformarea de stare de agregare a materialului iradiat.....	85
2.4 Calculul teoretic a condițiilor de obținere a regimurilor de sudare.....	89
2.5 Tratarea similară a unor fenomene fizice cu transformările de stare de agregare.....	91
2.6 Predicția regimurilor de sudare pe baza căldurii latente integrale.....	97
2.7 Model analitic de predicție a zonei topite.....	100
2.8 Concluzii.....	102
3. Cercetări experimentale.....	105
3.1 Obiective fenomenologice și tehnologice ale experimentelor.....	105
3.2 Condiții experimentale generale.....	106
3.3 Condiții experimentale particulare.....	108
3.4 Planuri experimentale de tip clasic	111
3.5 Planuri experimentale de tip factorial	113
3.6 Calculul unor mărimi fizice care caracterizează condițiile de iradiere a materialului.....	119

3.7 Metode și tehnici de analiză și măsurare a sudurilor	121
3.7.1 Măsurători pe secțiunii ale sudurilor.....	121
3.7.2 Măsurători pe suprafața sudurilor.....	122
3.7.3 Prelucrarea matematică a datelor experimentale.....	124
3.8 Concluzii.....	125
4. Analiza secțiunii transversale a sudurilor.....	127
4.1 Secțiuni transversale prin suduri.....	127
4.2 Analiza variațiilor funcțiilor obiectiv după serile experimentale clasice.....	130
4.3 Analiza variațiilor funcțiilor obiectiv după experimentările factoriale.....	141
4.3.1 Prezentarea generală a modelelor matematice (formule de corelație).....	142
4.3.2 Analiza diagramelor pareto și a suprafețelor de răspuns pentru funcțiile obiectiv care descriu secțiunea sudurii.....	146
4.4 Analiza modelelor logaritmice.....	162
4.5 Analiza variației randamentului de obținere a topiturii la sudare.....	165
4.6 Concluzii.....	168
5. Analiza suprafeței sudurilor.....	170
5.1 Analiza generală a suprafețelor sudurilor.....	170
5.2 Analiza craterul obținut la întreruperea procesului de sudare.....	174
5.2.1 Abaterea de la circularitate a craterului.....	176
5.2.2 Aria craterului.....	180
5.2.3 Adâncimea craterului	182
5.2.4 Raportului G între adâncimea craterului și profunzimea sudurii.....	184
5.3 Supraînălțarea sudurii.....	187
5.4 Analiza variației timpului de existență a băii de sudare.....	189
5.5 Determinarea experimentală a condițiilor de topire și de vaporizare.....	192
5.6 Iradierii statice ale piesei	195
5.7 Concluzii.....	198
6. Investigații asupra calității sudurilor.....	199
6.1 Analiza folosind Raze X a sudurilor.....	199
6.2 Analiza microstructurilor	203
6.2.1 Analiza microstructurilor la diferite mărimi și zone ale sudurii.....	204
6.2.2 Analiza microstructurilor pentru sudurile realizate la putere maximă.....	206
6.2.3 Analiza microstructurilor pentru sudurile realizate la viteza de sudare minimă.....	207
6.2.4 Analiza comparativă a microstructurilor sudurilor.....	209
6.3 Măsurători de duritate.....	213
6.4 Concluzii.....	218
7. Concluzii și contribuții personale.....	220
ANEXA 1. Mărimi fizice măsurate și calculate.....	226
A1.1 Mărimi măsurate și calculate pentru secțiunea prin sudură	226
A1.2 Mărimi măsurate și calculate pentru suprafața sudurilor.....	227
A1.3 Mărimi calculate care caracterizează sudurile.....	232
ANEXA 2 Prelucrări statistice ale datelor experimentale.....	233
A 2.1 Tabele ANOVA după analiza A1.....	233

A2.2 Tabele ANOVA după analiza A2.....	234
A2.3 Tabele ANOVA după analiza B1.....	235
A2.4 Tabele ANOVA după analiza B2.....	236
A2.5 Tabele ANOVA după analiza C1.....	236
A2.6 Tabele ANOVA după analiza C2.....	237
Referințe.....	239

Lista notațiilor și abrevierilor folosite

a	- difuzivitatea termică [m^2/s]
c	- Căldura specifică [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{K})$]
δ	- Defocalizarea (distanța dintre planul focal și suprafața piesei) [m]
t_p	- Timpul pulsului [s]
σ	- tensiunea indusă în material de un gradient termic [N/m^2]
λ	- Lungimea de undă a radiației laser [m]
θ	- Unghiul de divergență [rad]
θ_d	- Unghiul de divergență dat de teoria difracției [rad]
q_m^0	- Densitatea de flux termic necesară pentru realizarea topirii la suprafața materialului [W/m^2]
q_v^0	- Densitatea de flux termic necesară pentru obținerea propagării frontului de vaporizare în material [W/m^2]
ρ_g	- Densitatea vaporilor [kg/m^3]
ρ_l	- Densitatea metalului lichid [kg/m^3]
η_P	- Eficiența procesului de sudare [-]
η_A	- Eficiența datorată absorbției radiației [-]
η_{th}	- Eficiența termică [-]
ν	- Frecvența radiației laser [-]
abc	- Abaterea de la circularitate [%]
acr	- Aria craterului obținut la întreruperea procesului de sudare [m^2]
AT	- Aria topită, măsurată pe secțiunea transversală a sudurii [m^2]
b	- Alungirea craterului obținut la sfârșitul sudării [m]
BBP	- Caracteristica de producere a fascicolului laser [mm . mrad]
d	- Diagonala piramidei la încercarea Vickers [m]
D	- Diametrul fascicolului laser nefocalizat [m]
d	- Diagonala amprenteii la încercarea de duritate Vickers [m]
D_f	- Diametrul fascicolului laser în pata focală [m]
d_{\min}	- Diametrul minim al petei focale [m]
DOF	- Distanța pe care poate fi menținut diametrul minim al fascicolului laser relativ la direcția de propagare [m]
DR	- Duritatea relativă [%]
e	- Grosimea materialului [m]
E	- Energia corespunzătoare unui nivel energetic [J]
E_l	- Energia liniară [J/m]
E_p	- Energia pe puls [J]
F	- (LS/h) Raportul dintre lățimea sudurii și profunzimea sudurii [-]
f	- Distanța focală a lentilei [m]
G	- (i/h) Raportul dintre adâncimea craterului și profunzimea sudurii [-]
g	- Accelerația gravitațională [m/s^2]
h	- Profunzimea sudurii [m]
h	- Constanta lui Planck [J s]

I	- Intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei [W/m^2]
i	(I_{cr}) - Adâncimea craterului, obținut la sfârșitul procesului de sudare [m]
I_{abs}	- Partea absorbită din intensitatea fascicolului laser [W/m^2]
$i(r)$	- funcția de distribuție în spațiu (radială) a intensității fascicolului laser [W/m^2]
$I'(t)$	- funcția de distribuție în timp a intensității fascicolului laser
j_q	- Densitatea volumică de flux de căldură [W/m^3]
k	- Coeficientul de extincție al radiației [-]
k	- Conductivitatea termică [$W/(m \cdot ^\circ C)$]
K	- Randamentul de obținere a topiturii [%]
L	- Căldura latentă [J/kg]
L_x	- Căldura latentă pentru o transformare de fază particulară [J/kg]
L_I	- Căldura latentă pentru o transformare de fază integrală [J/kg]
$L_{I med}$	- Căldura latentă pentru transformarea de fază integrală dată de condițiile iradiere [J/kg]
L_0	- Conținutul de căldură, căldura latentă pentru încălzirea materialului la temperatura de topire și topirea acestuia [J/kg]
L_1	- Căldura latentă pentru aducerea materialului la temperatura de vaporizare [J/kg]
L_2	- Căldura latentă pentru aducerea materialului la temperatura de vaporizare și vaporizarea acestuia [J/kg]
LM	- Lățimea medie a sudurii [m]
LS	- Lățimea sudurii măsurată pe secțiune [m]
M^2	- Factorul de calitate al fascicolului laser [-]
n	- Indicele de refracție [-]
P	- Puterea (medie) fascicolului laser [W]
p_d	- Presiunea dinamică a topiturii [N/m^2]
p_g	- Presiunea gravitațională [N/m^2]
P_{min}	- Puterea minimă la care se poate realiza procesul de sudare [W]
p_r	- Presiunea de recul datorată vaporizării [N/m^2]
p_s	- Presiunea datorată tensiunii superficiale [N/m^2]
p_v	- Presiunea vaporilor [N/m^2]
p_t	- Presiunea statică indusă în material ca efect termic [W/m^2]
q	- Densitatea de flux termic [W/m^2]
q_m	- Densitatea de flux termic necesară atingerii temperaturii de topire la suprafața piesei [W/m^2]
q_v	- Densitatea de flux termic necesară atingerii temperaturii de vaporizare la suprafața piesei [W/m^2]
q_m^0	(q_m) - Densitatea de flux termic necesară pentru realizarea topirii la suprafața materialului și obținerii regimului de sudare prin conducție [W/m^2]
q_v^0	- Densitatea de flux termic necesară pentru obținerea propagării frontului de vaporizare în material, și obținerii regimului de sudare keyhole [W/m^2]
q_M	- Densitatea de flux termic necesară pentru obținerea propagării frontului de topire în material [W/m^2]
q_v	(q_v^0) - Densitatea de flux termic necesară pentru obținerea propagării frontului de vaporizare în material [W/m^2]
r	- Raport arbitrar care caracterizează producerea porilor [-]
r	- Raza fascicolului laser pe suprafața piesei [m]
R	- Coeficientul de reflexie [-]

10 Lista notatiilor și abrevierilor folosite

r_{med}	- Raza medie a craterului [mm]
Sc	Suprafața de coerență [m ²]
su	- Supraînălțarea sudurii [m]
t	- Timpul [s]
t	- Timpul de existență a băii de sudare [s]
T	- Temperatura [°C]
t	- Timpul [s]
t	- Timpul de existență a băii de sudare [s]
T ₀	- Temperatura inițială la suprafața materialului
t _{8/5}	- Timpul de coborâre a temperaturii de la 850 °C la 500 °C
T _i	- Temperatura inițială a piesei [°C]
T _m	- Temperatura de topire a materialului [°C]
t _i	- Timpul de interacțiune dintre radiația laser și material [s]
t _{is}	- Timpul de interacțiune relativ la diametrul petei formate de fascicolul laser la suprafața piesei [s]
t _p	- timpul pulsului , pentru iradierea laser în regim pulsat [s]
t _m	- timpul necesar atingerii temperaturii de topire la suprafața piesei [s]
t _v	- timpul necesar atingerii temperaturii de vaporizare la suprafața piesei [s]
u	- Viteza de propagare a frontului de transformare de fază în material [m/s]
u _n	- Viteza de propagare a frontului de încălzire în material [m/s]
u _m	- Viteza de propagare a frontului de topire în material [m/s]
v	- Viteza de sudare [m/s]
V	- Volumul de material [m ³]
V _{cr}	- Volumul craterului obținut la sfârșitul procesului de sudare [m ³]
vm	- Viteza de producere a topiturii [m ³ /s]
vv	- Viteza de vaporizare volumică [m ³ /s]
w	- Talia fascicolului laser [m]
w	- viteza de mișcare a topiturii în baia de sudare [m/s]
X	- Axa craterului pe direcția de sudare [m]
Y	- Axa craterului perpendicular pe direcția de sudare [m]
y	- Semi-lățimea maximului principal de difracție [m]
z	- Coordonata în profunzimea materialului [m]
z	- Distanța de propagare a căldurii în material
ε	- Eficiența la topirea materialului [m ³ /s]
Notății	
CEV	- Conținutul de carbon echivalent
F- Ratio	- Raportul pentru testul statistic Fisher
P-val	- Abatera de la medie
DF	- Numărul gradelor de libertate
R ²	- Coeficientul de corelație
R ² (adj. for d. f.)	- Coeficientul de corelație corectat pentru diferență
ICALAO	- Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics

Introducere

Lucrarea „Modelarea procesului de sudare laser în regim keyhole a materialelor metalice” reprezintă un studiu care ia în considerare atât aspectul fizic cât și cel tehnologic al sudării laser. S-au realizat sudurii pe plăci de oțel. În lucrare se prezintă fenomenele care au loc în procesul de sudare legate de vaporizarea puternică, fenomenul de keyhole și mișcarea topiturii în baia de sudare. Pe baza identificării acestora se va realiza o modelare analitică a procesului de sudare. Se studiază legătura între parametrii procesului de sudare în situația în care se consideră ca aspecte noi cele legate de materialul studiat și de variația distanței dintre planul focal al fascicolului laser și suprafața piesei (defocalizarea) ca factor care afectează sudura. Această parte a fost însoțită de modelare experimentală (modelare empirică). Legătura între cele două părți constă în faptul că valorile parametrilor procesului de sudare influențează fenomenele fizice care au loc în baia de sudare. În particular focalizarea fascicolului laser în interiorul piesei contribuie la creșterea absorbției radiației în material prin reflexii multiple în interiorul keyhole.

Dezvoltarea tehnologiilor în domeniul laserilor a condus la posibilitatea folosirii sistemelor tehnologice laser ca surse termice în procesele industriale. Principala caracteristică a fascicolelor laser care recomandă utilizarea acestora în procesele industriale este concentrarea energetică a acestei surse termice, reprezentată prin densități de flux termic mari. Acestea depășesc densitățile de flux termic produse arcul electric sau plasmă. Utilizarea sistemelor tehnologice laser în procesele de prelucrare prezintă flexibilitate prin posibilitatea de a realiza multiple aplicații folosind mediul ambiant ca mediu de lucru. Fascicolul laser este astfel folosit în aplicații ca sudare, tăiere, găurire, marcarea sau simpla încălzire. Domeniul acestor aplicații se poate împărți în două: procese care solicită puteri mici ale oscilatorului laser specifice industriei electronice și aplicații care solicită puteri mari ale oscilatorului laser specifice industriei constructoare de mașini. În cadrul acestora din urmă oscilatoarele laser cu CO₂ și Nd:YAG dețin aproape exclusiv piața. Apariția acestor surse integrate în sisteme tehnologice a făcut posibilă trecerea de la prelucrările laser ca aplicații de laborator care au apărut odată cu primii laseri la o dezvoltare industrială pe scară largă. În acest context apare sudarea laser ca proces tehnologic distinct.

În experimente s-au investigat comportarea la sudarea laser a unui oțel carbon care este recomandat pentru construcții sudate Dillimax 500. În acest fel se crește numărul materialelor a căror comportare la sudarea laser a fost studiată. În particular folosirea laserului cu Nd:YAG face ca aplicațiile de sudare efectuate să fie legate de acest tip de sursă laser a cărei apariției în industrie este mai recentă în comparație cu cea a laserilor cu CO₂. Importanța studiului crește prin utilizarea regimului de iradiere continuu CW. Acesta reduce numărul parametrilor care controlează direct intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei și timpului de interacțiune între radiația laser și material. Studiile în care se folosește laserului cu Nd:YAG în regim continuu. Experimentele au pus în evidență obținerea liberă a zonei topite în material pentru suduri și iradiere statice prin folosirea unui material gros și depătarea suficientă între încercări.

Experimentele au constat în realizarea de suduri (linii de fuziune) și de iradiere statice. Astfel s-a studiat separat efectul produs de intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei și cel datorat cazului în care apare efectul suplimentar al vitezei de sudare. Planurile experimentale au constat în experimentări de tip clasic (în care se variază un singur parametru) și experimente de tip factorial în cazul cărora se variază simultan mai mulți parametri. Parametrii variații la realizarea sudurilor au fost puterea, viteza de sudare și defocalizarea. Organizarea planurilor experimentale a fost de tip clasic și de tip factorial. În experimentările de tip clasic s-a variat puterea și viteza de sudare. În experimentările de tip factorial s-au variat puterea, viteza de sudare și defocalizarea. Pentru fiecare din acești factori au fost considerate două nivele. Mai multe funcții obiectiv mărimi măsurate și calculate au fost analizate. Pentru cele care prezintă cele mai importante caracteristici ale sudurii (grupul principal) analiza a fost extinsă. Pentru restul funcțiilor obiectiv analiza a fost selectivă. S-au urmărit acele analize care prezintă principalele variații. Variația după seriile experimentale clasice a funcțiilor obiectiv a fost studiată atât variația directă datorată puterii și vitezei de sudare cât și funcție de energia liniară, parametru calculat ca fiind raportul dintre putere și viteză. Introducerea acestui parametru a dus la cumulara serilor experimentale în care s-a variat puterea cu cele în care s-a variat viteza de sudare. Funcțiile de regresie realizate pentru variația în funcție de energia liniară au fost stabilite folosind mai multe date experimentale decât pentru stabilirea funcțiilor de regresie în cele două cazuri particulare în care s-au variat separat puterea și viteza de sudare.

Aspectul tehnologic a fost urmărit prin studiul parametrilor care caracterizează zona topită a sudurii (prin funcțiile obiectiv lățimea sudurii, profunzimea sudurii, aria topită). Calitatea sudurilor realizate a fost analizată prin fotografii în raze X, structuri metalografice și analiza durificării materialului în zona sudurii. Aspectul tehnologic a avut în vedere condițiile premergătoare realizării îmbinărilor sudate. Procesele fizice studiate s-au concentrat pe fenomenul de keyhole în sudarea laser. Studiul fenomenului keyhole a fost abordat transversal în lucrare el fiind discutat în toate analizele efectuate. Abordarea a fost una teoretică și experimentală. Partea teoretică a constat în identificarea fenomenelor fizice care duc la formarea keyhole. Acestea au fost încadrate într-o fenomenologie mai largă dată fenomenele termice și mecanice care apar în material datorită iradierii laser, în special a transformărilor de stare de agregare. Astfel se realizează o legătură între condițiile particulare în care apare keyhole. La nivel experimental s-a utilizat analiza sudurilor ca rezultat final al procesului de sudare. Fenomenul de keyhole a fost pus în evidență prin prezența porozităților și prin variația directă a caracteristicilor zonei topite exprimată explicit prin raportul F între lățimea și profunzimea sudurii. Pentru a obține cunoștințe despre procesul de vaporizare și mișcare a topiturii a fost realizat studiul suprafeței sudurii. Studiul suprafeței sudurilor aduce în discuție funcții obiectiv noi legate de dimensiunile și aria craterului care s-a obținut la sfârșitul procesului de sudare. S-a realizat astfel implicarea unor noi resurse de studiu. Astfel se arată că se pot obține informații despre keyhole nu numai din studiul sudurii în timpul procesului ci și prin studiul sudurilor.

Analiza variațiilor după planul experimentărilor factoriale a constat în realizarea de modele matematice tipice pentru ierarhizarea factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia. Formulele matematice folosite au tratat în mod egal contribuția factorilor de influență. Această abordare este specifică problemelor de ierarhizare a factorilor de influență. În urma analizelor defocalizarea a fost eliminată ca factor de influență care nu are o contribuție semnificativă la stabilirea valorilor funcțiilor obiectiv. Această eliminare a dus la refacerea analizelor după planul

factorial pentru variația puterii și vitezei. Utilizarea mai multor prelucrări ale datelor experimentale și tipuri de analiză a avut ca scop de a surprinde în variația funcțiilor obiectiv a unor aspecte particulare legate de fenomenul de keyhole în sudarea laser. Fenomenul de keyhole a stat la baza alegerii factorilor de influență (parametrii variației). Astfel s-au considerat un număr redus de factori de influență, trei, puterea, viteza și defocalizarea. Aceștia au permis o variație continuă și inițial din studiile altor autori a fost recunoscut efectul lor asupra procesului de sudare. Abordarea de acest tip este caracteristică unui proces tehnologic principal cunoscut și aplicat. Aspecte legate de fenomenul de keyhole și legătura acestuia cu parametrii de proces reprezintă punctul necunoscut. Acesta a fost urmărit prin punerea în evidență a unor aspecte particulare ale variațiilor care pot fi legate de fenomenul de keyhole.

La studiul sudurilor au fost analizate secțiunea prin suduri și suprafața sudurilor. Rezultatele experimentale au fost interpretate din punct de vedere fenomenologic. Complementar s-a realizat un studiu al afectării structurii materialului folosind metode de analiză metalografică (fotografii în raze X, fotografia microstructurilor, analiza durtății sudurii).

În Capitolul 1 se prezintă problematica din sudarea laser cu aplicație în sudarea laser a metalelor. Se începe cu proprietățile radiației laser și caracterizarea laserilor industriali care conduc la folosirea acestora ca surse termice. Sunt prezentate condițiile în care se realizează sudarea laser și aplicațiile industriale ale acesteia. Sunt definite și descrise regimurile de sudare. Accentul se pune pe formarea keyhole în baia de sudare și fenomenele fizice care se produc aici cu consecințe asupra caracteristicilor sudurii. Cercetările în sudarea laser sunt prezentate urmând două direcții, prima îndreptată asupra procesului de sudare, efectuate în timpul procesului unde obiectul principal de studiu este keyhole și baia de sudare iar cealaltă către sudura realizată unde obiectul de studiu este reprezentat de caracteristicile sudurii și prezența porozităților în aceasta. Partea de modelare se asociază cercetărilor experimentale. Pe de o parte există modelarea analitică în care se face puternic simțită prezența metodelor numerice. Pe de altă parte apare modelarea experimentală. Aceasta consideră experimentări în care se variază un singur parametru, de tip clasic și experimentări de tip factorial în care se variază simultan mai mulți parametri. Modelarea prezintă cazuri simple în care rezultatele experimentale sunt prezentate folosind funcții de regresie și interpolare cu funcții spline până la cazuri în care se efectuează analiza statistică a variațiilor. Pe baza celor enumerate anterior se definesc obiectivele lucrării.

În Capitolul 2 se propune analiza fenomenelor fizice care conduc la topirea și vaporizarea materialului. Se prezintă succesiunea fenomenelor fizice care conduc la realizarea sudurii într-un mod coerent care să elimine considerarea de multiple posibilități specifice fiecărui fenomen fizic în parte. Scopul acestei abordări este de a crea un cadru teoretic specific problemelor studiate în experimente. Pe de altă parte se creează multiple perspective și direcții de studiu. Din aceste numai o parte vor fi folosite la interpretarea rezultatelor experimentale. Capitolul 2 are o parte teoretică generală urmată de o parte de aplicații ale modelelor propuse.

La iradierea laser a materialelor apar fenomene fizice legate de absorbția radiației laser, încălzirea materialului transformări de fază, reacții chimice și mișcarea topiturii și vaporilor. La organizarea unui proces tehnologic intervin două aspecte legate de fenomenele fizice care apar. Primul dintre acestea îl reprezintă aspectul de selecție asupra fenomenelor fizice în sensul că numai anumite fenomene fizice influențează semnificativ procesul. Acestea pot fi descrise cantitativ legat de

parametrii de proces. Al doilea aspect îl constituie cel de organizarea logică a abordării în care se ordonează fenomenele fizice considerate semnificative. Această abordare este total diferită de cea în care se studiază experimental sau prin modelare un anumit fenomen fizic obținând rezultate particulare, fără a avea intenția de a le integra în ansamblul general al procesului. Cercetarea teoretică vine în completare cele experimentale. Cercetarea experimentală realizează modele empirice care corelează valorile factorilor de influență cu valorile funcțiilor obiectiv. Între factorii de influență și funcțiile obiectiv este un aspect de „black box”. Studiul teoretic și modelarea analitică completează acest aspect de cutie neagră. De asemenea validează calitativ și cantitativ parametrii variației și alegerea mărimilor măsurate. Acestea se vor exprima ca factori de influență respectiv funcții obiectiv. Modelele realizate se vor compara cu rezultatele experimentale. Ca probleme prioritare se vor modela matematic condițiile de propagare a frontului de topire în material și separația între regimurile de sudare. Prin parcurgerea acestui capitol se creează o mai bună perspectivă în înțelegerea condițiilor experimentale care au fost considerate la cercetările experimentale prezentate în Capitolul 3 și a rolului funcțiilor obiectiv.

În Capitolul 3 sunt prezentate cercetările experimentale efectuate. Partea principală a acestora a constat în realizarea de sudurii (linie de fuziune) pe plăci de oțel cu grosimea de 10 mm. Sunt prezentate pe rând condițiile de realizare a sudurii, materialul folosit în experimentări, planul experimental și mărimile fizice care caracterizează condițiile de iradiere pentru fiecare încercare în parte. Se prezintă metodele de măsurare pentru funcțiile obiectiv studiate. Sunt prezentate metodele de analiză a rezultatelor experimentale și se definesc direcțiile de cercetare. S-au separat cele două direcții de cercetare asupra secțiunii transversale a sudurii și asupra suprafeței sudurii. Fiecare din acestea a fost dezvoltată separat în capitolele următoare.

În Capitolul 4 sunt analizate funcțiile obiectiv care caracterizează secțiunea sudurii. Acestea sunt lățimea sudurii, profunzimea sudurii, raportul de formă (definit ca raportul dintre lățimea sudurii și profunzimea sudurii) și aria zonei topite măsurate pe secțiunea sudurii. Se prezintă variația acestor funcții obiectiv pe baza seriilor experimentale clasice în funcție de putere, viteza de sudare și energia liniară. Aceste variații au fost modelate folosind funcții de regresie. Experimentările factoriale au arătat efectul produs asupra funcțiilor obiectiv de către putere, viteză și defocalizare și de interacțiunile dintre acești factori. S-au realizat modelări experimentale de tip polinomial și logaritmic. Pe baza măsurătorii ariei topite s-a calculat randamentul de obținerea a topiturii.

În Capitolul 5 este analizată suprafața sudurii. Pentru lățimea sudurii se prezintă comparativ variațiile pentru lățimea măsurată în dreptul secțiunii și o valoare medie a măsurătorilor în puncte diferite de-a lungul sudurii. Se studiază și supraînălțarea sudurii în dreptul zonei în care s-a efectuat secțiunea prin piesă. Analiza se concentrează asupra craterului care se obține la sfârșitul procesului de sudare. De acesta se leagă un interes teoretic deosebit deoarece oferă informații despre baia de sudare și despre vaporizarea materialului iradiat. S-au măsurat trei mărimi liniare care dau forma craterului pe suprafața piesei. Valorile acestora au fost folosite la calculul unei mărimi denumite abaterea de la circularitate a craterului. S-a analizat aria craterului și adâncimea craterului și raportul dintre adâncimea craterului și profunzimea sudurii. Pentru aceste mărimi s-au analizat variațiile în funcție de putere și viteză după seriile experimentale clasice și efectul puterii, vitezei de sudare și defocalizării după planul experimental factorial. Se prezintă pe larg rezultatele experimentale obținute prin efectuarea de iradieri statice

asupra pieselor folosind aceiași parametrii care au fost folosiți la realizarea sudurilor.

În Capitolul 6 au fost abordate probleme legate de structura materialului. S-a efectuat fotografierea în raze X a plăcilor pe care au fost realizate sudurile. Radiografiile au arătat prezența porozităților. Porozitățile au fost asociate cu regimul de sudare keyhole și cu suduri puternic penetrate. S-au realizat fotografii ale microstructurilor sudurii. S-a pus în evidență modificarea structurii materialului în zona topită și în zona influențată termic. S-a observat prezența porozităților în sudură și a liniilor de fisură la centrul sudurii. Pe sudurile la care s-au folosit regimuri de iradiere extreme s-au realizat măsurători de duritate. Măsurătorile au fost realizate transversal pe secțiunea sudurii cuprinzând materialul de bază, zona influențată termic, marginea zonei topite a sudurii și centrul sudurii, de asemenea s-au efectuat măsurători în profunzime la centrul sudurii. S-a observat durificarea materialului în zona sudurii.

În Capitolul 7 se prezintă rezultatele obținute. S-a efectuat o analiză globală a rezultatelor obținute. Acestea au pus în evidență aspecte privind fenomenele fizice care au loc în baia de sudare și legătura acestora cu parametrii de proces. Se identifică soluții tehnologice pentru aplicații practice ale sudării laser. Se arată modul în care au fost urmărite și realizate obiectivele propuse ale lucrării. Se indică perspectivele pentru cercetarea în sudarea laser pe baza cercetărilor teoretice și experimentale propuse în lucrare.

1. Metode de investigare și modelare a sudării laser în regim keyhole („gaură de cheie”)

1.1 Utilizarea radiației laser la prelucrarea materialelor

1.1.1 Definierea, propagarea și focalizarea radiației laser

În viziune modernă conceptul de LASER este definit la trei nivele distincte:

- ca fenomen de emisie stimulată a luminii finalizat prin generarea unui fascicul laser;
- ca dispozitiv electrono-optic capabil să emită un fascicul de radiație electromagnetică monocromatică, coerentă și puternic direcționată;
- ca sistem tehnologic capabil să intergreze fasciculul laser emis de un generator laser într-un proces tehnologic de prelucrare a materialelor.

Apariția sistemelor tehnologice laser a fost posibilă datorită dezvoltării teoretice a fizicii la începutul secolului XX. Dintre acestea menționăm revenirea la teoria corpusculară a luminii de către Einstein și introducerea quantelor de către Planck. Einstein a studiat termodinamica fotonilor și a arătat posibilitatea obținerii emisiei stimulate. Aceasta vine în opoziție cu emisia spontană a surselor de radiație clasice. În 1940 Fabricant a propus în studii teoretice ideea de inversie de populație. Între anii 1950-1960 s-a pus bazele teoretice ale amplificării radiației de către Towners și Schawlow. S-au realizat atât în U.S.A cât și în U.R.S.S. primele dispozitive Maser (microwave amplifier by stimulated emission of radiation), acestea amplificau radiația din domeniul microundelor [Ion, 2005].

Primul oscilator laser funcțional a fost laserul cu rubin realizat de către Maiman în 1960. S-a pentru excitarea mediului o lampă cu Neon cu emisie discontinuă (flash lamp) care emite în impulsuri. Ali Javan a realizat în decembrie 1960 laserul cu He-Ne. Acesta emite în regim continuu și folosește pentru excitare descărcarea electrică în mediu gazos. Oscilatorul laser cu He-Ne a devenit în scurt timp primul laser comercial cu o putere de 1mW. Oscilatorul laser cu CO₂ a fost realizat de Kumar Patel în 1964 la laboratoarele Bell. Acesta avea montajul „slow axial flow” și avea o putere de 1mW. Puterea oscilatoarelor laser cu CO₂ a crescut rapid. Această creștere a fost realizată crescând lungimea tubului. După 1970 s-a îmbunătățit principial oscilatorul laser cu CO₂ prin introducerea curgerii transversale și a modalităților de excitație transversală și volumică a gazului. Pe baza acestor principii s-au dezvoltat oscilatoare laser cu CO₂ cu puteri de până la 100 kW. Sisteme tehnologice laser cu CO₂ au ocupat locul principal în prelucrarea materialelor cu laser.

În anii 1980 au apărut în cadrul oscilatoarele laser cu mediu solid, oscilatoarele laser cu Nd:YAG în regim pulsant. Acestea au ajuns până în 1988 la până la puteri de 1kW. Comparativ cu oscilatoarele laser cu CO₂ oscilatoarele laser cu Nd: YAG permit utilizarea unei părți optice mai flexibile prin folosirea fibrelor optice în locul oglinzilor însă rezultă o calitate mai slabă a fascicolului laser.

Eficiența la transformarea energiei este mai mică de 5% pentru oscilatoarele laser cu Nd:YAG. În 1997 Trumpf și Lumonics au dezvoltat un oscilator laser cu Nd:YAG de 4kW cu emisie în undă continuă. Până la sfârșitul anilor 90 era disponibil un astfel de oscilator laser cu putere de 10kW în undă continuă. Oscilatoarele laser cu Nd:YAG au început să înlocuiască pe cel cu CO₂ ca surse laser principale în prelucrarea materialelor. După anul 2000 s-a realizat folosirea diodelor laser pentru realizarea pompajului optic în locul lămpilor. S-a realizat de asemenea construcția oscilatoarelor laseri cu discurilor. Prin acestea s-a realizat o puternică dezvoltare puternică a oscilatoarelor laser cu Nd:YAG. [Ion, 2005].

La folosirea sistemelor tehnologice laser în procesele de prelucrare se remarcă următoarele:

- varietatea tipurilor de oscilatoare laser folosite, acestea pot fi clasificate după mediul activ (gaz, lichid sau solid), putere, energie și mod de operare.
- varietatea materialelor prelucrate: metale și aliajele acestora, ceramică și sticlă, polimeri și materiale compozite.
- modul de interacțiune dintre radiație și material. Se remarcă două tipuri de interacțiuni. Interacțiunea de tip termic constă în transferul de căldură între radiație și material. Procesarea termică a materialelor se referă la fenomenele fizice de încălzire topire și vaporizare. Interacțiunea de tip atermic se referă schimbări la scară atomică produse în material. Procesarea atermică se referă la realizarea sau ruperea legăturilor chimice.

Primele sudări laser au fost realizate în jurul anului în jurul anului 1963 de către Platte și Smith în jurul anului 1963. Acestea au fost realizate folosind un sistem tehnologic laser cu Rubini pe oțel inox cu grosimea de 0.25 mm. Au fost efectuate suduri cap la cap și în muchie. În această perioadă s-au dezvoltat aplicațiile de sudare în electronică. Acestea necesitau topiri mici și precise. Suduri în regimul de conducție au fost prezentate pentru metale de Fairbanks în 1964. Acestea au fost aplicate pentru fire și table subțiri. În acea perioadă se considera că limita de penetrare maximă care putea fi atinsă era de 0.5 mm. În aprilie 1970 Martin Adams a prezentat secțiuni ale sudurilor în oțel cu grosimea de 1.5 mm folosind un oscilator laser cu CO₂. Sudurile nu se deosebeau de cele realizate cu fascicolul de electroni deoarece prezentau regimul de sudare keyhole. Regimul de sudare keyhole constă în producerea unei cavității cu vapori care penetrează materialul. În practică se foloseau două treceri pentru realizarea sudurii. La prima trecere se oxida suprafața oțelului iar la a doua se realiza sudarea propriu-zisă. În 1977 Anon a realizat sudarea folosind un oscilator laser cu CO₂ a unui oțel cu grosimea de 50mm realizând o penetrare completă. S-a dovedit astfel posibilitatea sudării cu laser a materialelor groase utilizând regimul de sudare keyhole. Începând cu anul 1975 firma Fiat a introdus sisteme tehnologice laser cu CO₂ cu curgere transversală în procesul industrial de la sudarea de componente ale automobilelor. În prezent cercetările în sudarea se concentrează asupra descoperirii/punerii la punct de noi proceduri de sudare pentru oțeluri și pentru aliaje ușoare de aluminiu, magneziu și titan. De asemenea, se cercetează și sudarea hibridă în care alături de fascicolul laser apare și o sursă secundară de căldură și anume arcul electric. [Ion, 2005].

Oscilatorul laser realizează emisia stimulată a radiației electromagnetice. Schema unui oscilator laser cu mediu solid este prezentată în figura 1.1. Acesta este format din mediul solid în care se realizează emisia și amplificarea radiației electromagnetice, sistemul de pompaj (de obicei se folosesc lămpi cu emisie în impulsuri), sistemul de răcire și cavitățile optice. Pompajul optic realizează inversia de populație în mediu solid, radiația emisă la relaxarea sistemului este amplificată în

cavitatea optică. Prin oglinda din față care este semitransparentă se obține fascicolul laser. În cele ce urmează se va prezenta din punct de vedere calitativ caracteristicile fizice ale radiației emise de oscilatorul laser.

Monocromaticitatea Frecvența emisă de oscilatorul laser este dată de diferența de energie între nivelele energetice între care are loc emisia radiației. Aceasta este dată de relația lui Planck:

$$\nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \text{ [Hz]} \quad (1.1)$$

h- constanta lui Planck

E2- energia nivelului superior; E1 – energia nivelului inferior [J]

Cele două nivele energetice între care are loc emisia radiației laser sunt stabile. Astfel o singură frecvență este emisă și amplificată în cavitatea optică. Aceasta înseamnă că radiația laser are o singură lungime de undă. Aceasta înseamnă că radiația emisă de laser este monocromatică. Oscilatorul laser cu Nd:YAG emite radiație cu lungimea de undă de 1.06 μm .

Coerența . Coerența radiației electromagnetice înseamnă menținerea constantă a diferenței de fază între două puncte ale frontului de undă. Coerența este de două tipuri: spațială și temporală. Coerența spațială este limitată la o anumită suprafață iar coerența temporală este limitată la un anumit interval de timp. Radiația laser prezintă coerență spațială și temporală ridicată în comparație cu sursele clasice.

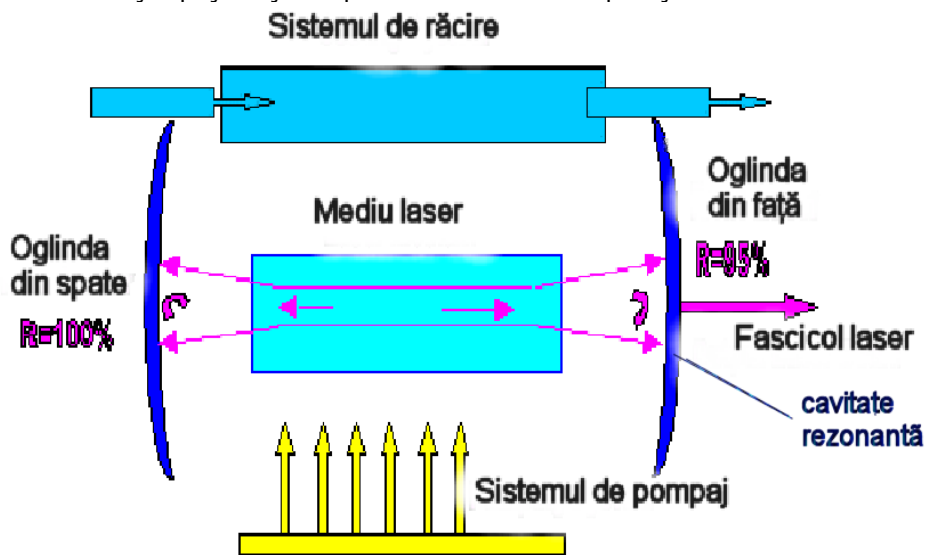


Figura 1.1 Schema de principiu a unei surse laser cu mediu solid

Divergența și direcționalitatea Propagarea radiației și direcționalitatea acesteia este descrisă de teoria difracției. Maximul intensității radiației este delimitat de unghiul de divergență.

În mediul activ al oscilatorului laser va fi amplificată numai radiația care se propagă pe axa cavității optice. Construcția cavității optice conduce la obținerea unei divergențe mici a fascicolului ceea ce înseamnă o direcționalitate ridicată.

Pentru o radiație perfect coerentă spațial de apertură D va exista un unghi de divergență dat de teoria difracției. Unghiul de divergență este dat de relația :

$$\theta_d = \beta \cdot \frac{\lambda}{D} \text{ [rad]} \quad (1.2)$$

$\beta = 1.1$ Reprezintă un factor de proporționalitate

Dacă radiația este parțial coerentă unghiul de divergență este mai mare , diametrul aperturii fiind înlocuit cu rădăcina pătrată a suprafeței de coerență.

$$\theta_d = \beta \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{Sc}} \text{ [rad]} \quad (1.3)$$

Strălucirea Strălucirea unei surse de lumină se definește ca puterea emisă pe unitatea de suprafață și unitatea de unghi solid.

$$B = \frac{4P}{(\pi D\theta)^2} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (1.5)$$

Strălucirea maximă obținută în cazul în care radiația emisă este coerentă spațial.

$$B = \frac{4P}{(\pi \lambda \beta)^2} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (1.6)$$

Modurile electromagnetice reprezintă undele staționare care se formează în cavitatea optică. În cavitatea optică radiația stimulată se propagă între oglinzi. Undele pentru care distanța de propagare (dublul lungimii cavității) sunt număr întreg de lungimi de undă devin unde staționare în cavitate. Acestea sunt numite moduri electromagnetice longitudinale. Numărul acestora este relativ redus (sub 10), între acestea este o diferență în frecvență. Importanța deosebită în practică o are distribuția intensității radiației în secțiunea fascicolului laser perpendiculară pe direcția de propagare. Aceasta este dată de modurile electromagnetice transversale $TEM_{p,q}$. Indicii au următoarea semnificație p semnifică numărul câmpurilor radiale, l semnifică numărul câmpurilor unghiulare, q reprezintă numărul modurilor longitudinale. Indicele q se exclude, se consideră un singur mod longitudinal, astfel discuția se reduce la primii doi indici. Modul electromagnetic TEM_{00} este numit modul fundamental. Modul fundamental are cea mai ridicată intensitate și oferă cele mai bune proprietăți de focalizare. El se mai numește și modul Gaussian deoarece distribuția intensității urmează curba lui Gauss, un maxim puternic urmat de o scădere exponențială a intensității. Fascicolul laser este caracterizat de modurile electromagnetice $TEM_{p,q}$. Fascicolul laser care prezintă modul TEM_{00} este numit și fascicol monomod . Fascicolele care prezintă alte moduri electromagnetice se numesc multimod. Structura modală a fascicolului laser se asociază cu distribuția intensității în secțiunea acestuia. Distribuția intensității spațiale a fascicolului laser monomod respectiv multimod este prezentată în figura 1.2 Calitatea fascicolului laser este dată de parametrul BBP (beam product propriety). Acesta este definit ca produsul dintre talia fascicolului nefocalizat și unghiul de divergență θ [Nichici, 2004]

$$BPP = w \cdot \theta \quad \text{[mm mrad]} \quad (1.7)$$

Factorul M^2 se definește ca fiind raportul dintre parametrul BPP pentru fascicolul dat și parametru BPP pentru fascicolul gaussian care are cea mai mică divergență. Fascicolul laser produs de sisteme tehnologice laser cu mediu solid este de tip multimod. Factorul M^2 ajungând până la valori de 50. Raza sau diametrul fascicolului laser este o mărime definită ulterior care desemnează o suprafață circulară în care este concentrată cea mai mare parte a intensității fascicolului laser. Pentru fascicolul Gaussian se consideră zona în care intensitatea fascicolului laser a scăzut de $1/e^2$ ori.

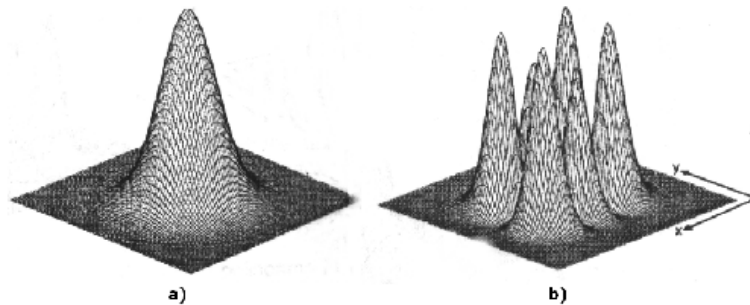


Figura 1.2 Profilul intensității fascicolului laser pentru a) fascicolul monomod și b) fascicolul multimod după [Dumitraș, 2006]

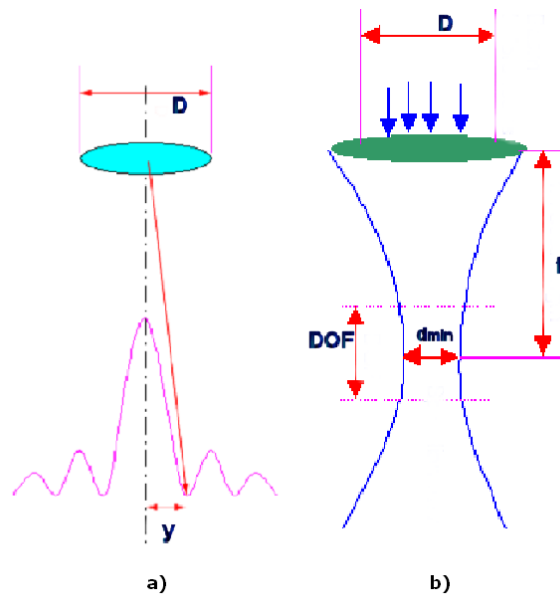


Figura 1.3 Focalizarea fascicolului laser
a) Maximul de difracție, b) Profilul fascicolului

Fascicolul laser este focalizat pe suprafața piesei de prelucrat cu ajutorul unei lentile cu distanța focală f . În pata focală se atinge maximul de intensitate. Intensitatea maximă care se poate obține are importanță în prelucrarea materialelor. Focalizarea produce simultan și interferența radiației Focalizarea unui fascicol Gaussian produce un maxim de intensitate care conține 86% din

intensitatea fascicolului laser. În figura 1.3 se prezintă caracteristicile fascicolului laser focalizat.

Pentru un fascicol circular nefocalizat Gaussian diametrul minim al petei focale care poate fi obținut este dat de relația :

$$d_{\min} = 2.44 \frac{\lambda}{D} \text{ [mm]} \quad (1.8)$$

(Factorul 2.44 provine din formula de la difracția Fraunhofer) Pentru un fascicol multimod TEM_{pl} este dat de relația:

$$d_{\min} = 2.44 \frac{\lambda(2p+l+1)}{D} \text{ [mm]} \quad (1.9)$$

Se observă că posibilitățile de focalizare ale fascicolului multimod sunt mai limitate decât a celui monomod.

Alături de diametrul minim la care poate fi focalizat fascicolul prezintă importanță și profunzimea minimă pe care această distanță de focalizare poate fi menținută. Profunzimea de defocalizare DOF este dată de propagarea fascicolului laser. Focalizarea produce o propagare convergentă urmată de una divergentă a fascicolului laser. DOF se definește ca distanța pe care diametrul minim al fascicolului se menține constant (în limitele unei creșteri de 5% față de diametrul minim). Pentru un fascicol Gaussian aceasta este dată de relația:

$$DOF = \left(\frac{8\lambda}{\pi} \right) \left(\frac{f}{D} \right)^2 = 2.44 \cdot \left(\frac{f}{D} \right)^2 \text{ [mm]} \quad (1.10)$$

Se observă că DOF și d_{\min} sunt proporționale. Aceasta înseamnă că focalizarea într-o pată mică conduce automat la scăderea profunzimii pe care acesta poate fi focalizat. Pentru a scădea diametrul petei focale se folosește expandarea fascicolului laser [columbia.edu].

Intensitatea fascicolului laser are o distribuție complexă în spațiu datorită modurilor electromagnetice transversale și în timp datorită regimului de iradiere pulsant (cu diferite forme ale pulsului) sau continuu. Pentru formularea efectelor termice produse de fascicolul laser asupra materialelor este necesară o formulare simplificată. Aceasta constă în separarea variației spațiale de cea temporală, cele două fiind considerate independente de asemenea se va limita discuția pentru fascicolul laser multimod.

1.1.2 Interacțiunea dintre radiația laser și material

Interacțiunea dintre radiație și substanță produce modificări în ambele medii. Radiația este absorbită total sau parțial. O parte din intensitatea fascicolului laser incident este absorbită în material și produce două tipuri de efecte: efecte termice și efecte atermice. Prin efecte termice se înțelege încălzirea materialului și înțelege încălzirea materialului și transformările de fază din material. Efectele atermice constau în ruperea legăturilor chimice. Restul radiației se regăsește sub formă de radiație transmisă sau reflectată specular sau difuz. Interacțiunea dintre fasciculele laser și substanță are următoarele particularități:

- efectele termice induse în material sunt de amploare datorită intensității fascicolului laser ridicate;

- există o interacțiune multiplă a fascicolului laser cu materialul solid cu topitura, vaporii și plasma, în zona de interacțiune apar simultan mai multe faze datorate efectelor termice care participă la interacțiune.

Interacțiunea radiației cu materialul prezintă două situații distincte. La iradierea mediilor transparente și semitransparente absorbția are loc în profunzimea materialului, intensitatea radiației transmise în material scade exponențial după legea Beer-Lambert. Se dezvoltă o sursă termică volumică în material. La iradierea materialelor opace absorbția are loc în stratul de la suprafața materialului. Se formează o sursă termică la suprafața materialului.

Metalele sunt opace la lungimile de undă emise de oscilatoarele laser cu CO₂ și Nd:YAG. Metalele fiind opace o parte din intensitate incidentă a fascicolului laser este reflectată (caracterizată de coeficientul de reflexie R[-]), iar altă parte din intensitatea incidentă este absorbită (caracterizată de coeficientul de absorbție A[-]). Între cele două există relația :

$$A + R = 1 \quad (1.11)$$

Valoarea coeficientului de absorbție A[-] (absorbivității) pe domeniul spectral în care emit oscilatoarele laser pentru metale și materiale organice este prezentată în figura 1.4

Absorbția radiației laser pentru metale are loc pe electronii liberi din metal. Timpul de răcire al electronilor este de ordinul 1ps. Apoi energia este transmisă sistemului electronic și apoi rețelei cristaline a materialului. Predicția teoretică a coeficientului de absorbție este realizată de modelul lui Drude pentru metale [Ursu,1986]. Se consideră absorbția radiației datorită atenuării mișcării electronilor în material. Se realizează astfel legătura între coeficientul de absorbție și rezistivitatea materialului. Modelul nu este însă aplicabil pentru temperaturii mari când evident participă semnificativ la oscilații și nodurile rețelei metalice. În această situație pentru temperaturi mari ale suprafeței iradiate datele cele mai de încredere sunt furnizate de cercetări experimentale. Acestea au la bază studiul radiației reflectate în timpul proceselor de prelucrare laser. Trebuie cunoscute următoarele: Coeficientul de absorbție adimensional se aplică numai intensității fascicolului laser, și nu altor mărimi care caracterizează iradierea. Întotdeauna există radiație reflectată. În timpul unui proces de prelucrare laser pe lângă radiația direct reflectată (monocromatică) există și radiația emisă de suprafața topită a materialului care are un spectru larg.

Studiile experimentale au arătat că coeficientul de absorbție pentru metalul topit se apropie de 90% în timp ce pentru materialul solid este de aproximativ 10%. Experimental s-a arătat că iradierea în metalul topit conduce la o creștere a coeficientului de absorbție, radiația laser fiind absorbită aproape în totalitate în material. În acest caz cresc și pierderile de căldură prin radiație, care uneori nu sunt considerate în calculele termice. Astfel efectele de creștere a absorbției și pierdere prin radiație se compensează referitor la cantitatea obținută de topitură și vapori. La intensități mari de 10⁶ W/cm² o scădere a intensității de 10 ori menține efectele termice (de topire și vaporizare) în același domeniu. Rolul principal în caracterizarea absorbției radiației electromagnetice îl va avea intensitatea fascicolului laser. Experimental s-a arătat că radiația cu lungimea de undă mai mică este mai ușor absorbită de metale. Astfel se obțin rezultate mai bune la prelucrarea metalelor folosind laserul cu Nd:YAG decât la folosirea laserului cu CO₂.

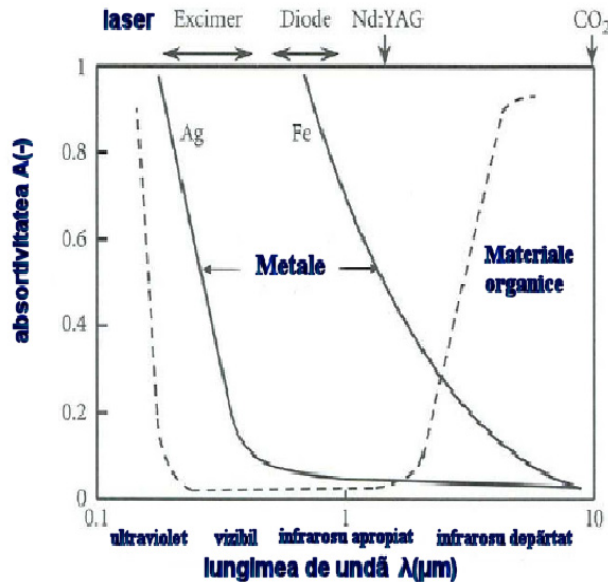


Figura 1.4 Variația coeficientului de absorbție în funcție de lungimea de undă Pentru metale și materiale organice după [Ion, 2005]

Trebuie realizată distincția între absorbția radiației laser în material și cuplajul radiației laser în material prin intermediul unui anumit fenomen termic. Cuplajul radiației în material este o problemă de modelare care în principiu ignoră mecanismul fizic de transformare a radiației electromagnetice în căldură. Astfel, ideea de a considera procentual părți din intensitatea fascicolului laser care întrețin fenomenele de vaporizare, convecție (mișcarea topiturii), și conducție apare în lucrarea [Semak, 1997]. Din punctul de vedere al sudării laser este important cuplajul energetic al radiației laser în material relativ la producerea de topitură.

Partea din intensitatea fascicolului laser absorbită folosită la producerea de topitură se situează în jurul valorii de 10 % din intensitatea fascicolului laser, fiind comparabilă cu absorbția metalului neîncălzit. Coeficientul de absorbție este mai ridicat pentru metalul topit decât pentru cel solid.

Producerea de topitură este însoțită de pierderi energetice prin:

- conducție în materialul solid ;
- convecție datorată mișcării topiturii în baia de sudare;
- radiația termică emisă de baia de sudare
- vaporizarea materialului și mișcarea vaporilor.

Pierderile de căldură prin radiație sunt importante pentru temperaturile ridicate ale suprafeței băii de sudare. Aceasta depășește în general temperatura de vaporizare. Creșterea puternică a temperaturii suprafeței metalului peste temperatura de vaporizare este un fenomen tranzitoriu și instabil, vaporizarea este însoțită de descreșteri la fel de puternice ale temperaturii suprafeței odată cu emisia vaporilor.

Pentru materiale opace absorbția radiației are loc la suprafața materialului fiind însoțită de reflexia radiației (reflexia Fresnel). O parte din intensitatea radiației este absorbită iar restul este reflectată. Pentru incidența normală coeficienții de reflexie și absorbție sunt dați de relațiile lui Fresnel:

$$R = \frac{(1-n)^2 + k^2}{(1+n)^2 + k^2} \quad [-] \quad (1.12)$$

$$A = 1 - R = \frac{4n}{(1+n)^2 + k^2} \quad [-] \quad (1.13)$$

unde :

n- indicele de refracție [-]

k- coeficientul de extincție a radiației [-]

Pentru metale indicele de refracție (complex) și coeficientul de extincție se determină prin reflexia radiației polarizate [Jenkins, 1981]. În tabelul următor sunt redată valorile mărimilor care intervin în relațiile anterioare pentru radiația de 1.06 μm, emisă de oscilatoarele laser cu Nd:YAG: Din tabelul 1.1 se observă că fierul are un coeficient de absorbție ridicat astfel acesta se poate prelucra ușor folosind un sistem tehnologic laser cu Nd:YAG. De asemenea se observă un coeficient de absorbție scăzut pentru cupru.

Tabel 1.1 Constante optice ale metalelor pentru radiația de 1.06 μm

Metalul	k [-]	n [-]	R[%]	A[%]	Metalul	k [-]	n [-]	R[%]	A[%]
Al	8.50	1.75	91	9	Pb	5.40	1.41	84	16
Cu	6.93	0.15	99	1	Ti	4	3.8	63	37
Fe	4.44	3.81	64	36	W	3.52	3.04	58	42
Mo	3.55	3.83	57	43	Zn	3.48	2.88	58	42
Ni	5.26	2.62	74	26	Sn	1.60	4.70	46	54

1.1.3 Sisteme tehnologice laser pentru sudare

Principalele sisteme tehnologice laser utilizate la prelucrarea materialelor sunt sistemele tehnologice laser cu CO₂ respectiv sistemele tehnologice laser cu Nd:YAG. Acestea sunt capabile să dezvolte intensități ridicate necesare pentru prelucrări termice ale materialelor.

Mediul activ la un oscilator laser cu CO₂ este un amestec din următoarele gaze CO₂ (6%), N₂(20%), și He (74%). CO₂ este gazul activ, prin excitarea și dezexcitarea moleculelor acestuia se emite o radiație cu lungimea de undă de 10.6 μm datorită tranziției între nivelele energetice corespunzătoare pentru două moduri de vibrație. Excitarea mediului activ este realizată prin descărcarea electrică în gaz. Sunt folosite următoarele tehnologii pentru construcția cavității rezonante:

- mediu închis, se ating puteri până la 100 W, puteri mici;

- mediu deschis cu recircularea gazului, pentru care se pot atinge puteri mari.

Există două tipuri de recirculare a gazului axială și transversală. Recircularea axială are loc pe direcția câmpului electric produs între anod și catod iar recircularea transversală (TEA) are loc pe o direcție perpendiculară pe direcția câmpului electric. Curgerea axială lentă a gazului permite realizarea de puteri medii până la aproape de 1kW. Curgerea axială rapidă mărește nivelul de putere până la câțiva kW. Curgerea transversală a gazului permite realizarea de puteri peste 10kW. În toate cazurile este necesară înlocuirea periodică a gazului care reprezintă mediul activ deoarece acesta suferă transformări chimice care afectează capacitatea de a obține emisia stimulată a radiației.

Oscilatorii laser cu CO₂ a căror funcționare este în regim continuu pot fi clasificați în modul următor:

- **oscilatori laser CO₂ de putere mică (3-100W)** Aceștia sunt de tip tub sau ghiduri de unde, radiația este de tip monomod transversal. Ca aplicații sunt folosiți la dispozitive de control, în scopuri științifice și medicale.

- **oscilatori laser CO₂ de puterii intermediare (300-3000W)** Pentru curgerea axială lentă se pot atinge puterile de 900 W, radiația de obicei monomod sau apropiată de monomod, diametrul fascicolului nefocalizat 6-20 mm, stabilitatea în putere $\pm 2\%$, posibilitatea de modulare a fascicolului în regim pulsant cu diferite forme ale pulsului, divergența fascicolului 1-3 mrad. (curgerea axială lentă consideră viteza de curgere a gazului mai mică decât 5 m/s iar curgea rapidă consideră viteza gazului până la 150 m/s. Utilizarea principală a acestor oscilatori laser este la prelucrarea materialelor.

- **oscilatorii laser cu CO₂ de mare putere.** Curgerea axială rapidă asigură puterile de până la 6kW iar curgerea transversală puteri peste 5kW până la 100kW. Utilizarea lor principală este la prelucrarea materialelor și în scopuri militare.

Oscilatori laser cu CO₂ în regim pulsant au energia pe puls de la ordinul 1mJ până la 100J. Durata pulsului este între 0.1 -10 μ s, tipul pulsului sub forma de spike (maxim) urmat de o scădere. În general forma fascicolului este multimod cu o divergență de 3-10 mrad. Au aplicabilitate largă de la dispozitive de control, prelucrarea materialelor și aplicații militare [Charschan, 1993].

Sistemele tehnologice laser cu Nd:YAG ocupă primul loc ca utilizare în cadrul laserilor cu mediu solid. Mediul activ pentru un laser cu Nd:YAG este un monocristal sintetic de yttrium aluminiu granat cu neodim. Radiația de 1,06 μ m este generată de tranziția unui electron excitat între două nivele energetice ale ionului de neodim. Excitația mediului activ este realizată de către o lampă cu arc care emite radiație optică cu spectru larg și de intensitate mare. Radiația emisă de lampă este cuplată în cristalul care reprezintă mediu activ, proces care se numește pompaj optic. Cristalul este în general fabricat sub forma unei bare. Volumul acesteia determină puterea medie care se poate obține. Există o limitare lungimii barei la 150 mm datorată posibilităților de creștere a monocristalului. Pentru a crește puterea medie se folosește cuplajul în aceeași cavitate rezonantă a mai multor bare și a mai multor lămpi de pompaj. O problemă importantă o constituie răcirea mediului deoarece numai o mică parte din energia pompată în mediu se regăsește sub formă de radiație laser. O altă caracteristică importantă a oscilatoarelor laser cu Nd:YAG este posibilitatea de a excita mediul atât în regim continuu cât și în regim pulsant. Excitarea mediului în regim pulsant produce o mai mare eficiență la transformarea energiei în radiație laser, acest tip de excitație lasă mediului timpul necesar ca acesta să se răcească . Chiar dacă excitația are loc în mod continuu radiația obținută poate fi în regim pulsant prin introducerea în cavitatea rezonantă a unui dispozitiv de control electric Q-switch. Pentru un pompaj în regim pulsant acesta mărește domeniul de reglaj al pulsurilor. Astfel sistemele tehnologice laser cu Nd:YAG pot funcționa atât în domeniu continuu ,cât și în domeniu pulsant. Menționăm folosirea diodelor laser ca sursă de pompare a energiei în mediul activ. Puterile care pot fi obținute cu oscilatoarele laser cu Nd:YAG sunt mai mici decât cele care pot fi obținute cu oscilatoarele laser cu CO₂, deoarece răcirea mediului solid este mai dificilă. Puterile oscilatoarelor laser cu Nd:YAG ajunge până la 4-5 kW. O creștere a domeniului de putere a fost realizată pentru oscilatoarele laser cu discuri. La acești oscilatori laser forma mediului activ a fost schimbat din forma de bară în cel de disc. Lungimea mediului este mai mică decât diametrul acesteia. Mediul se poate astfel răci mai ușor. Mai multe astfel de discuri sunt cuplate în cavitatea optică. Această

modificare a condus la creșterea domeniului de puteri de până la 6 kW [Charschan, 1993].

Sistemul tehnologic laser reprezintă un aparat care integrează întru-un anumit spațiu o serie de dispozitive care fac posibilă realizarea procesului de prelucrare. Principalele componente ale unui sistem tehnologic laser cu Nd:YAG sunt prezentate în figura.1.5.

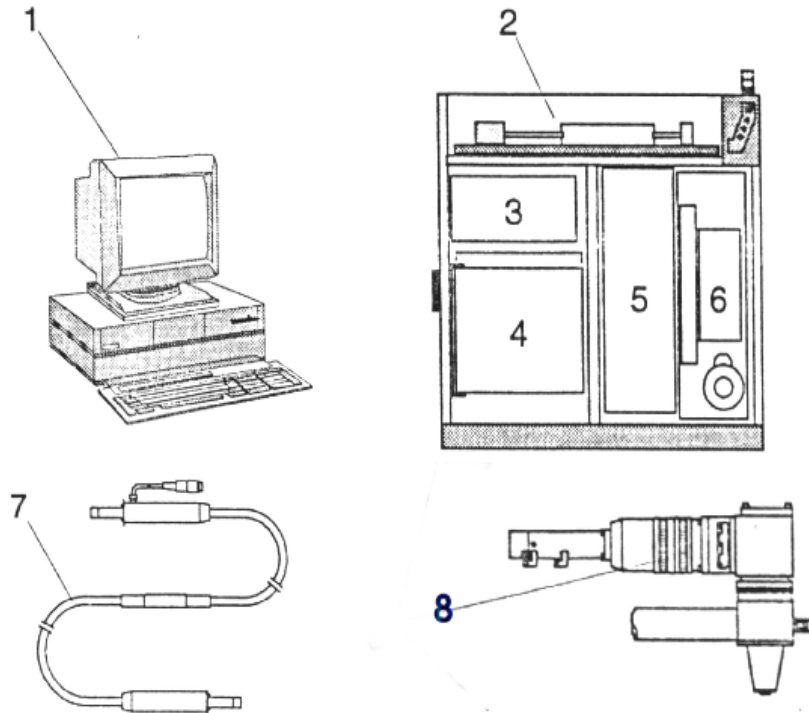


Figura 1.5 Principalele componente ale unui sistem tehnologic laser cu Nd:YAG (1-computer pentru comanda sistemului, 2-oscilator laser ,3-unitate de control,4-unitatea energetică generală,5-alimentarea lămpilor de pompaj optic, 6-sistemul de răcire, 7-fibra optică cu sistemele de cuplaj, 8- cap laser (optica de focalizare și sistemul de suflare a gazului)

Sistemul tehnologic laser are următoarele componente :

- sursa laser (oscilatorul laser);
- sistemul de transmite și focalizare a radiației;
- sistemul cinematic de mișcare relativă între capul laser și piesă;
- sistemul de suflare a gazului de protecție la suprafața piesei.

Dimensiunile unui sistem tehnologic laser depinde de nivelul de putere implicată. Oscilatorii laser de puteri mici sunt integrați în sisteme de tip „desk” (utilizate pe masă) și folosite la lipiri și sudări de componente electronice sau alte microprelucrări. Oscilatoarele laser de puteri mari sunt integrate în sisteme care folosesc incinte închise sau spațiu deschis. Prelucrarea în incintă închisă asigură o protecție bună a operatorului însă reduce flexibilitatea procesului de prelucrare.

Oscilatorul laser asigură emisia unui fascicol laser. Cele mai importante caracteristici ale radiației emise de laser sunt : regimul de iradiere (în undă continuă CW sau pulsată PW), puterea medie, structura modală electromagnetic transversal

care va da distribuția spațială a intensității fascicolului laser. Un oscilator laser cu mediu solid Nd:YAG conține ca elemente mediul laser, sistemul de pompaj optic, sistemul de răcire și cavitatea optică.

Sursa laser realizează prin emisie stimulată fascicolul laser. Acesta este transmis către piesă prin fibră optică în cazul sistemelor tehnologice laser cu Nd:YAG și cu ajutorul oglinzilor în cazul sistemelor tehnologice laser cu CO₂. Capul laser conține lentila de focalizare la suprafața piesei și sistemul de suflare al gazului protector. Transmiterea radiației de la ieșirea din laser prin fibră optică către capul laser influențează caracteristicile fascicolului laser. Fibrele optice folosite sunt de două tipuri :

- fibre optice cu indice de refracție cu variație în pași SI;
- fibre optice cu indice de refracție cu variație continuu GI.

Fibrele de tip GI au tendința de a menține structura modală a fascicolului laser de-a lungul fibrei în timp ce fibrele de tip SI au tendința de a omogeniza structura fascicolului laser. Implicația practică a acestei diferențe în propagarea fascicolului laser constă în aceea că prin folosirea fibrelor de tip GI se obține o penetrație dublă a sudurii față de aceea obținută prin folosirea unei fibre de tip SI pentru aceeași energie de intrare. Folosirea fibrelor de tip SI este utilă în cazul în care se dorește obținerea unor suduri puțin adânci și late. Folosirea acestora creează condițiile pentru obținerea unui număr scăzut de porozități și cavități în sudură datorită faptului că intensitatea fascicolului este constantă în pata focală. Fibrele GI conservă bine energia inițială. Folosirea lor este indicată atunci când se dispune de puteri laser scăzute [Miyachi Lasers a].

Sistemul cinematic asigură mișcarea relativă dintre capul laser și piesă. Aceasta se realizează prin mișcarea capului laser relativ la piesă sau invers prin mișcarea piesei. Se deosebesc sistemele cinematice care permit mișcarea în plan (în coordonate x,y) și cele care permit mișcarea spațială (în coordonate x,y,z). Aceste sisteme pot avea până la 5 axe de rotație și permit efectuarea de prelucrări care necesită traiectorii complicate. Mișcarea spațială de tipul x,y,z este suficientă pentru a regla viteza de sudare și poziția planului focal relativ la suprafața piesei în condițiile unei traiectorii liniare a iradierii la suprafața piesei. Reglajul traiectorii se realizează folosind comanda numerică.

Baia de sudare este expusă fenomenului de oxidare la contactul cu atmosfera înconjurătoare. Se folosește un gaz inert protector pentru a preveni oxidarea. Gazele de protecție folosite în sudarea laser sunt heliul, azotul și argonul. Ele sunt folosite atât singure cât și în combinații. Gazul este suflat din lateral față de zona iradiată, având și rolul de proteja lentila de focalizare a fascicolului laser de depunerea vaporilor metalici. Din punct de vedere tehnic s-a arătat că He este cel mai bun gaz protector [Schmidt, 1996]. S-a studiat interacțiunea dintre gazul folosit, viteza de sudare și materialul sudat. Astfel He permite sudarea de oțel carbon cu viteze până la 16m/min, iar azotul până la 8m/min. Ca valoare orientativă presiunea în rezervor este în jur de 15 bari. În cazul folosirii laserului cu CO₂ este necesar un control asupra formării plamei. Se recomandă folosirea heliului sau a combinațiilor dintre heliu și argon. Argonul tinde să formeze plasmă la puteri de peste 3 kW din această cauză trebuie evitat. În cazul sudării cu laser Nd : YAG cea mai bună soluție este folosirea argonului. Folosirea de CO₂ duce la formarea de plasmă și la o ușoară oxidare a sudurii, acest gaz trebuie suflat din lateral. Heliul fiind un gaz ușor necesită viteze de curgere ridicate și produce turbulențe în baia de sudare [Hilton, 2005].

Funcționarea coordonată a subsistemelor care constituie sistemul tehnologic laser este asigurată de modulul de comandă. Modulul electric care asigură

alimentarea diferitelor sisteme la tensiunile adecvate. Sistemul de alimentare cu apă asigură răcirea mediului laser în care are loc emisia stimulată a radiației electromagnetice. Sistemul de alimentare cu gaz asigură presiunea necesară pentru gazul protector care acoperă suprafața piesei. Gazul protector reduce oxidarea la suprafața băii de sudare și protejează lentila de focalizare a fascicolului laser. Prelucrarea cu fascicol laser poate avea loc fie în incintă închisă fie în spațiu deschis. La prelucrarea în incintă închisă aceasta este blocată la funcționarea oscilatorului laser. La prelucrarea în spațiu deschis funcționarea oscilatorului laser este însoțită de blocarea accesului și avertizarea luminoasă și sonoră.

Parametrii de reglaj a acestor sisteme influențează rezultatul final al procesului de prelucrare și anume sudura în cazul studiat în prezenta lucrare. Se identifică trei tipuri de parametri care caracterizează procesul de prelucrare:

- parametri pentru iradierea materialului;
- parametri legații de natura materialului exprimații prin constantele de material
- parametri determinați de organizarea procesului de sudare (gazul asistent poziționarea pieselor). Dintre aceștia parametrii care realizează iradierea pot fi variați continuu, astfel că valorile lor vor caracteriza procesul de prelucrare. Principalii parametri care caracterizează iradierea pentru un proces de sudare laser cu iradiere în regim continuu sunt:
 - **Viteza de sudare v [m/min]**. Viteza de sudare reprezintă viteza de deplasare relativă între capul laser și piesă.
 - **Puterea fascicolului laser P [W]** Puterea este un factor care reglează direct. Ea reprezintă puterea medie emisă de sursa laser.
 - **Focalizarea fascicolului laser la suprafața piesei**. Distanța dintre planul focal și suprafața piesei, defocalizarea δ [mm]. Aceasta este pozitivă atunci când planul focal este situat deasupra piesei și negativă când planul focal este situat în interiorul piesei.

1.2 Procese de sudare cu laser a materialelor metalice

1.2.1 Aspecte tehnologice ale procesului de sudare laser

Sudarea laser a metalelor se încadrează între procesele de sudare prin topire. În cadrul proceselor de prelucrare cu fascicul laser sudarea ocupă locul trei ca pondere în ceea ce privește răspândirea în industrie a proceselor de prelucrare cu fascicul laser, figura 1.6. Schema de principiu pentru procesul de sudare laser este prezentată în figura 1.7. Ca sursă termică fasciculul laser oferă posibilitatea concentrării unor energii mari pe suprafețe mici, astfel se pot realiza suduri înguste și profunde. În plus se oferă o bună productivitate și repetabilitate a procesului, acesta fiind un proces non contact întrepiesă și material. La organizarea procesului de sudare se întâlnesc două probleme distincte:

- poziția relativă între piesele de sudat;
- poziția relativă între piese și capul laser.

Se remarcă următoarele poziții între piese: sudare cap la cap, sudare suprapusă, sudare în colț, figura 1.8.

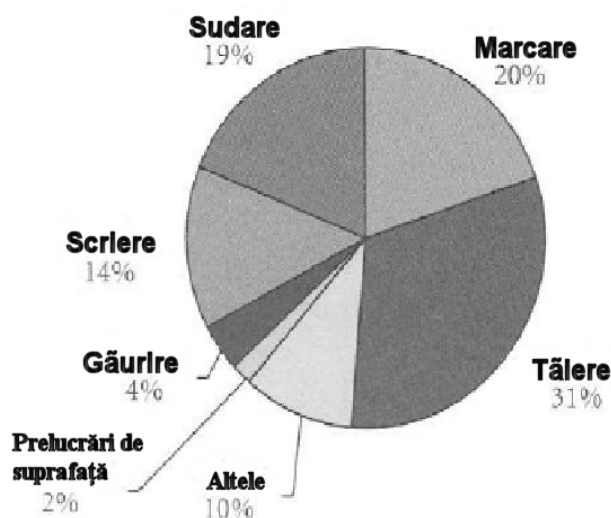


Figura 1.6 Utilizarea laserilor industriali în procesele de prelucrare, în jurul anului 2000 după [Ion, 2005]

Din punct de vedere al poziției relative între fascicolul laser și piesele de sudat se remarcă următoarele poziții: sudare în plan orizontal, sudare în plan vertical cu mișcare transversală (stânga-dreapta), mișcare de sus în jos respectiv de jos în sus și sudare peste cap. Între aceste situații există diferențe în ceea ce privește curgerea topiturii. Sudarea unor piese în mișcare cu forme complexe conduce la combinarea pozițiilor elementare de sudare anterior menționate. În figura 1.8 se prezintă pozițiile de sudare ale pieselor care se sudează cu fascicol laser.

Fascicolul laser poate fi adus cu ușurință în zona de prelucrat prin transmisie cu oglinzi în cazul sistemelor tehnologice laser CO₂ și folosind fibra optică în cazul sistemelor tehnologice laser cu Nd :YAG. Zona de sudare nu necesită un mediu special înafara de protecția cu un gaz inert.

Sudarea laser poate fi realizată cu sau fără material de adaos. În cazul sudării cu material de adaos în zona de interacțiune este introdus un fir metalic rulat cu viteză constantă care se topește împreună cu materialul de bază. La sudarea laser piesele trebuie să fie perfect alipite și se va asigura că fascicolul laser va iradia ambele piese de sudat. Dacă se folosește material de adaos această etapă impune condiții mai puțin restrictive. Se va realiza reglarea parametrilor de iradiere în raport cu natura și grosimea materialului piesei. Iradierea poate să aibă loc în regim continuu CW sau în regim pulsant PW. De obicei viteza de sudare este constantă în timpul procesului, la fel și poziția dintre capul laser și piesă. Focalizarea poate fi realizată la suprafața pieselor sau în interiorul materialului. În afara asigurării penetrării corespunzătoare este foarte important să se asigure faptul că piesele nu se deformează în timpul sudării. Aceasta ar conduce la variații importante ale densității de flux termic la suprafața pieselor și ar compromite procesul. Sudarea se face în atmosferă protectoare de azot argon sau heliu pentru a preveni oxidarea băii de sudare și a preveni depunerea vaporilor metalici pe lentila de focalizare. Dintre acestea cele mai bune rezultate se obțin în cazul utilizării heliului. Acest gaz are însă dezavantajul că este scump.

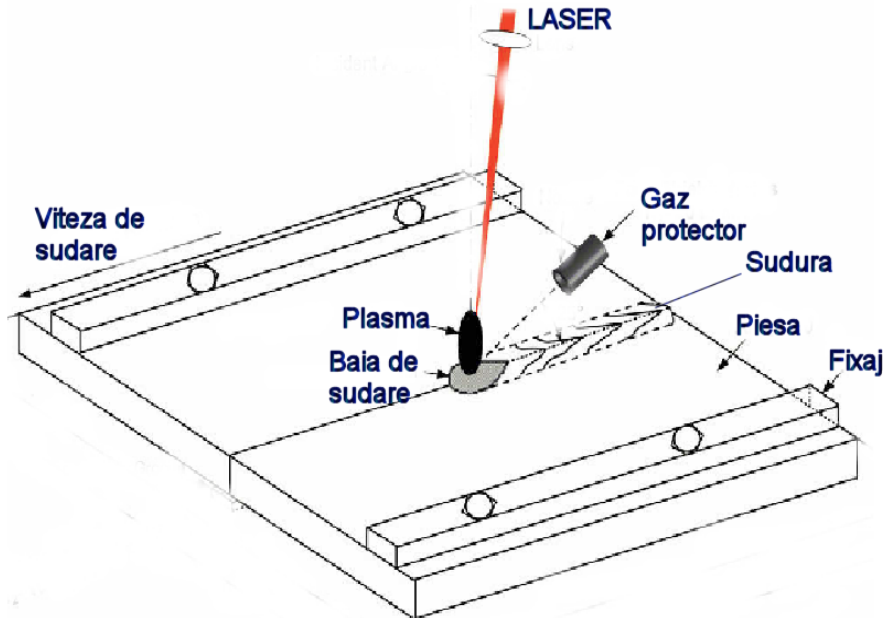


Figura 1.7 Schemă a procesului de sudare

Sudarea laser cu fascicul laser Nd:YAG prezintă caracteristica importantă că formarea de plasmă nu joacă un rol în absorbția radiației, așa cum se întâmplă în cazul folosirii unui laser CO₂ [Lacroix, 2000]. De asemenea contribuția la rezultatul final al procesului de sudare a fenomenelor date de interacțiunea dintre fasciculul laser și gazul protector este redusă.

Sudarea laser se aplică cu succes pentru aliaje de Al, oțeluri carbon cu conținut de carbon mai mic de 0.12 %, oțeluri inox, aliaje de cupru, nichel și titan. Sudarea laser are aplicații în mai multe domenii industriale. În domeniul aerospațial se sudează, aluminiu, aliaje de titan, nichel și oțel inox cu grosimi de până la 3 mm. În industria de automobile se sudează oțel moale, oțeluri slab aliate, oțel inox, aliaje de Al. Se remarcă două domenii de grosimi ale materialelor, mai mic de 1 mm și între 1 și 3 mm. În industria militară și la produse de larg consum se folosesc aliaje de Ti, oțel inox și oțel moale și aliaje de Al. Se remarcă trei domenii de grosimi ale materialelor: table foarte subțiri cu grosimi între 0.4 și 0.8 mm, table subțiri cu grosimi de 1-2 mm și table cu grosimi mai mari de 3 mm. În industria petrolieră se folosește sudarea laser pentru țevi din oțel inox duplex cu grosimi mai mari de 4 mm. Pentru ambalări de produse se realizează suduri laser pentru table subțiri cu grosimi de 0.2-1 mm din oțel Al și Cu. La construcția generatoarelor electrice se realizează suduri laser pentru oțel inox cu grosimi mai mari de 3 mm. Pentru construcții de nave se folosesc table de oțel cu grosimi între 6 și 14 mm. Probleme la sudarea laser apar pentru cupru care are o reflectivitate ridicată, aliaje care conțin beriliu a cărui vapori sunt toxici, pentru nichel și molibden se obțin suduri fragile. O categorie aparte comportarea la sudare o constituie materialele placate sau acoperite [Miyachi Lasers b]

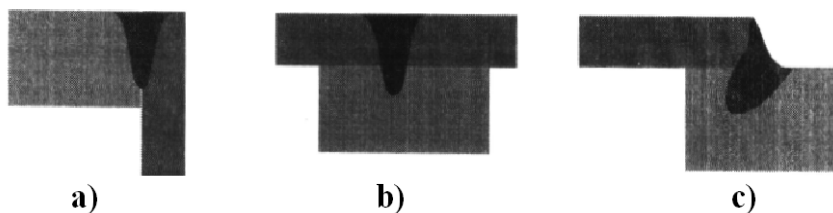


Figura 1.8 Tipuri de suduri realizabile cu fascicol laser a) sudare cap la cap ,b) sudare suprapusă c) sudare în colț

În procesele tehnologice rolul principal îl au parametrii care reglează iradierea. O caracterizare unitară a condițiilor de iradiere include ambele regimuri de sudare continuu , respectiv pulsant. Iradierea se caracterizează prin puterea medie și prin condițiile de propagare și focalizare a fascicolului laser la suprafața piesei. Parametrii care caracterizează iradierea pot fi reduși la două mărimi intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei și timpul de interacțiune dintre radiație material. Încadrarea proceselor de prelucrare laser în funcție de acești parametri este prezentată în tabelul 1.2:

Tabel 1.2 Intensitățile ale fascicolului laser și timpii de interacțiune pentru procesele tehnologice după [Ion, 2005] și [Charschan, 1993].

Nr. Crt.	Procesul tehnologic	Intensitatea fascicolului laser pe suprafața piesei [W/cm ²]	timpul de interacțiune [s]
1	călire (încălzire)	10 ² -10 ³	10 ⁻² -10
2	acoperire (încălzire și topire de suprafață)	10 ² -10 ⁴	10 ⁻¹ -1
3	topire	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁻⁴ -1
4	sudare în regim de conducție	10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁻³ -10 ⁻²
5	tăiere prin topire	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁻³ -10 ⁻²
6	sudare în regim keyhole	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁻³ -10 ⁻²
7	găurire, îndepărtarea de material prin vaporizare	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁻⁶ -10 ⁻⁴
8	prelucrări de suprafață	10 ⁷	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶
9	unda de șoc	10 ⁸	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶
10	detonare în plasmă	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁻³ -10 ⁻²
11	unda de șoc	10 ⁸	10 ⁻⁷ -10 ⁻⁶

Din tabelul 1.2 se observă că sudarea laser se încadrează în cadrul proceselor de prelucrare care folosesc topirea. Diferența între cele două regimuri de sudare conducție și keyhole este dată de intensitatea fascicolului laser. Regimul de sudare keyhole necesită o intensitate mai ridicată aflându-se pe același domeniu ca și îndepărtarea de material în stare topită

Un studiu asupra eficienței procesului de sudare laser folosind sistemele tehnologice laser cu CO₂ și cu Nd: YAG incluzând laserii cu disc este prezentat în

lucrarea [Ream, 2004]. Se arată că echipamentul necesar operării sistemului tehnologic laser (robotul industrial care constituie sistemul cinematic, fibre optice, cap laser, sistemul de alimentare cu apă și gaz, sisteme de protecție și avertizare a personalului operator) costă de câteva ori mai mult decât sursa laser. În sudarea laser productivitatea este dată de relația între penetrare și viteza de sudare. Eficiența procesului de sudare poate fi definită ca eficiență absolută, referitor la cantitatea de topitură formată sau relativ la parametrii procesului de sudare. Calculul eficienței absolute a procesului de sudare ε [mm^3/kJ] necesită cunoașterea variației căldurii specifice a materialului cu temperatura. Calculul relativ la parametrii procesului de sudare este dat de relația:

$$\varepsilon = (\text{aria topită} \times \text{viteza de sudare}) / \text{puterea de lucru} \quad [\text{mm}^3/\text{kJ}] \quad (1.14)$$

Eficiența relativă a procesului de sudare este definită ca volumul de topitură obținută supra puterea consumată la iradierea cu fascicul laser. Prin folosirea acestei mărimi se arată că sistemele tehnologice laser CO_2 sunt mai puțin eficiente decât cele cu Nd:YAG. Sistemele tehnologice laser cu CO_2 prezintă avantaj economic în aplicații în care nu se variază mult nivelul de putere. Raportarea costurilor la volumul de material topit este valabilă numai în situații similare de sudare și este o evaluare relativă a costului procesului de sudare. Costurile de operare ale unui sistem tehnologic laser depășesc costurile inițiale pentru acest sistem.

1.2.2 Procedee de sudare laser

Din punct de vedere fenomenologic sudarea laser poate fi realizată în trei variante de principiu :

1) Sudarea în regim de conducție. Acest regim este denumit și sudarea limitată prin conducție. La interfața solid-lichid mecanismul de transmitere al căldurii este exclusiv prin conducție. Căldura este condusă direct de la sursa termică care apare datorită iradierii la suprafața piesei către interiorul materialului. Regimul de sudare prin conducție se caracterizează prin iradiere suficiente pentru a produce topirea și vaporizarea la suprafață dar insuficiente pentru producerea vaporizării în profunzimea materialului. Pentru regimul de sudare prin conducție valorile raportului F între lățimea și profunzimea sudurii este supraunitar $F \geq 1$. Ca valoare orientativă profunzimea sudurii pentru regimul de sudare de este 1.5 mm [Kaplan, 2002]

2) Sudarea în regim keyhole. Acest regim presupune apariția fenomenului de keyhole în baia de sudare ceea ce implică regimuri de iradiere care să depășească intensitățile necesare producerii propagării frontului de vaporizare în material. Mecanismul de transmitere a căldurii la interfața solid-lichid implică alături de conducție și convecția datorată mișcării topiturii în baia de sudare. Prezența vaporilor și a celor două mecanisme de transmitere a căldurii produce pătrunderea în profunzime a sudurii.

În ceea ce privește rezultatul final al sudării secțiunea sudurii prezintă următoarele caracteristici :

- secțiunea transversală a sudurii are forma de pahar de vin [Jouvard, 2000] ;
- în secțiunea sudurii apare un defect de sudare ,bulă de gaz, prezența acestui por a condus la denumirea de keyhole (gaură de cheie) dată acestui regim de sudare;
- profunzimea sudurii depășește 2 mm (2-15 mm). Raportul F între lățimea și profunzimea sudurii are valori subunitare $F \leq 1$.

Defectele care se obțin în suduri pentru regimul de sudare keyhole sunt porozități datorate dizolvării gazelor în topitură, bule de gaz și zone largi de vid. Defectele care se obțin în regimul de sudare prin conducție sunt fisuri la suprafața sudurii.

Prezența keyhole și a vaporilor din aceasta în interiorul materialului realizează împingerea frontului de topire (interfața solid-lichid) în interiorul materialului. Astfel se realizează creșterea penetrării sudurii. În sudarea laser fenomenul de keyhole prezintă două consecințe importante. Prima dintre acestea se referă la creșterea cuplajului energetic dintre radiația laser și material datorită faptului că radiația laser se poate propaga în keyhole iar absorția ei are loc în interiorul materialului. Astfel se creează posibilitatea formării unor surse termice în interiorul materialului. Se consideră că prezența keyhole va duce la creșterea cuplajului energetic. Al doilea aspect se referă la însăși creșterea puternică a keyhole. Prezența unei surse puternice de căldură care produce variații bruște în spațiu și timp de încălzire favorizează evaporarea puternică. Vaporizarea rapidă este urmată de o creștere a presiunii urmată de creșterea temperaturii de vaporizare. Astfel interfața gaz-lichid devine supraîncălzită. Dispariția rapidă a sursei de căldură din zona iradiată va face ca vaporizarea să fie rapidă prin trecerea lichidului supraîncălzit în stare de vapori.

Un regim intermediar între regimul de conducție și cel keyhole a fost descris de [Kaplan, 2002] și [Miyachi Lasers a]. Acesta prezintă topitura sub o formă parabolică, fără a se obține acea formă specifică de « pahar de vin » specifică regimului keyhole. Explicația acestei comportări se bazează pe faptul că vaporizarea materialului la suprafața piesei are loc pentru ambele regimuri. Amploarea fenomenului este însă diferită. Schema secțiunii prin sudură pentru cel trei cazuri de regimuri de sudare alături de fotografiile sunt prezentate în figura 1.9.

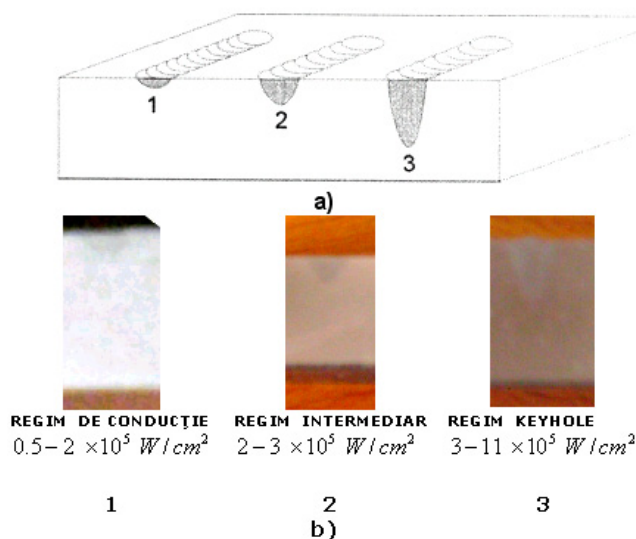


Figura 1.9 Scheme a) și fotografiile ale secțiunii sudurii b) pentru 1 regimul de sudare prin conducție, 2 regimul de sudare intermediar între regimul de sudare prin conducție și cel keyhole, 3 regimul de sudare keyhole

Sudarea în regim de găurire reprezintă un regim intermediar între sudare și tăiere/ producere de șanțuri prin evaporare. În material se produc în mod repetat

găuri sau falii. În acest regim se produc de fapt defecte sub formă de găuri în material. Regimul de găurire provine de la regimul keyhole în care lipsește etapa de închidere a acesteia, vaporii rămân în material până la sfârșitul procesului de solidificare. Din punct de vedere al tăierii (fără penetrare completă) regimul de găurire se încadrează în tăierea laser de evaporare, în care rolul gazului ajutător este scăzut. Studiul acestui regim intermediar între sudare și tăiere poate furniza date interesante despre formarea keyhole.

Conducerea proceselor de sudare în cadrul fiecăreia din variantele menționate anterior se realizează efectiv prin reglarea corespunzătoare a sistemului tehnologic de sudare la nivel de putere, viteză de sudare și dimensiunea ale petei laserului pe suprafața piesei.

1.3 Fenomenul de keyhole în baia de sudare

Fenomenul de „keyhole” constă în apariția în baia de sudare a unei cavități care favorizează extinderea zonei topite în profunzime. Fenomenul este specific sudării cu plasmă, fascicol laser și fascicol de electroni. În cazul folosirii plamei gazul ionizat exercită o presiune asupra băii de sudare care va duce la deformarea acesteia. În cazul folosirii fascicolului laser și a fascicolului de electroni cauza o reprezintă vaporizarea rapidă alături de imposibilitatea de a se evacua rapid vaporii rezultanții. Astfel fenomenul de keyhole care apare în cele două procese de prelucrare prezintă caracteristici similare comparabile din punctul de vedere al fenomenelor fizice care au loc. Apariția keyhole este asociată cu intensități ale fascicolului laser de peste 10^5 W/cm^2 . În figura 1.10 este prezentată schema băii de sudare cu prezența keyhole.

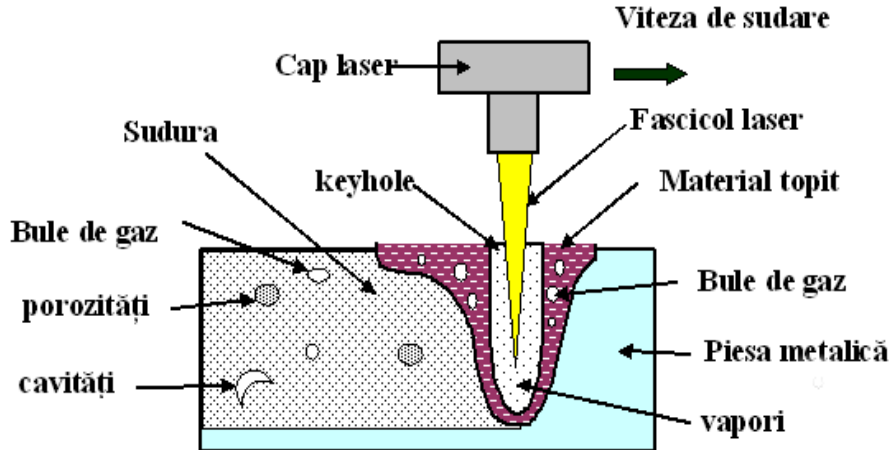


Figura 1.10 Schema băii de sudare

În timpul iradierii cu fascicol laser se remarcă următoarele etape în dezvoltarea keyhole [Girard, 1999]:

- **Formarea keyhole.** Într-o primă etapă se obține prezența fazei de vaporii în materialul topit.

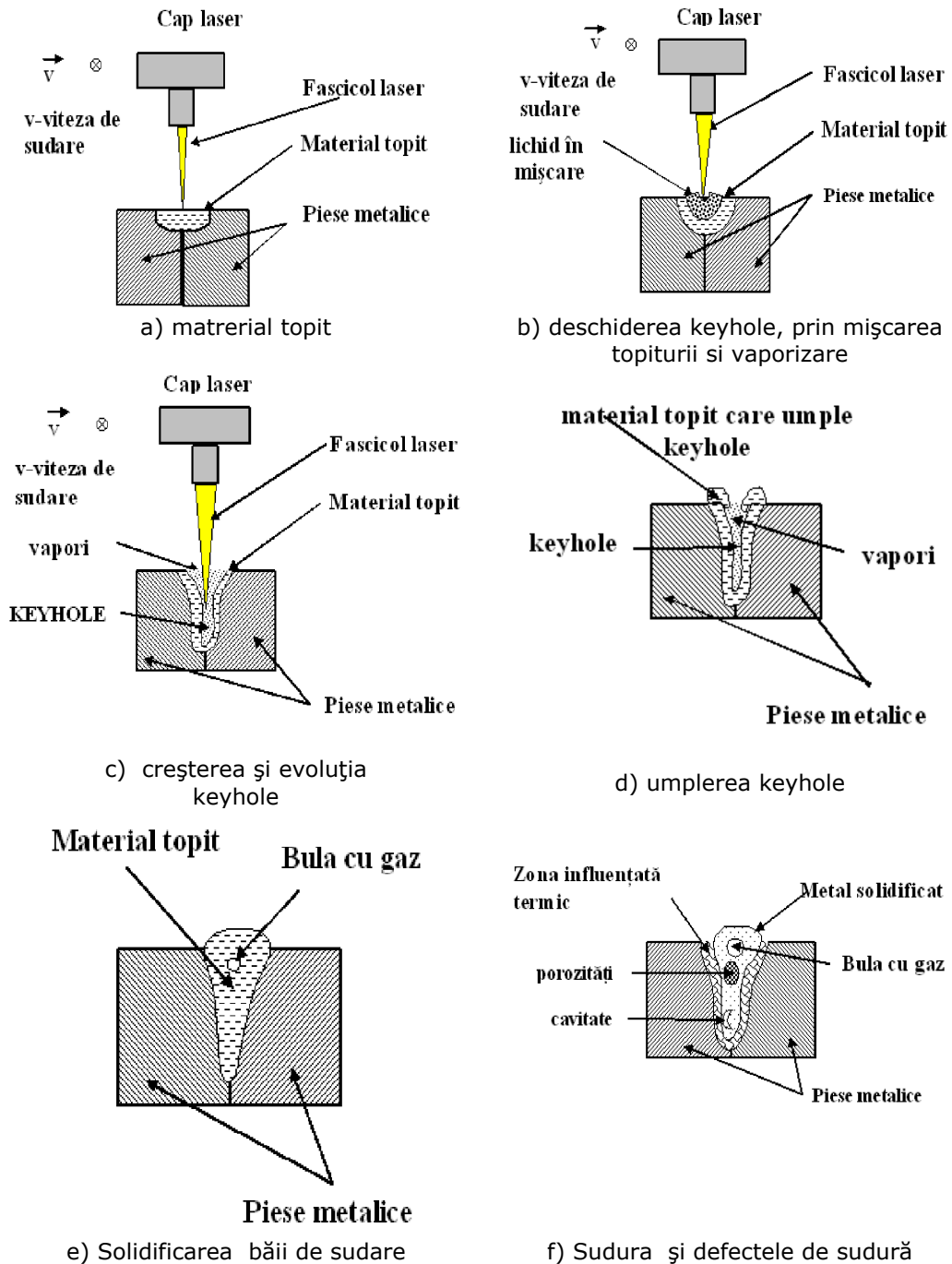


Figura 1.11 Formarea și evoluția keyhole în baia de sudare
- Perioada de creștere sau evoluție keyhole. În această etapă keyhole crește în profunzime și prezintă numeroase variații de formă numite general instabilități.

- **Perioada de închidere.** Keyhole este umplută de către topitura înconjurătoare. Umplerea keyhole se efectuează pe deasupra de la suprafața băii de sudare și există posibilitatea de a prinde în topitură în faza de solidificare bule de gaz, cavități având vid sau presiune scăzută, precum și pori (porozității) care conțin incluziuni de gaz. Prezența acestora are consecințe asupra calității finale a sudurii. Etapele anterior enumerate sunt prezentate în figura 1.11 :

Figura 1.11 arată evoluția în timp a băii de sudare după cum urmează: Etapa a) arată topirea metalului. Apariția fazei topite are loc la iradierea cu fascicol laser a metalelor, pentru anumite valori ale intensității fascicolului laser (vezi tabel 1.2) . Etapa b) arată deschiderea keyhole. Aceasta are loc în urma apariției vaporizării și a mișcării topiturii în baia de sudare. Etapa c) arată creșterea și evoluția keyhole datorită vaporizării puternice. După încetarea iradierii laser începe umplerea keyhole, etapa d). Incluziuni gazoase (vapori, gaz protector) se ridică către suprafață, etapa e). Unele din acestea sunt prinse în sudură, etapa f).

Vaporizarea materialului este cauza generală a apariției keyhole. La modul concret vaporizarea generează fenomene fizice particulare care conduc la formarea keyhole. Sunt identificate trei mecanisme care ar constitui cauzele apariției fenomenului de keyhole :

2) Cumularea de vapori în material. Vaporizarea cu viteză mare va conduce la reținerea vaporilor în material. Viteza de vaporizare este mai mare decât viteza de ejectie liberă la suprafață. Rezultatul este cumularea de vapori în material și formarea unei keyhole sub presiune (cu presiune ridicată). [Kaplan, 2002]

2) Deschiderea keyhole datorată presiunii de recul. Presiunea de recul datorată vaporizării produce deplasarea suprafeței lichidului în sens invers deplasării vaporilor. Astfel se produce o adâncitură în baia de sudare numită keyhole. Aceasta este rezultatul unui efect de piston exercitat de presiunea de recul datorată vaporilor. [Semak, 1997]. Acest mecanism arată formarea unei keyhole cu presiune scăzută.

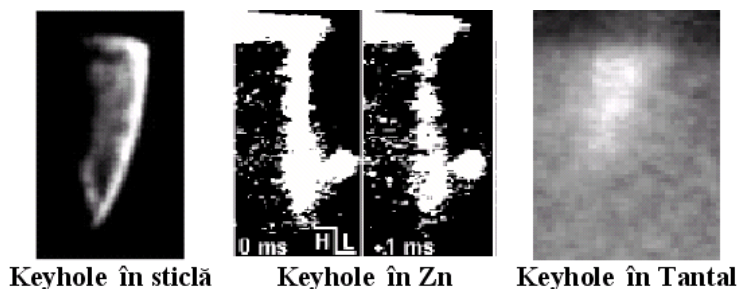


Figura 1.12 Imagini ale keyhole în timpul procesului de sudare după [Jin, 2002], [Kaplan, 2002 b] [Jouvard, 2001]

3) Curgerea Maragoni. Al treilea mecanism se bazează pe fenomenul curgerii Maragoni a lichidului datorită variației tensiunii superficiale a suprafeței lichidului. Aceasta se datorează prezenței sulfurului și fosforului în topitură, elemente numite și surfactanți. Modificarea tensiunii superficiale conduce implicit la modificarea presiunii ceea ce conduce la mișcarea topiturii [Fuhrich, 1999]

Se consideră că mecanismele 1) și 2) au rolul esențial la formarea keyhole. Cunoașterea exactă a intensității fascicolului laser folosit poate conduce la precizarea cu exactitate a unei modalități de formare a keyhole.

Formarea și existența keyhole reprezintă un fenomen tranzitoriu în baia de sudare. Keyhole poate fi surprinsă numai în timpul procesului prin imagini în raze X. Imagini ale keyhole obținute prin fotografierea în raze X a băii de sudare în timpul procesului de sudare sunt prezentate în figurile 1.12 și 1.13

Este dificil de prezentat o caracterizare general valabilă pentru keyhole. Considerând că keyhole este surprinsă instantaneu se pot formula totuși câteva caracteristici generale.

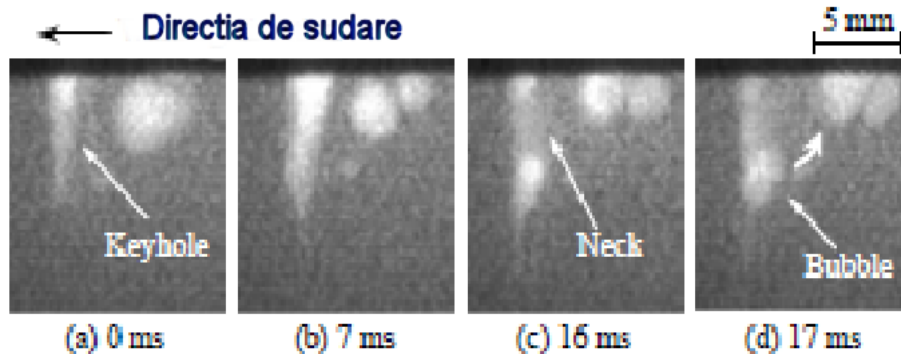


Figura 1.13 Imagine a evoluției keyhole și a părților componente a acesteia

- Keyhole apare în zona de acțiune a fascicolului laser, fiind puțin deplasată în urma acestuia. Fascicolul laser iradiază peretele din față al keyhole. Peretele din spate al keyhole nu este iradiat. Presiunea vaporilor și presiunea de recul determină deschiderea keyhole în timp ce presiunea datorată tensiunii superficiale determină închiderea keyhole.

- Diametrul keyhole la suprafața piesei este apropiat de cel al fascicolului laser iar diametrul keyhole în interiorul materialului este mai mic.

- Forma keyhole este asociată cu deformarea interfeței vaporilor-lichid. Forma keyhole legată de echilibrul local de presiune. În general este instabilă cu numeroase deformații.

Secțiunea transversală relativ la direcția de sudare prin keyhole poate fi asociată mai bine cu presiunea din interiorul ei. Acolo unde presiunea în keyhole este ridicată secțiunea transversală prin keyhole are o formă de tip convex. Aceasta situație este asociată cu o acumulare de vapori, mecanism de tip 1). Acolo unde presiunea este scăzută forma secțiunii transversale prin keyhole prezintă o formă de tip concav. Acest tip de formă este asociată cu un mecanism de tip 2) asociat cu prezența unei vaporizări puternice și cu prezența presiunii de recul. Forma keyhole poate fi concepută ca un corp de rotație având la bază secțiunea sa. Forma keyhole acceptată ca model general este concavă la suprafață și convexă la interior. Aceasta este cunoscută și sub forma clasică de « pahar de vin ». În modelare se folosesc forme ideale pentru a reprezenta keyhole. formă semisferică, cilindrică, conică, formă de trunchi de con. Pentru materialele a căror topitură are o vâscozitate ridicată cum ar fi sticla există o stabilitate bună în timp a keyhole. Pentru cazul metalelor topite la care vâscozitatea este scăzută forma keyhole este instabilă. Se formează cavități secundare la baza keyhole (forma de cizmă a keyhole) și forme neregulate.

Keyhole este menținută în material prin contribuția mai multor presiuni unele din acestea deschid cavitatea, altele acționează cu tendința de a o închide. Evident keyhole se obține în urma unui echilibru al acestor presiuni. Se va prezenta

aceste presiuni. Presiunile care mențin deschisă keyhole sunt: presiunea vaporilor cumulați, și presiunea de recul datorată vaporizării. Schema acțiunii presiunilor care modifică suprafața băii de sudare și conduc la formarea și menținerea keyhole sunt prezentate în figura 1.14

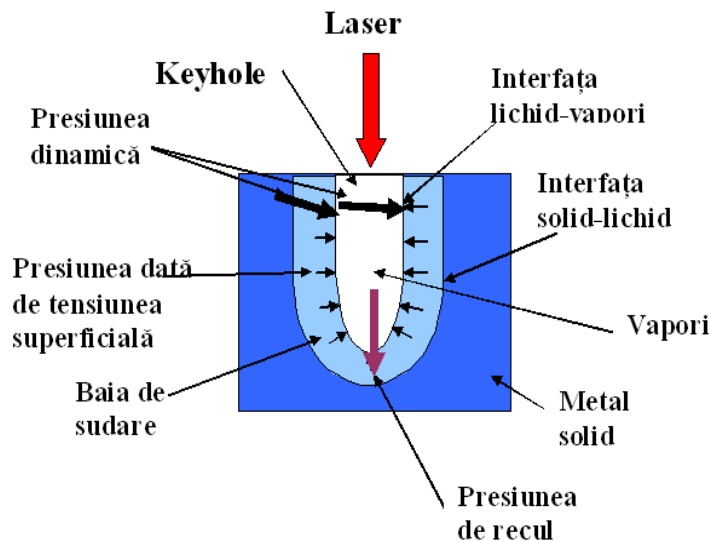


Figura 1.14 Principale presiuni care contribuie la formarea și menținerea keyhole

Presiunea vaporilor p_v constă în presiunea datorată acumulării vaporilor în material. Vaporizarea rapidă conduce la cumulara vaporilor. Presiunea exercitată de gazul protector împiedică sau încetinește evacuarea vaporilor și are un rol în stabilizarea presiunii din keyhole.

Presiunea de recul datorată vaporizării p_r apare la suprafața topiturii la trecerea în stare de vapori a atomilor. Presiunea de recul are un efect de piston asupra suprafeței lichidului aceasta fiind împinsă în direcția opusă degajării vaporilor. În cazul sublimării presiunea de recul acționează asupra materialului solid și produce o undă de șoc în acesta. Cantitativ presiunea de recul poate fi legată de intensitatea fascicolului laser după următoarea formulă [Dumord, 1998] :

$$p_r = \frac{I_{abs}^2}{\rho_g \cdot L_v} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (1.15)$$

unde :

I_{abs} - intensitatea absorbită de la fascicolul laser. [W/m²]

ρ_g - densitatea vaporilor [kg/m³]

L_v - căldura latentă de vaporizare [J/kg]

Presiunea recul și presiunea vaporilor sunt produse de același fenomen și anume vaporizarea metalului.

Acestor presiunii care deschid cavitatea numită keyhole în baia de sudare li se opune presiunii care au efectul contrar de a închide cavitatea. La un anumit moment acestea devin mai puternice și vor închide keyhole. Aceste presiunii sunt: presiunea hidrostatică și presiunea datorată tensiunii superficiale. Presiunea

hidrostatică se datorează coloanei de lichid care acționează asupra vaporilor. Ea este dată de relația:

$$p_g = \rho_l \cdot g \cdot z \quad [\text{N/m}^2] \quad (1.16)$$

unde:

ρ_l - densitatea metalului lichid [kg/m^3]

g - accelerația gravitațională [m/s^2]

z - înălțimea coloanei de lichid [m]

Tensiunea superficială are tendința de a închide keyhole. Evaluarea acesteia are la bază considerarea unei forme semisferice pentru keyhole pentru a putea defini o rază de curbură. Se va considera forma "local semisferică" astfel că se menține sensul razei de curbură. Ea este dată de următoarea relație:

$$p_s = \sigma \cdot C = \sigma \cdot \frac{1}{R_l} \quad [\text{N/m}^2] \quad (1.17)$$

unde:

σ - tensiunea superficială [N/m]

C - curbura locală a suprafeței keyhole [m^{-1}]

R_l - raza locală a suprafeței keyhole [m]

O presiune care acționează asupra suprafeței lichidului în mod aleator atât în sensul deschiderii keyhole cât și al închiderii acesteia este presiunea dinamică a topiturii. Aceasta apare ca efect al mișcării topiturii și a vaporilor. În timpul formării și dezvoltării keyhole reprezintă o sursă locală de instabilitate a suprafeței. Presiunea dinamică este dată de relația:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho_l (\vec{v} \cdot \vec{n})^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (1.18)$$

unde:

ρ_l - densitatea metalului lichid [kg/m^3]

\vec{v}

v - viteza locală a jetului de metal topit [m/s]

\vec{n}

n - vectorul normal la suprafața metalului topit [-]

Aprecierea cantitativă a acestor presiuni este dificilă. Efectuarea unor predicții cantitative presupune considerarea unor situații idealizate. Astfel se consideră în [Lange, 2004] presiunea de echilibru a keyhole egală cu suma dintre presiunea vaporilor cumulați și presiunea de recul datorată vaporizării care este dată de jumătate din presiunea vaporilor saturați. Aceasta este estimată pentru o temperatură a suprafeței de 5000 °K și o viteză de vaporizare masivă de 0,5 Kg/s.m^2 , în condițiile unei viteze a atomilor de $1,2 \cdot 10^3$ m/s. Pe baza acestor date se obține o presiune de echilibru de $6 \cdot 10^2$ N/m^2 . Pe baza acestei estimări se deduce că la o profunzime de 3 mm un orificiu keyhole cu diametrul de 0,1mm va avea o suprafață de aproximativ 1mm^2 .

Echilibrul de presiune care descrie keyhole are un caracter „local” ,adică poate descrie stabilitatea unui perete al cavității, a părții superioare a acesteia, a părții inferioare a cavității dar nu a cavității pe ansamblu și de asemenea un caracter

„momentan” fiind asociată cu un anumit moment în formarea și evoluția keyhole. Balanța de presiuni nu poate prezice forma keyhole, mai mult este necesară considerarea unei forme prestabilite pentru keyhole sau pereții acesteia pentru a formula balanța de presiune.

În baia de sudare pot fi identificate mai multe mișcări ale topiturii. Descrierea acestora depinde de cauzele considerate. Acestea pot avea un caracter aleatoriu generat de realizarea unui anumit context de fenomene fizice.

Mișcarea topiturii din partea din față în partea din spate a băii de sudare este generată diferența de temperatură produsă de fascicolul laser în baia de sudare, figura 1.15. La această mișcare participă o cantitate semnificativă de topitură.

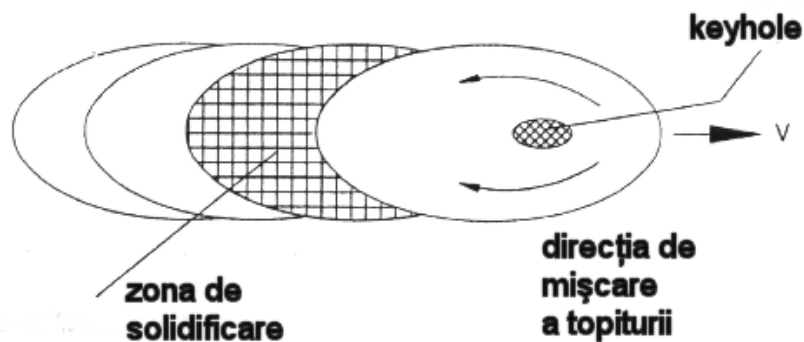


Figura 1.15 Mișcarea topiturii de la partea din față la partea din spate a băii de sudare

Topitura înconjoară keyhole și de asemenea trece pe sub aceasta. Ea are ca efect producerea supraînălțării sudurii și a valurilor (unde solide la suprafața sudurii). Prin această mișcare a topiturii se realizează un transfer de căldură prin convecție la interfața solid-lichid. Efectul acestui transfer prin convecție devine semnificativ la partea din spate a băii de sudare (opusă direcției de deplasare relativă dintre fascicolul laser și piesă). Mișcarea topiturii de la partea din față la cea din spate a băii de sudare include o serie de mișcări particulare care au un caracter local, menționăm mișcarea de "humping" la peretele din față al keyhole (aparitia de ridicături periodice ale topiturii). Acesta nu are un efect considerabil pe ansamblul băii de sudare.

Mișcarea topiturii în baia de sudare are la bază diferența de temperatură ΔT care apare în aceasta între topitura la partea din față a băii de sudare și cea la partea din spate a acesteia. Această diferență de temperatură este datorată diferențelor de încălzire ale topiturii, cea din partea din față, iradiată direct de laser este mai caldă iar cea din spate este mai rece deoarece pierde căldură prin conducție și radiație. Diferența de temperatură se transformă într-o diferență de presiune statică după următoarea relație [Thorslund, 2003] :

$$\Delta p = \frac{V \alpha \Delta T}{\chi} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (1.19)$$

Unde :

V- volumul de material în care s-a indus gradientul de temperatură [m^3]

α - coeficientul de dilatare volumică [grad^{-1}]

χ - coeficientul de compresibilitate [m^5/N]

ΔT - diferența de temperatură [grad]

Diferența de temperatură în topitură se evaluează ca fiind diferența între temperatura de topire și temperatura suprafeței băii de sudare. Temperatura suprafeței băii de sudare depășește în general temperatura de vaporizare. Vom avea:

$$\Delta T = T_s - T_m \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1.20)$$

unde:

T_s - temperatura suprafeței metalului topit în zona iradiată direct [$^\circ\text{C}$]

T_m - temperatura de topire [$^\circ\text{C}$]

Evaluarea temperaturii suprafeței topiturii se poate realiza pe baza părții din intensitatea fascicolului laser absorbită în material, presupunând transformarea ei într-o sursă termică și conducția integrală a căldurii în material. O cale mai complicată ar fi evaluarea temperaturii suprafeței ca temperatura de vaporizare în condiții de presiune crescută la suprafață. Faptul că formele fizice de solidificare (valurile) prezintă înaltă reproductibilitate conduce ipoteza că diferența de temperatură între suprafața topiturii și restul topiturii este stabilă pe parcursul procesului de sudare.

Dacă se consideră curgerea metalului în baia de sudare la presiune constantă (gazul protector și vaporii rezultații nu produc diferențe semnificative în ceea ce privește curgerea topiturii în baia de sudare), atunci presiunea statică calculată după relația anterioară se transformă integral în presiune dinamică, conform legii lui Bernouli. Această transformare este dată de relația :

$$\Delta p = p_d = \rho \frac{w^2}{2} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (1.21)$$

unde:

p_d - presiunea dinamică [N/m^2]

w - viteza de propagare a curentului de topitură în baia de sudare [m/s].

Deși se consideră o singură mișcare a topiturii, curentul nu poate fi considerat omogen astfel diferite părți ale acestuia vor avea viteze diferite. Părțile acestuia aflate în profunzime vor avea o viteză mai mică datorită faptului că propagarea acestuia va trebui să învingă presiunea hidrostatică. Mișcarea curentului de topitură depinde de forma băii de sudare și poziționarea keyhole. Dacă baia de sudare este largă la suprafață curentul va ocoli keyhole la suprafață. Dacă baia de sudare este îngustă atunci curentul va fi împins în interiorul băii de sudare și va trece pe sub keyhole. Astfel are loc un mecanism convectiv de transfer al căldurii care aduce căldura în profunzimea băii de sudare.

Sudarea folosind oscilator laser cu CO_2 aduce ca aspect particular formarea de plasmă. Zona de interacțiune dintre fascicolul laser și material conține atomi puternic ionizații. Plasma formată se comportă ca un mediu care interacționează cu fascicolul laser. Formarea de plasmă este factorul care limitează timpul de interacțiune dintre fascicolul laser și piesă. [Park, 2002] a arătat că plasma se comportă ca o lentilă care poate să focalizeze, să defocalizeze sau să încline fascicolul laser în raport cu suprafața piesei.

Prezența keyhole are un rol în absorbția radiației laser. Absorbția radiației laser are loc simultan cu vaporizarea puternică. Pentru iradierea cu laser Nd :YAG absorbția are loc la datorită reflexiilor Fresnel la suprafața băii de sudare, partea superioară a keyhole și interiorul keyhole.

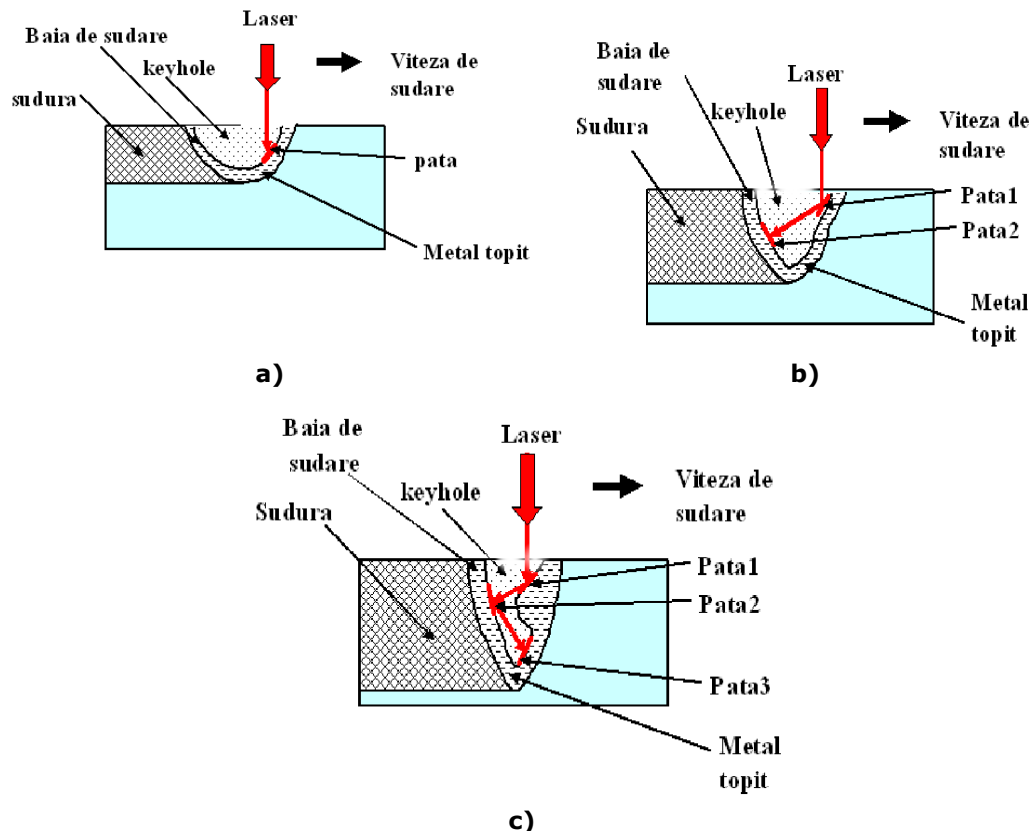


Figura 1.16 Propagarea și absorbția radiației în keyhole a) o pată importantă unde are loc absorbția b) Două pete importante pentru absorbție c) Propagarea de raze în keyhole

La reflexia Fresnel radiația reflectată are intensitate mai mică decât cea incidentă, astfel se absoarbe energie în material. Pentru perioada de evoluție și menținere a keyhole fascicolul laser iradiază peretele din față al keyhole (în direcția de sudare) fiind poziționat excentric în raport cu axa fascicolului laser. Prima reflexie a radiației produce vaporizare puternică deformarea peretelui din față al keyhole, următoarea are loc pe peretele din spate, urmate de mai multe reflexii de efect mai slab în interior figura.1.16a [Jouvard, 2000] a arătat că prima și a doua reflexie Fresnel au principalul efect în absorbția radiației laser în material. Aspectul cantitativ al energiei absorbite prin reflexia Fresnel depinde de unghiul de incidență a radiației relativ la suprafața instabilă a băii de sudare sau peretele din față al keyhole. La reflexia Fresnel participă o parte a fascicolului laser. Dimensiunea fascicolului limitează numărul de reflexii. Propagarea fascicolului laser convergentă sau divergentă modifică intensitatea fascicolului laser la suprafața băii de sudare. Considerarea de raze adimensionale permite un număr mare de reflexii, inclusiv

ieșirea radiației din keyhole, fiind dependentă exclusiv de forma keyhole. Propagarea fascicolului laser în keyhole este prezentată figura 1.16.

Se remarcă următoarele situații de propagare a fascicolului laser în baia de sudare:

- **Absorția aproape totală a radiației într-o singură pată** (în baia de sudare sau peretele din față al keyhole). Aceasta consideră că datorită coeficientul de absorție ridicat în topitură (90%), absorția secundară a radiației în a doua pată, dacă există nu este semnificativă. ,figura 1.16 a. Absorția într-o singură pată se aplică inițierii keyhole sau unei keyhole unde radiația este reflectată afară din material.

- **Absorția în două pete datorate primelor două reflexii Fresnel.** Acesta reprezintă cazul cel mai probabil în care are loc absorția prin reflexii Fresnel multiple,figura 1.16 b.

- **Propagarea de raze adimensionale în keyhole** ,figura 1.16 c. Aceasta înseamnă vaporizarea puternică la peretele din față și mai slabă în interiorul keyhole. Această situație este favorizată de excentricitatea puternică a fascicolului laser în raport cu keyhole (viteza de sudare ridicată). A fost analizată teoretic de [Amara, 2004] și experimental s-a prezentat o keyhole în formă de cizmă observată de [Kaplan, 2002b]

Pentru iradierile care folosesc laser cu CO₂ apar alte două mecanisme de absorției a radiației în keyhole :

- Absorția prin atenuarea exponențială în plasma și vapori de desupra și interiorul keyhole a radiației după legea Beer-Lambert, alături de reflexiile Fresnel la suprafața materialului topit.

- Absorția în plasmă ca mediu opac și absorbant a radiației și transmiterea secundară și uniformă a energiei către pereții keyhole.

1.4 Metode și mijloace de cercetare a procesului de sudare în regim keyhole

Există două mari categorii de obiective în studiul procesului de sudare laser. Acestea pot fi formulate ca obiective tehnologice respectiv fenomenologice. Dintre obiectivele fenomenologice menționăm următoarele :

- investigarea apartenței menținerii și închiderii keyhole în baia de sudare;
- investigarea mișcării topiturii în baia de sudare;
- investigarea radiației emise din zona de interacțiune dintre radiație și material, fenomene specifice care au loc în plasmă și vapori.

Dintre obiectivele tehnologice se remarcă următoarele :

- studiul condițiilor în care se desfășoară procesul de sudare (caracteristici ale sistemului tehnologic, ale gazului protector, ale materialelor care se sudează);
- predicția parametrilor de proces variați pentru obținerea unor suduri de calitate cu caracteristici cerute;
- optimizarea procesului de sudare relativ la viteza de sudare, randamentul procesului, și indicator de cost.

Studiul procesului de sudare se desfășoară pe două mari direcții

- Studiul prin investigații în timpul procesului de sudare
- Studiul prin investigații asupra sudurii / îmbinării sudate

Sudarea în regim keyhole este obiect a ambelor tipuri de investigații. Studiul prin investigații în timpul procesului arată prezența keyhole și mișcarea topiturii în baia de sudare iar cele asupra sudurii arată capacitatea fascicolului laser de a topi materialul și prezența porozităților.

1.4.1 Investigații asupra fenomenelor care au loc în timpul procesului de sudare (on-line)

Se folosesc numeroase mijloacele tehnice de investigare a fenomenelor care au loc în timpul procesului de sudare. Dintre acestea menționăm filmări și fotografieri ale suprafeței băii de sudare folosind camere rapide care surprind imagini în timpi sub 1ms. Se folosesc camere în infraroșu, camere în ultraviolet și spectrometre cu diferite domenii spectrale de rezoluție. Radiația emisă în zona de interacțiune dintre laser și material este transmisă acestor aparate prin fibră optică. Filmarea zonei de interacțiune arată instabilități puternice în zona iradiată. Aceste sunt mai numeroase decât cele observate la îmbinarea sudată. Selectarea anumitor fenomene fizice particulare oferă informații despre proces. Se efectuează măsurători ale temperaturii suprafeței prin termografie și pirometrie optică. Se urmărește emisia unei anumite lungimi de undă a radiației din diferite părți ale băii de sudare, folosind spectrometrul sau fotodiode în scopul studierii plamei sau a variațiilor suprafeței băii de sudare. Pentru a pune în evidență mișcări ale suprafeței băii de sudare se folosește un laser cu He-Ne și se studiază variațiile intensității radiației reflectate. Cercetările realizate în timpul procesului de sudare au în vedere următoarele tipuri de probleme, prezentate ca obiective centrale :

- determinarea experimentală a coeficientului de absorbție a radiației laser;
- observarea keyhole în raze X;
- monitorizarea procesului de sudare prin investigarea :vaporilor, plamei, radiației emise de suprafața băii de sudare, sunetelor emise, toate acestea și fiecare în parte pot fi asociate cu prezența keyhole;
- observații asupra mișcării topiturii și variației temperaturii în baia de sudare.

Aceste probleme vor fi discutate în cele ce urmează alături de condițiile experimentale în care au fost abordate.

În lucrarea [Peret, 2000] sunt enumerate câteva astfel de studii legate de investigarea absorbției radiației laser în timpul procesului de sudare pentru laserul cu Nd:YAG. O metodă propusă o reprezintă o măsurătoare directă de temperatură. Pe partea opusă celei iradiate a piesei se lipește sau se sudează un sensor termic. Estimarea absorbției include un calcul termic pe baza ecuației căldurii. Estimarea este aplicabilă pentru piese subțiri și în situația cunoașterii poziției relative între fascicolul laser și senzor. Prin această metodă s-a obținut la o iradiere de 15ns pentru Al o absorbție de 18-20% pentru Fe o absorbție de 50% și pentru Ti o absorbție de 38 %. Un alt tip de măsurători efectuate sunt cele calorimetrice. Acestea compară efectul termic produs de radiația reflectată cu cel produs de radiația directă. Măsurătorile directe au arătat o absorbție de 50% pentru oțel fără Ni iar de 30%. pentru oțel inox. S-a folosit o iradiere cu fascicul laser la un unghi de înclinare de 45° față de suprafața piesei. O altă metodă constă în înlocuirea măsurarea efectului termic în material cu măsurători ale radiației emise de suprafața piesei prin folosirea de fotodiode. Folosirea unei sfere integrante (cavitate cu suprafață cu nisip care formează în interior un câmp electromagnetic uniform) permite luarea în calcul a radiației reflectate difuz.

Studiul suprafeței băii de sudare arată o parte din fenomenele legate de keyhole. Astfel se evidențiază deschiderea keyhole și plasma care se produce în această zonă (în cazul iradierii cu laser CO₂). Observarea keyhole produsă în baia de sudare se poate face prin filmarea acesteia folosind imagini în raze X pentru metale. Această investigație presupune realizarea procesului de iradiere laser în dreptul sursei de raze X. În imaginea cu raze X zonele cu densitate mai mică decât a materialului de bază apar de culoare deschisă. Acestea sunt asociate cu prezența

vaporilor în material. Kaplan a observat keyhole în Zn [Kaplan, 2002b] Acesta a prezentat fotografii ale keyhole care arătau creșterea acesteia la partea inferioară "forma de cizmă". S-a realizat de asemenea descrierea etapelor care intervin de la formarea keyhole până la închiderea acesteia. S-a studiat prezența unei keyhole largă în Zn lichid, pentru o durată a pulsului de 10ms. Temperatura de vaporizare a fost atinsă după o perioadă de 1-2 ms, aceasta etapă este similară cu o găurire laser. După 3-4 ms se obține o keyhole stabilă iar presiunea vaporilor ejectați acționează ca o barieră împotriva gazului protector înconjurător. Închizând iradierea în acest moment se evită aceea formă de cizmă a keyhole. După atingerea unei limite staționare de penetrare energia ulterior absorbită este folosită pentru expansiunea keyhole. Pereții keyhole se detașează din fascicolul laser, proces care durează până la sfârșitul pulsului. Această expansiune micșorează atât presiunea gazului cât și tensiunea superficială. Are loc o curgere inversă a gazului protector. După terminarea pulsului are loc post vaporizare (100 ns) și o relaxare a vaporilor la presiunea mediului ambient (5-20 μ s). O răcire rapidă a peretelui keyhole are loc în 0,01-1 ms, are loc o condensare a vaporilor, presiunea de saturație în keyhole care este mai mică decât cea a mediului înconjurător și în consecință are loc curgerea inversă a gazului protector. Închiderea keyhole este dată de tensiunea superficială, keyhole este gătită și astfel este separată o bulă de gaz în interiorul lichidului. Aceasta conține vapori și gaz protector. Bula de gaz continuă să se condenseze până atinge o formă sferică (5ms). Aceasta se ridică spre suprafața băii de sudare în 60-80 ms dacă nu este prinsă de resolidificare. Menționăm că această exprimare teoretică poate fi asociată numai cu observațiile experimentale efectuate. Această exprimare în formarea și evoluția keyhole nu ia în considerare mecanismul de închidere a keyhole datorat mișcării topiturii. Acesta a fost considerat în lucrarea [Xie, 1999]. Mișcarea topiturii poate aduce modificări în toate etapele care, care au fost prezentate în schema anterioară.

În lucrarea [Girard, 1999] s-au prezentat imagini în raze X asupra keyhole în tantal și oțel. Se remarcă o etapă de „formare a keyhole” când vaporii sunt grupați în material și o etapă de închidere în care se pot observa una sau mai multe bule de gaz dispersate în material. S-a modelat keyhole sub formă de cilindru înclinat. A fost modelată evoluția keyhole, scopul de modelare fazei de solidificare și de apreciere cantitativă a porozităților și cavităților care se obțin în sudură.

Studiile enumerate anterior arată principalele aspecte asupra formei keyhole în baia de sudare. Astfel se poate întâlni un capilar subțire și adânc, o cavitate lărgită instabilă, două cavități apărute simultan sau bule de vapori dispersate aleatoriu în baia de sudare. Regimul de iradiere și constantele termice ale materialului fac diferența între aceste manifestări. Formularea teoretică a unor considerații despre forma și evoluția keyhole general valabile este dificilă. Observațiile care vor fi prezentate în continuare au ca obiect central investigarea băii de sudare în alcătuirea căreia keyhole are un rol important.

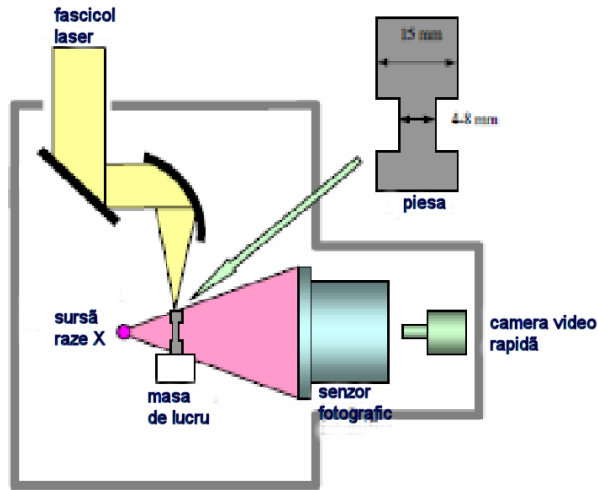


Figura 1.17 Montaj experimental pentru studiul procesului de sudare în raze X după [Tsukamoto, 2004]

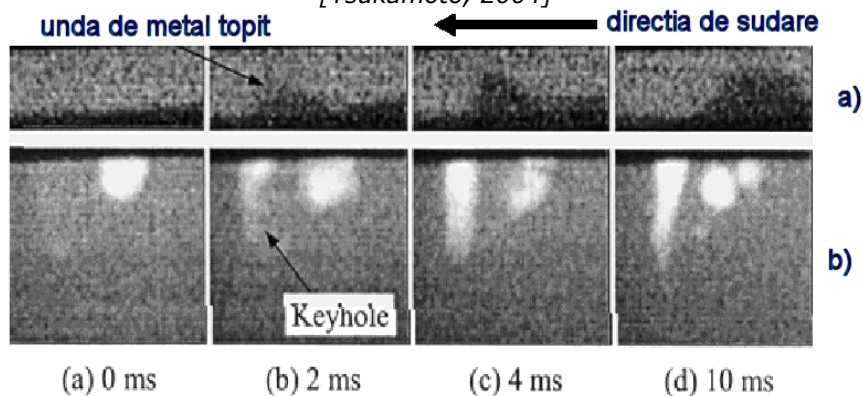


Figura 1.18 Observați asupra keyhole și a suprafeței băii de sudare în timpul procesului de sudare după [Tsukamoto, 2004]

Tsukamoto a efectuat observații ale keyhole în raze X [Tsukamoto, 2004]. Schema montajului experimental este prezentată în figura 1.17. Fotografii ale suprafeței băii de sudare cu prezența keyhole asociate cu mișcarea topiturii la suprafața băii de sudare sunt prezentate în figura 1.18. Piesa a fost complet penetrată în timpul sudurii. Piesa a făcut parte dintr-o incintă aflată sub presiune. Astfel s-a urmărit menținerea unei keyhole deschise la ambele capete, fiind alimentată atât datorită gazului protector cât și a gazului din incintă. În acest fel s-a forțat menținerea deschisă a keyhole. Fotografierile cu camera rapidă a surprins mișcarea topiturii la suprafața băii de sudare.

Jin a efectuat cercetări asupra keyhole în sticlă GG17 (Pyrex) folosind iradiere cu laser cu CO₂ [Jin, 2002]. Schema montajelor experimentale folosite de Jin este prezentată în figura 1.19.

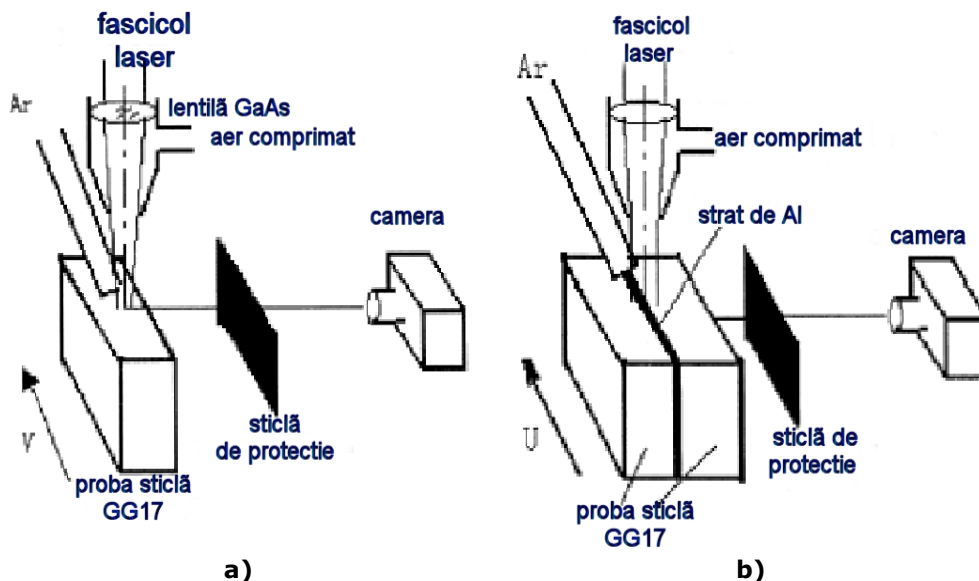


Figura 1.19 Montaj experimental pentru observarea keyhole după [Jin, 2002]
 a) observarea keyhole în sticlă b) observarea keyhole într-un strat de aluminiu

Keyhole a fost observată prin fotografiere, sticla fiind transparentă. S-a observat o keyhole dreaptă. Curgerea topiturii a fost mai redusă deoarece sticla topită are o vâscozitate mai mare comparativ cu metalele topite. S-a studiat experimental formarea și evoluția keyhole în timpul procesului de sudare folosindu-se un laser cu CO_2 de 1kW. Materialul folosit a fost sticlă GG17. Viteza de sudare a fost de 6m/min. Vizualizarea s-a realizat cu camera rapidă în timpul procesului. S-a modelat forma, bidimensional în secțiune în direcția de sudare, pentru peretele din față și peretele din spate al keyhole cu ajutorul unor polinoame de gradul 3. S-a considerat absorbția Fresnel în fiecare punct în funcție de unghiul de incidență. S-a folosit o metodă iterativă pentru a modela evoluția în timp a keyhole. S-a observat că cea mai mare parte a radiației este absorbită în prima zonă în care are loc reflexia. Energia radiației laser este absorbită în principal la peretele din față al keyhole. Reflexiile multiple nu influențează decât absorbția radiației laser la partea inferioară a keyhole. Distribuția intensității razelor care se reflectă în keyhole depinde de intensitatea radiației incidente. Pentru peretele din față al keyhole este descrisă o balanță energetică între energia incidentă și fluxul energetic pierdut. Pe peretele din spate al keyhole sunt numai niște maxime unde se absoarbe radiație datorită reflexiei, restul peretelui nefiind iradiat. Sticla oferă un mediu propice de studiu al fenomenului de reflexii în keyhole deoarece nu se formează plasmă (în cazul iradierii cu laser CO_2) și sticla topită nu curge la fel de repede ca metalele din cauza vâscozității ridicate. Astfel nu există o modificare necontrolată a formei keyhole care conduce la variația necontrolată a unghiului de incidență.

O altă metodă de investigare a constat în surprinderea de imagini ale keyhole produsă într-un strat de pulbere metalică (aluminiu) situat între două bucăți de sticlă cu camera rapidă [Jin, 2008]. Acest studiu a prezentat măsurători asupra keyhole observată. S-au formulat următoarele concluzii:

- Profundimea keyhole scade cu creșterea vitezei de sudare ;
- Diametrul keyhole este relativ constant cu variația vitezei de sudare ;

- Profunzimea maximă a keyhole se obține pentru focalizarea la suprafață ;
- Creșterea vitezei de sudare conduce la creștere înclinării peretelui din față al keyhole.

Acest tip de studiu a fost detaliat de [Zang, 2007]. S-au analizat suplimentar efectul sticlei în transmiterea radiației, temperatura plamei și densitatea electronică a acesteia. S-a arătat că adâncimea keyhole atinge valoarea maximă pentru o grosime a stratului de Al de 0.3 mm.

Prin studiile anterior menționate s-a constituit o alternativă la studiul fenomenului de keyhole în raze X. Ea oferă posibilitatea obținerii de rezultate mult mai detaliate și mai rapid privind baia de sudare.

Seto și Katayama [Seto, 1999] au realizat observații în raze X asupra procesului de sudare laser pentru un oțel mediu (cu conținut de 0,3 % C). S-a folosit un sistem tehnologic laser cu CO₂ cu putere de 15 kW în regim continuu. Formarea, creșterea și închiderea keyhole au corespundent în formarea norului de plasmă metalică. Profunzimea cavității este proporțională cu mărirea norului de plasmă metalică. În cazul folosirii unei puteri mai mici de 10 kW pentru sudare în regim continuu și folosirea azotului ca gaz protector s-au obținut multe porozități mari mai ales la partea inferioară a sudurii. Înlocuirea azotului cu heliul în aceleași condiții a dus la eliminarea unei mari părți din porozități. În cazul folosirii heliului plasma metalică și plasma gazului protector au fost menținute continuu în timpul procesului de sudare. În ambele tipuri de plasmă s-au observat instabilități asociate cu deschiderea repetată a keyhole și cu formarea de porozități observate în sudură. Folosirea azotului ca gaz protector a arătat formarea puternică a plamei de azot care blochează pătrunderea radiației. Creșterea plamei de azot corespunde închiderii plamei metalice și a keyhole. Se observă o întrerupere a formării de porozități odată cu apariția plamei de azot pentru o scurtă perioadă de timp. Formarea plamei de azot realizează o modulare a iradierii asemenea regimului pulsant. Ciclul între formarea plamei de azot și cea metalică este puternic influențat de natura materialului.

În lucrarea [Fujinaga, 1999] a fost fotografiată keyhole în raze X în timpul procesului de sudare laser pentru oțel inox SUS3003. S-au folosit două regimuri de iradiere în undă continuă având 2.3 kW și unul pulsant de 0.4 kW. Radiația a fost transmisă către piesă prin fibră optică. S-au efectuat modulări ale pulsului pentru diferite poziții de sudare și modulări ale pulsului. S-a studiat baia de sudare pentru următoarele poziții ale laserului relativ la piesă, sudare în plan, sudarea pe orizontală, sudarea pe verticală și sudarea peste cap. Prezența keyhole a fost observată în toate pozițiile de sudare. Aceasta a atins mărirea maximă la 2ms după începerea iradierii. În sudarea pe orizontală și cea peste cap s-au obținut penetrări mai mari datorită suprimării respectiv inversării efectului forței gravitaționale care acționează asupra materialului topit. În sudarea pe verticală keyhole a fost închisă rapid imediat după formare datorită curgerii metalului topit, crescând astfel numărul și mărirea porozităților obținute în sudură.

În lucrarea [Inoue, 1999] este investigat procesul de sudare laser folosind un laser cu CO₂ care emite în regim continuu CW având o putere de 20 kW asupra unui oțel cu conținut mediu de carbon (mild steel) cu grosimea de 25mm. Montajul experimental este prezentat în figura 1.20. În urma analizei rezultatelor experimentale s-a constatat că frecvența radiației emise scade cu profunzimea însă amplitudinea radiației crește. S-a dedus o formulă care estimează profunzimea keyhole și care separă semnalul optic provenit din profunzime de cel venit de la partea superioară a keyhole.

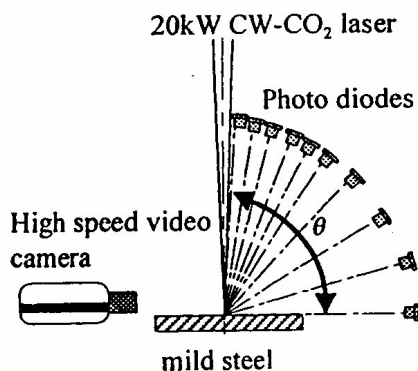


Figura 1.20 Montaj experimental , folosirea de fotodiode pentru studiul keyhole după [Inoue, 1999]

În lucrarea [Sibiano, 2005] se prezintă un studiu în sudarea laser , folosind un laser CO₂ a unui aliaj de Al – Mg. S-a arătat că plasma generată în timpul sudării laser emite radiație în domeniul spectral 190 nm-400nm, adică în domeniul UV. Scânteile rezultate au o emisie luminoasă însă emisia cea mai puternică se află în domeniul infraroșu 1000-1600 nm. Montajul experimental este prezentat în figura 1.21. Radiația emisă de norul de plasmă a fost analizată folosind un spectrometru. Radiația este captată din zona de interacțiune cu ajutorul unui obiectiv și transmisă prin fibră optică la aparat. Spectrele obținute au arătat starea de ionizare a atomilor. Unele linii spectrale obținute au fost folosite pentru a efectua corelații cu caracteristicile sudurii.

În lucrarea [Park, 2002] se prezintă o analiză a radiației provenite din baia de sudare folosind fotodiode cu absorbție în domeniile UV și IR, a considerat ca factorii care afectează calitatea sudurii: energia inițială optimă, energia inițială minimă pentru a avea loc procesul, abaterile datorate duzei de gaz, diferența de poziționare. S-au efectuat corelații între semnalul obținut de la fotodiode și defectele din sudură.

[Zang, 2004] a efectuat sudării folosind atât laser cu CO₂ cât și laser cu Nd:YAG sub apă. Grosimea stratului de apă a variat între 3 și 10 mm. S-a folosit în același timp și protecția gazoasă. S-a monitorizat semnalul emis din zona de interacțiune atât în domeniile IR cât și UV. Sudurile realizate au fost în regim keyhole.

În lucrarea [Hoffman, 2004] se studiază norul de plasmă indus în timpul sudării cu laser CO₂ în undă continuă. De asemenea au fost realizate fotografii în culori cu o cameră rapidă ale norului de plasmă. Gazul protector folosit a fost argonul. Rezultatele au arătat că există două plasmă una de argon și una de fier. S-a găsit că în timpul puternicilor aruncări ale plasmei din keyhole plasma este formată în principal din vapori metalici iar aceasta nu este diluată de gazul protector. Densitatea spațială a electronilor determinată pentru liniile 7503,87 și 7514,65 Å ale argonului ajunge la $(0,75-1,05) \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, depinzând de distanțele de la suprafață. Presupunând că argonul nu este amestecat cu vapori metalici și se află la un echilibru termodinamic local se obține o temperatură a plasmei de 12000-13000 K. La vârful coloanei de vapori ejectați densitatea spațială a electronilor determinată din linia 5383,37 Å a fierului este de $(0,6-1) \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$. Simulările numerice arată că maximul densității electronice se ridică în centrul plasmei la $1,8 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ pentru

argon și la $2,45 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ pentru fier. În consecință absorbția radiației în plasmă ajunge la aproximativ 5% în cazul argonului și la 10% în cazul fierului.

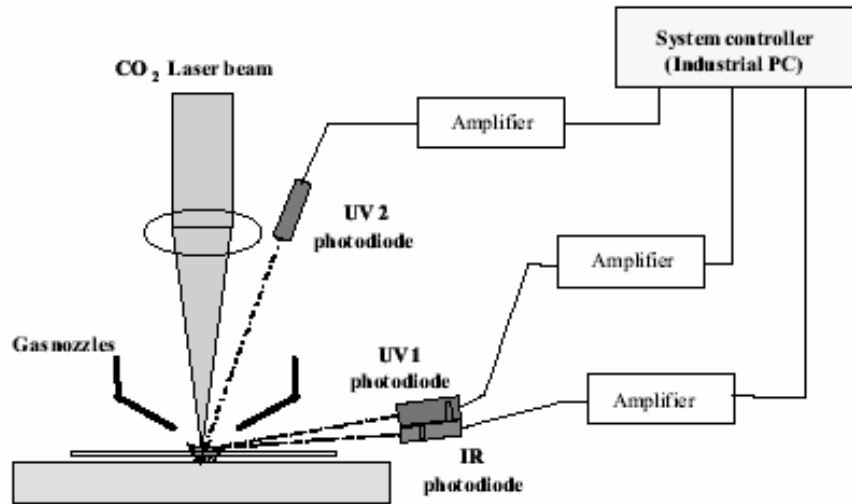


Figura 1.21 Montaj experimental, folosirea fotodiodelor pentru investigarea procesului de sudare după [Sibiano, 2005]

Lucrarea [Wang, 2002] prezintă modelări ale distribuției spațiale ale plasmăi. Caracteristicile norului de plasmă sunt afectate de mulți factori cum ar fi temperatura și viteza de curgere a vaporilor metalici care părăsesc suprafața piesei sudate, viteza gazului protector coaxial indus cu fasciculul laser și viteza gazului asistent injectat lateral și de absorbția de energie în plasmă și pierderile de energie prin radiație în norul de plasmă. Sunt prezentate calcule tipice ale distribuției de temperatură, vitezei, concentrația vaporilor, coeficientului de absorbție și indicelui de refracție în norul de plasmă pentru cazul sudării cu laser cu CO₂ în undă continuă și o piesă de fier. Temperaturile prezise în norul de plasmă coincid într-un mod rezonabil cu cele determinate experimental. Înălțimea plasmăi este determinată de raportul momentelor dintre vaporii metalici și gazul protector. Datorită efectului de răcire al gazului protector norul de plasmă devine mai mic iar absorbția și refracția de către norul de plasmă poate fi redusă crescând viteza jetului de gaz. Jetul de gaz lateral are și el un efect semnificativ asupra norului de plasmă și poate fi folosit în controlul procesului de sudare.

Investigarea experimentală prin metode spectroscopice asupra plasmăi prezintă anumite limite. Astfel pe de o parte se ajunge la punerea în evidență efectul sursei laser în excitarea materialului. Acestea nu sunt specifice unui proces de sudare, deoarece lipsește caracterul dinamic (efectul vitezei de sudare) și nu se abordează problema formării topiturii. Spectrele de emisie și de absorbție sunt specifice metalului respectiv sau gazului protector. În acest mod analiza detaliată a keyhole se depărtează de procesul de sudare și de parametrii acestuia.

Unul din studiile în care a fost realizată monitorizarea procesului de sudare laser prin înregistrarea sunetelor produse în timpul procesului a fost lucrarea [Nakamura, 2001]. S-a studiat sudarea cu laser Nd:YAG în regim continuu. Sunetele emise în timpul sudării au în general frecvență joasă. Rezultatele experimentelor au

fost prezentate sub formă de rapoarte ale intensităților sunetelor. Acestea au fost prezentate pentru fiecare putere a fascicolului laser folosită în experiment. Un montaj experimental pentru înregistrarea sunetelor este prezentat în figura 1.22.

Lucrarea [Semak, 1995] conține un studiu experimental și un model teoretic pentru oscilațiile care au loc în baia de sudare. Experimentele s-au efectuat folosind un laser CO₂ Rofin Sinar RS3000 care operează în modul TEM₁₀ la 2,4-3kW pentru trei regimuri pulsate cu timpul pulsului de 20 ms la 25Hz, un singur puls la 20ms și respectiv regim continuu. Baia de sudare a fost iluminată din lateral cu un laser cu argon la 45°. În partea opusă radiația reflectată a fost observată cu un fotomultiplicator sau cu camera rapidă. S-au observat oscilații care au avut aceeași lungime de undă ca și dimensiunea băii de sudare (1mm). Deschiderea keyhole a fost egală cu diametrul fascicolului laser de 0,4mm. Inițial oscilațiile băii de sudare au fost de 200-300Hz. La 5ms după închiderea pulsului oscilațiile au continuat să crească în frecvență pe măsura creșterii timpului atingând 500Hz și apoi 1000Hz (depășind aceasta valoare) înainte de solidificare care are loc într-un timp egal cu timpul pulsului. S-au mai observat oscilații ale suprafeței băii de sudare cu lungimea de undă de 0,25mm. Procesul de solidificare nu are loc uniform. Acesta, în principiu este egal cu timpul pulsului. În prima jumătate a timpului de răcire baia de sudare își reduce diametrul cu 20-30%, iar în a doua jumătate are loc o solidificare rapidă și a restului de 70-80%. S-au modelat teoretic apariția oscilațiilor întregii băi de sudare. Ca și cauze ale acestor oscilații s-au identificat ca fiind unde capilare și mișcarea volumică unei părți a topiturii în totalitatea sa. S-a calculat frecvența oscilațiilor și masa materialului care oscilează. După închiderea pulsului masa materialului care oscilează scade. Astfel se explică creșterea frecvenței oscilațiilor.

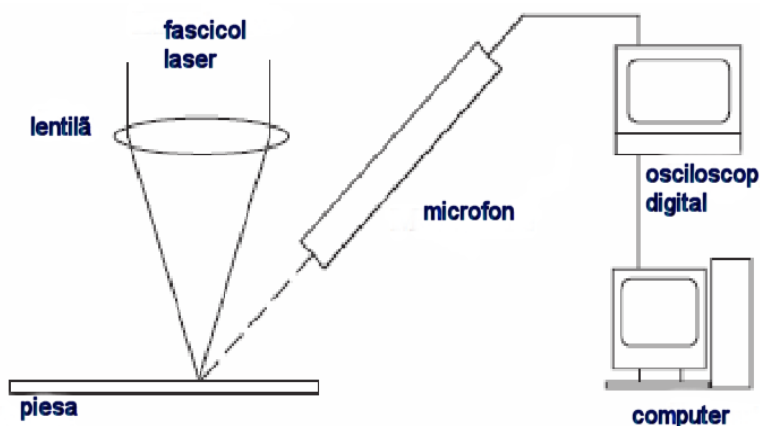


Figura 1.22 Montajul experimental pentru studiul sunetelor emise în procesul de sudare după [Sasaki, 2001]

În lucrarea [Matsunawa 1998] se prezintă un studiu experimental asupra mișcării topituri în baia de sudare. Experiențele au fost efectuate folosind laser cu CO₂ în CW (undă continuă), 5 și 45 kW, asupra aliajului de aluminiu A5085 și oțel inox.304. Sistemul de investigație a constat dintr-un dispozitiv care permitea vizualizarea băii de sudare în raze X. S-au obținut imagini ale băii de sudare care arată forma peretelui din față și forma peretelui din spate al keyhole. Baia de sudare a prezentat mai multă topitură la parte din spate a keyhole. În această parte a fost observată mișcarea particulelor de marcaj. S-au măsurat viteze de 0.3-0.5

m/s, iar incluziunile de gaz și vaporii metalici dizolvați în lichid se mișcă în același mod ca și particulele de marcaj (și incluziunile și gazul protector). Aceste incluziuni nu plutesc la suprafață ci se scufundă în interiorul topiturii ceea ce explică prezența porozităților. În studiu s-a urmărit obținerea conturului părții din spate a băii de sudare. În cazul sudării aliajelor de Al, baia de sudare este alungită. În secțiune sudura arată o penetrare scăzută. Aceasta se datorează unui transfer de căldură prin convecție. S-a observat producerea de ridicături la peretele din față al keyhole asociată cu evaporarea puternică a metalului. Astfel se observă efectul presiunii de recul la mișcarea topiturii. La peretele din față al keyhole se observă existența numai a unui strat subțire de lichid.

Studiile discutate anterior arată că există o preocupare deosebită pentru studiul keyhole în sudarea laser. Aceasta implică mijloace fizice și tehnice importante. Fenomenul de keyhole în baia de sudare are o amploare mai mare în cazul folosirii laserilor cu CO₂ din cauza puterilor mai ridicate și a apariției plasmei. Astfel se acordă o importanță observațiilor asupra keyhole în cazul folosirii laserilor cu CO₂. Apare astfel studiul keyhole ca obiect de studiu în sine. Ca primă aplicație tehnică a acestor studii apare controlul și monitorizarea procesului de sudare. Legătura acestor rezultate experimentale cu parametrii de proces (putere, viteză defocalizare) este slabă. Aceasta se datorează faptului că studierea keyhole ca obiect de studiu în sine impune alegerea acelor parametri care sunt favorabili iar regimul keyhole este puternic astfel încât răspunsul sistemelor de analiză să fie consistent. Interpretarea rezultatelor la nivel teoretic conduce tot către aplicarea cunoștințelor în situații particulare.

1.4.2 Investigații asupra sudurilor (off-line)

Din punct de vedere al macrostructurii, o asamblare realizată prin sudură este presupusă ca având aceleași proprietăți ca materialul din vecinătatea sa. Din punct de vedere al microstructurii trebuie ținut cont de ciclul termic și de consecințele sale asupra materialului. În cazul sudurii cap la cap, pentru a avea o sudură rezistentă, cele două piese trebuie bine poziționate astfel ca cele două fețe să contribuie în mod egal la topire. În urma sudării se elimină interfața fizică dintre cele două piese. O sudură este caracterizată de trei zone principale [CTIM]:

1. Zona topită reprezintă materialul topit și resolidificat. În zona topită se realizează îmbinarea dintre cele două piese de sudat. Această zonă este limitată de izoerma de topire.

2. Zona afectată termic (Z.A.T.) reprezintă zona în care materialul suferă transformări structurale ireversibile datorită transferului termic prin conducție de la topitură la metalul de bază.

3. Metalul de bază neafectat termic.

Zona topită este constituită de dendrite obținute prin cristalizare pornind de la ciclu termic. Ciclu termic constă în încălzirea, topirea și apoi solidificarea materialului. Determinarea acestor cicluri termice în sudarea laser este investigată cu ajutorul termocuplelor plasate în apropierea unei linii de fuziune. Vitezele de solidificare în sudarea laser au același ordin de mărime ca viteza de sudare exprimată în mm/s. Forma sudurii, în secțiune, este de tipul cap de cui. Aceasta este caracteristică sudurii cu energie concentrată, sudură cu laser sau cu fascicul de electroni. Se remarcă o perfectă similitudine între forma teoretică a izotermelor și orientarea cristalelor. În funcție de aliajele folosite se remarcă efecte de microsegregație dar în general fazele formate sunt cele prevăzute de diagramele de

echilibru, cu precizarea că soluțiile solide sunt suprasaturate. Zona topită poate avea aceleași tipuri de defecte care se întâlnesc la turnare.

Zona afectată termic reprezintă o zonă în care au loc modificări ale structurii metalului. Aceasta înconjoară zona topită și resolidificată a sudurii. Pentru cazul unui metal pur sau al unui aliaj care nu prezintă transformări alotropice, această zonă este prezentată exclusiv prin creșterea grăunților și astfel se obține o creștere a fragilității intrinseci.

Partea cea mai importantă în studiul sudurilor o constituie zona secțiunii prin sudură. Această este zona în care se pune în evidență schimbarea aspectului metalografic al metalului. Ea prezintă zona topită a sudurii și zona afectată termic. Forma secțiunii are dependențe principale în funcție de timpul de interacțiune (controlat prin viteza de sudare) și în funcție de puterea fascicolului laser [CTIM], figura 1.23.

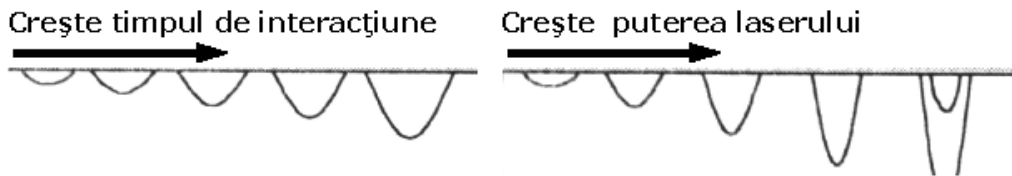


Figura 1.23 Variația formei secțiunii sudurii în funcție de timpul de interacțiune și de puterea laserului [Miyachi Lasers b]

Secțiunea prin suduri arată defecte care se obțin în timpul procesului de sudare. Acestea au o influență directă asupra rezistenței mecanice a sudurilor. Defectele de sudare obișnuite pot fi clasificate în:

- defecte de sudare datorate materialului (fisuri termice, porozități de hidrogen);
- defecte datorate caracteristicilor instabilității procesului de sudare (porozități mari și cavități).

Pentru regimul de sudare prin conducție principalele defecte care se obțin sunt fisurile în sudură figura 1.24

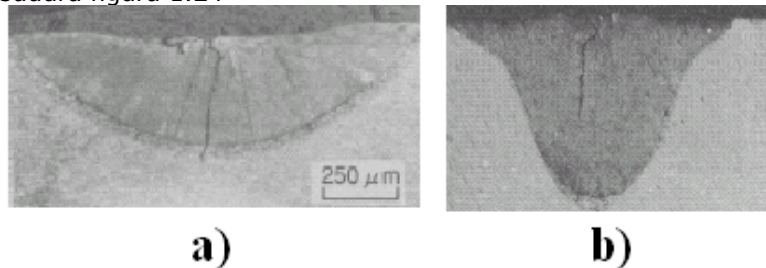


Figura 1.24 Fisuri în suduri pentru sudarea în regim de conducție a) după [Kaplan 2002] b) după

Pentru sudurile realizate în regimul de sudare keyhole principalele defecte observate sunt porozitățile, figura 1.25.

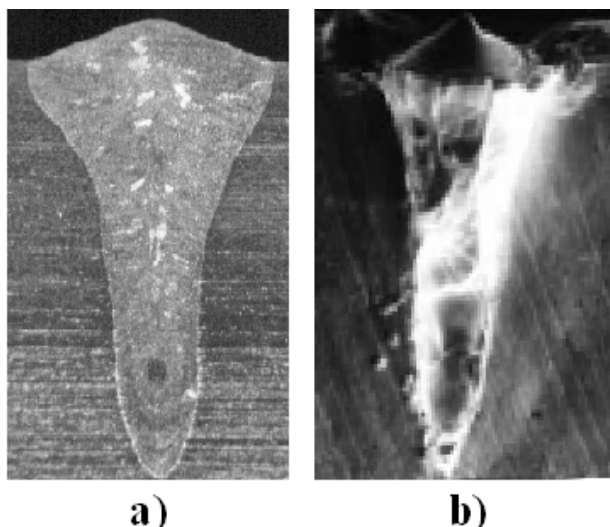


Figura 1.25 Defecte pentru sudurile realizate în regim keyhole a) porozități după [Lampa, 1997], b) cavități după [Jouvard, 2000]

Compoziția chimică a îmbinării sudate și structura materialului depinde de elementele de aliere existente în material și de prezența oxizilor la suprafață. Elementele de aliere cu punct de vaporizare coborât se vaporizează în timpul sudării. Aceste probleme au fost studiate în lucrarea [Ono, 1999]. În acest studiu s-a investigat procesul de sudare laser folosind un laser cu CO₂ cu putere maximă de 18 kW, viteză de sudare de 1.5 m/min, ca și gaz asistent s-a folosit He cu un debit de 50 l/min în montajul of-axial, focalizarea a fost realizată la suprafața piesei. S-au realizat experimente pentru suprafața piesei oxidată respectiv de oxidată. S-a constatat că filmul de oxid creează porozități care conțin gazele CO și CO₂ datorită absenței elementelor dezoxidante. În acest caz se formează o keyhole cilindrică și o baie de sudare redusă datorită vâscozității ridicate a metalului topit. Se produce de asemenea scăderea temperaturii la partea superioară a keyhole și în norul de plasmă. Procesul de sudare poate deveni instabil prin generarea de picături metalice sau contrar prin absența metalului topit. Prezența stratului de oxid a crescut domeniul în care este prezentă ferita γ de tip cubic și se produce o pierdere a elementelor durificatoare cum ar fi C, Mn, Si.

În lucrarea [Nath, 2002] se studiază sudarea laser pentru oțel inox AISI 304 folosind un sistem tehnologic laser cu CO₂. Se studiază experimental sudarea în regim de conducție și în regim keyhole. Zona topită este analizată din punct de vedere metalografic. Se observă că la viteze de sudare mari zona topită prezintă formațiuni columnare regulate orientate către centrul sudurii. Aceasta face ca în zona din centrul sudurii să fie posibilă apariția de fisuri în procesul de solidificare. Se prezintă o corelație între viteza de sudare și puterea laserului folosind aceste mărimi într-o formă normalizată (adimensională). S-a studiat modul de absorbție a radiației laser (relative la obținerea topiturii s-a arătat că aceasta a fost de 15% pentru sudarea în regim de conducție și de 65% pentru cea în regim keyhole. Folosirea unui tratament de pre-oxidare a suprafeței poate îmbunătăți absorbția cu 30–50%. Autorii remarcă rolul scăzut al efectului defocalizării asupra sudurii.

În lucrarea [Dausinger, 2002] este definită eficiența procesului de sudare. Aceasta apare ca produsul a două randamente. Eficiența procesului de sudare apare

ca produsul dintre eficiența de cuplaj între radiație și material și eficiența transferului termic.

$$\eta_p = \eta_A \cdot \eta_{th} \quad (1.22)$$

S-a considerat că aceste mărimi sunt calculabile pe baza raportului între profunzimea keyhole și diametrul petei focale. Dintre rezultatele obținute se remarcă o comparație între sudarea materialelor pe bază de fier și sudarea materialelor pe bază de aluminiu în funcție de intensitatea fascicolului și penetrarea sudurii. Pentru a obține aceeași eficiență termică la aluminiu comparativ cu fierul este necesară dublarea intensității absorbite care necesită o triplare a intensității inițiale. Creșterea cuplajului energetic între radiația laser și material în cazul folosirii regimului de sudare keyhole a condus la ideea aplicării dublei focalizări. Dubla focalizare constă în aplicarea pe suprafața piesei a două spoturi laser. Acestea pot fi provenite de la același fascicol laser despăcat în două sau de la surse laser diferite. Aranjarea celor două spoturi poate fi realizată în linie sau sensul de sudare sau în paralel. Acest procedeu mărește baia de sudare. Deși este crescută eficiența de cuplaj între radiația laser și material, eficiența termică scade astfel va scădea și eficiența procesului de sudare. Împărțirea în două a unui fascicol laser emis de o sursă va scădea intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei.

Lucrarea [Kugler, 2002] a arătat că forma secțiunii transversale a sudurii variază în funcție de forma pulsului (figura 1.26). Se observă că penetrarea cea mai mare a sudurii se obține în cazul în care variația pulsului are o formă dreptunghiulară în timp ce penetrarea cea mai slabă se obține pentru o iradiere continuă. Altfel spus o iradiere continuă favorizează distribuția energiei în părțile laterale ale băii de sudare în timp ce iradierea porționată favorizează pătrunderea în profunzime. Aceste rezultate arată că în ceea ce privește eficiența la penetrarea sudurii și creșterea cantității de topitură obținută este utilă creșterea intensității fascicolului laser urmată de scăderea bruscă a acesteia. Modularea intensității fascicolului laser este utilă în ceea ce privește creșterea cantității de topitură obținută.

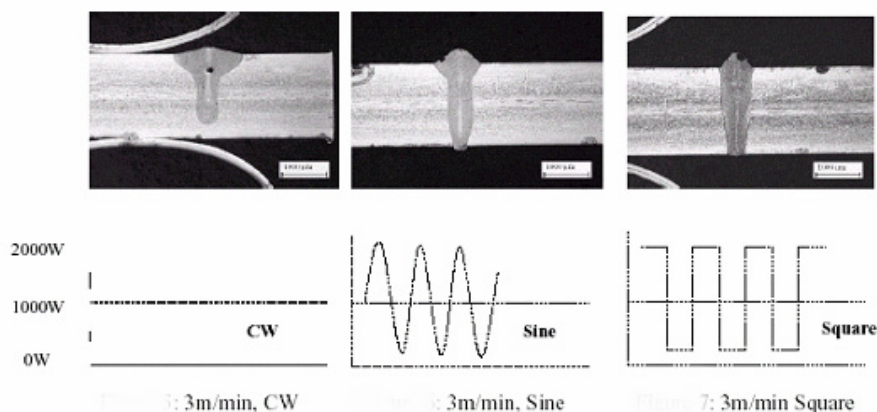


Figura 1.26 Forma temporală a pulsului laser comparată cu secțiunea finală a sudurii după [Kugler, 2002]

Un studiu care a avut ca obiect sudarea mixtă între oțel și aluminiu a fost prezentat [Sierra, 2007]. Sudurile realizate au fost în regim keyhole. S-au realizat investigații

asupra transformărilor metalografice în zona sudurii și în zonele afectate termic pentru cele două metale.

În lucrarea [Xie, 2002 b] a fost folosită dubla focalizare pentru sudarea laser a tablelor de oțel 1045 și aliaj de aluminiu 5052. S-a folosit un laser cu CO₂ de putere 6kW. Fascicolul laser a fost despărțit în două spoturi de puteri egale. Cele două spoturi au fost focalizate pe suprafața piesei în linie în direcția de sudare (unul urma celuilalt). Schema de principiu pentru procedeul dublei focalizări a fascicolului laser la suprafața piesei este prezentat în figura 1.27.

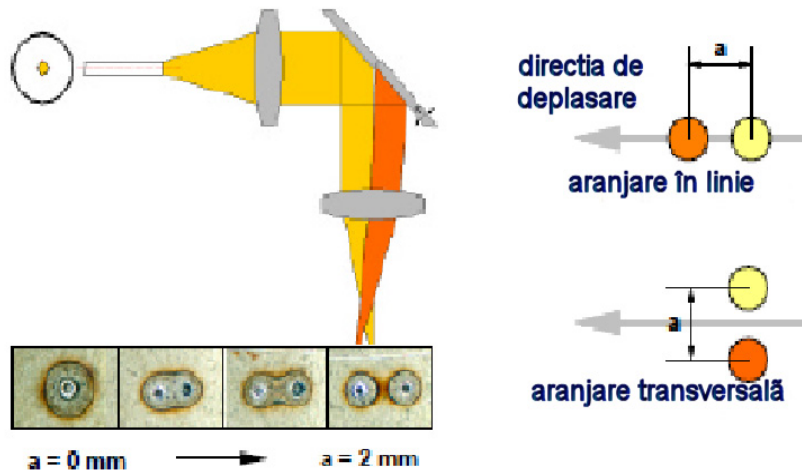


Figura 1.27 Schema de principiu pentru folosirea dublei focalizări după [Seefeld, 2004]

Gazul protector folosit a fost Helium. Unele din valorile folosite pentru viteza de sudare, pentru oțel au fost de 1.25 m/min și 7.62 m/min. Procesul a fost investigat prin fotografiere cu camera rapidă. A fost măsurată rugozitatea suprafeței sudurii. Sudurile realizate au fost fotografiate în raze X pentru detectarea porozităților. Calitatea suprafețelor sudurii s-a îmbunătățit prin folosirea dublei focalizări iar în cazul Al s-au obținut mai puține porozități. Variațiile și instabilitățile din norul de plasmă sunt asociate cu formarea defectelor în sudură, în cazul folosirii laserilor cu CO₂. Norul de plasmă a fost mai mare și mai stabil în cazul folosirii dublei focalizări decât în cazul focalizării într-un singur spot. La viteze de sudare mari (7.62 m/min) a fost observată despărțirea norului de plasmă în două. Sudurile au arătat o linie de fisură în centrul sudurii caracteristică sudurilor unde baia de sudare a fost îngustă.

În lucrarea [Xie, 2002a] s-a continuat investigația realizată asupra morfologiei sudurilor. S-a observat modificarea formei zonei topite a sudurii în secțiune la dubla focalizare comparativ cu focalizarea într-un singur spot. La dubla focalizare s-a obținut o keyhole lărgită sau două deschideri consecutive ale keyhole. Aceasta a dus la creșterea pierderilor de căldură prin conducție. A crescut zona afectată termic și a scăzut penetrarea sudurii. Creșterea spațiului dintre spoturi a dus la scăderea vitezei de sudare la care poate fi realizată sudura. Se prezintă un model analitic pentru a prezice vitezele de sudare limită la care poate fi realizat procesul de sudare.

Dubla focalizare este o metodă prin care se propune intensificarea fenomenelor care au loc în keyhole prin mărirea acestora. Se presupune că o keyhole mai largă permite mai multe reflexi. Fresnel și astfel ar crește cuplajul

dintre radiația laser și material. În realitate dubla focalizare scade intensitatea radiației laser la suprafață ceea ce afectează penetrarea sudurii și în general tot ce este legat de cuplajul radiației laser în material. Tot ce se obține este o modificare a fenomenelor fizice care au loc în baia de sudare. Aceste modificări pot să fie favorabile sau defavorabile pentru procesul de sudare.

Efectul regimului de iradiere asupra formării porozităților în sudură a fost investigată în lucrarea [Tsukamoto, 2004]. În figura 1.28 se prezintă efectul formei pulsului asupra porozităților din sudură.

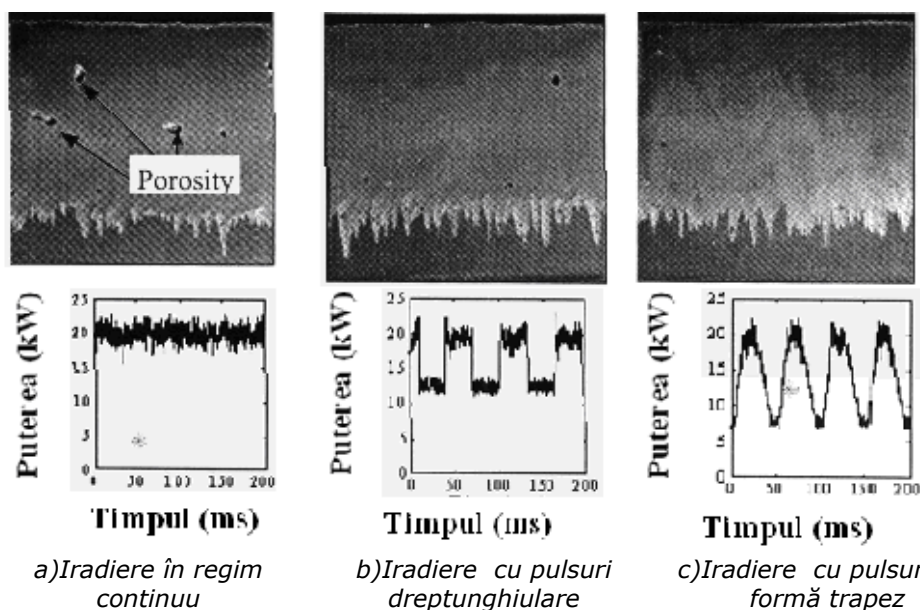


Figura 1.28 Efectul regimului de iradiere asupra sudurii după [Tsukamoto, 2004]

În experiment s-a utilizat un regim de iradiere în undă continuă și două regimuri pulsate, unul cu pulsuri dreptunghiulare iar celalalt cu pulsuri sub formă de trapez. Cele două regimuri pulsate au fost obținute de fapt prin suprapunerea modulării peste emisia în undă continuă. Se observă că pentru regimul continuu de iradiere s-au obținut cele mai multe porozități. S-a stabilit că viteza de scădere a puterii la închiderea pulsului mai mare decât 2,5 MW/s generează scântei și cauzează apariția de porozități mari. Viteza de variație a intensității mai mici, de exemplu 1,2 MW/s asigură lipsa incluziunilor de gaz și prin urmare absența porozităților în sudură. În ceea ce privește influența formei pulsului asupra porozităților cele mai multe și mai mari se obțin în cazul iradierii în undă continuă urmată de cea în regim pulsat cu puls rectangular, iar cea cu puls triunghiular cu pantă lină, prezintă o reducere semnificativă a porozităților. Frecvența de pulsare produce și ea porozități. Frecvențele de pulsare ridicată, ex 100Hz cresc porozitățile din suduri în timp ce la frecvențe mici, ex. 16Hz, prezența lor este redusă. Există și frecvențe mici, inadecvate, ex. 8Hz, care produc porozități. Astfel s-au prezentat câteva metode de reducere a porozităților: prin modularea pulsului laser și prin alegerea unei frecvențe adecvate de pulsare. Prezența porozităților în suduri pentru secțiuni longitudinale prin suduri este prezentată în figurile 1.28 și 1.29. Creșterea numărului porozităților în cazul folosirii regimului de iradiere continuu a fost arătată

și în lucrarea [Honda, 2002]. Figura 1.29 arată creșterea numărului de porozități din sudură pentru utilizarea unui regim de iradiere continuu.

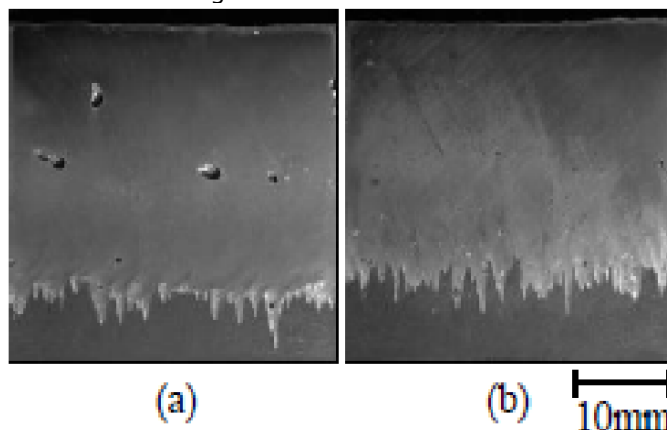


Figura 1.29 Asocierea între porozitățile din sudură și regimul de iradiere, secțiune longitudinală prin sudură a) iradiere în regim continuu b) iradiere în regim pulsant, după [Honda, 2002]

Lucrarea [Tzeng, 2000] analizează influența parametrilor de proces (Intensitate medie relativ la puterea de vârf, puterea medie, viteza de sudare, energia pe puls și durata pulsului). Mărimile măsurate au fost rugozitatea suprafețelor, măsurată cu un rugozimetru Proscan1000. Prin variația vitezei de sudare s-au obținut rugozități acceptabile ale suprafețelor sudurilor. Acestea nu prezintă crăci sau ridicături. Se observă tendința de a exista un minim al rugozității în jurul vitezei de 0,12m/min la puterea medie de 396W. Valoarea minimă a rugozității scade odată cu scăderea puterii. Efectul variației puterii laser se manifestă, în sensul că pe măsură ce crește puterea medie face ca rugozitatea să fie scăzută și variațiile sale în funcție de ceilalți parametri să fie controlabile. Dacă puterea medie scade, atunci se obțin variații bruște. Acestea devin predominante pentru durate mari ale pulsului laser. Se observă că pentru o durată dată pulsului laser, pe măsură ce crește energia pe puls, crește și rugozitatea. Astfel va rezulta că creșterea intensității laser va produce efecte termodinamice puternice contribuind nefavorabil la profilul sudurii. Durata pulsului are un efect de creștere asupra rugozității suprafeței sudurii. S-a realizat o funcție de corelație polinomială de gradul 3 între viteza de sudare și rugozitatea suprafeței.

Un alt studiu în condiții experimentale similare [Tzeng, 1998] a avut ca obiect defectele de sudare. S-a observat o scădere a numărului defectelor de sudare cu creșterea vitezei de sudare. Creșterea intensității prin creșterea energiei pe puls duce la o ușoară creștere a numărului defectelor de sudare. În cazul menținerii intensității fascicolului laser constante nu se produce o creștere semnificativă a numărului defectelor de sudare, dar o durată scurtă a pulsului este corelată cu efecte profunde în sudură, în mod special la viteze de sudare scăzute. S-a observat că odată cu creșterea timpului pulsului cresc dimensiunile băii de sudare. Se exprimă punctul de vedere că o vaporizare puternică nu conduce neapărat la creșterea penetrării sudurii. Astfel la durata de 12ms a pulsului, durata cea mai mare a pulsului, se observă o penetrare slabă, în timp ce penetrarea cea mai mare se observă la o durată a pulsului de 4ms la energii pe puls mari și viteze de sudare mici.

În lucrarea [Haidemenopoulos, 2001] se studiază transformările de fază induse în metal la iradierea cu fascicol laser, atât pentru oțeluri cât și pentru aliaje de aluminiu. Se arată că în cazul proceselor de sudare și durificare laser ciclul termic indus în material este foarte rapid. Încălzirea are loc la viteze de 10^4 C°/s. Aceasta se asociază cu viteze mari de răcire. În cazul proceselor de durificare se induce austenificarea rapidă urmată de transformarea martensitică.

Multe investigații se concentrează pe studiul structurilor obținute pe suprafața iradiată cu fascicol laser. Ele apar sub formă de valuri la suprafața sudurilor. Acestea au fost prezentate în lucrările [Rykalin, 1980] și [Prokhorov, 1980]. Aceste structuri prezintă un grad considerabil de ordine. Structurile obținute pe suprafața iradiată a metalelor, dielectricilor și semiconductoarelor pot fi împărțite în două categorii:

- **Structuri periodice de rezonanță (R.P.S).** Acestea au perioade determinate de lungimea de undă, polarizare și unghiul de incidență a radiației laser incidente.

- **Structuri periodice ne-rezonante (N.R.P.S).** Acestea nu pot fi legate de lungimea de undă sau de alte caracteristici ale radiației laser incidente [Prokhorov, 1980].

Că și cauze de formare a structurilor la suprafața materialelor iradiate se consideră cele legate de caracteristicile radiației și de propagarea vaporilor la suprafața materialului. S-a arătat că la suprafața topiturii se formează unde de material topit. Acestea sunt prinse sub formă de valuri în regiunea unde perioada lor este egală cu timpul de solidificare. Structurile de suprafață se obțin la marginea zonei iradiate și nu apar în zona direct iradiată.

Studiul sudurilor realizate cu laser abordează o problemă largă. Pe de o parte există probleme legate de calitatea sudurii comune tuturor tipurilor de sudare. Pe de altă parte există probleme specifice date de sursa laser. Aspectele fenomenologice ale efectului radiației laser asupra materialului pot fi puse în evidență prin studiul sudurilor.

1.4.3 Modelarea matematică a procesului de sudare laser

1.4.3.1 Modelarea analitică și numerică în sudarea laser

Modelarea leagă (prin formule, grafice, diagrame) parametri de intrare (numiți și intrări , valori reale măsurabile) de parametri de ieșire (ieșiri). Intrările sunt considerate relativ la proces și material iar ieșirile caracterizează rezultatele procesului de prelucrare.

Modelarea analitică are la bază aplicarea legilor fizice care guvernează un fenomen dat. Se pornește de la considerarea unei situații care poate fi interpretată fizic și matematic prin scrierea unor ecuații. Rezultatul modelării este dat de rezolvarea acestor ecuații. Realitatea considerată este de obicei simplificată prin ipotezele de modelare. Calculul matematic include calculul numeric. Modelarea analitică nu poate fi separată de calculul numeric fiind impus de folosirea ecuațiilor diferențiale prin care se formulează legile fizice. Calculul numeric apare în evaluarea unor soluții analitice prin dezvoltări în serie, și la rezolvarea ecuațiilor diferențiale prin metoda diferențelor finite și cea a elementului finit. Modelarea analitică nu impune criterii de selecție asupra intrărilor și ieșirilor comparativ cu modelarea experimentală. Ea este limitată numai de cunoașterea fenomenologică și de aparatul matematic folosit.

În sudare sunt modelate câmpurile de temperatură induse în piesă și câmpurile de tensiune induse în piesă. Problemele legate de zona afectă termic și

rezistența mecanică a suduri sunt legate de acestea. O importanță deosebită o reprezintă izoterma care arată temperatura de topire. Aceasta va da profunzimea zonei topite (penetrarea sudurii) și lățimea sudurii (la suprafață). Există două nivele distincte în abordarea problemelor termice. Primul dintre acestea consideră numai fenomenul de încălzire, descris de ecuația de conducție a căldurii a lui Fourier. Materialul este încălzit de o sursă termică care apare la suprafața materialului sau în material datorită fascicolului laser (sau altui tip de surse termice). Câmpul de temperatură în material (fără a depăși temperatura de topire) se află prin rezolvarea ecuației căldurii. Cele mai utilizate tipuri de surse termice sunt prezentate în figura 1.30, acestea sunt prezentate relativ la forma secțiunii sudurii

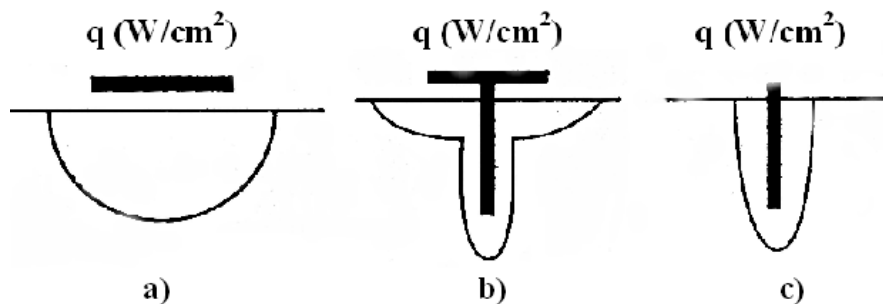


Figura 1.30 Forme tipice pentru sursa termică [CTIM]

Sursa termică de tip a este asociată cu sudurii în regim de conducție, cea de tip b cu regimul keyhole (la viteză mare sau regimul intermediar între conducție și keyhole) iar cea de tip c cu un regim keyhole puternic, datorat intensității ridicate. Principalele probleme abordate la modelarea analitică sunt:

- **Formularea sursei termice în material.** Aceasta se caracterizează prin distribuție în spațiu și timp a densității de flux termic. Menționăm sursa termică la suprafață. Aceasta sursă poate fi punctiformă sau extinsă la pata fascicolului laser. Menționăm de asemenea sursele termice a căror densitate de flux termic este distribuită în interiorul piesei. Pentru procesele de prelucrare unde există mișcare relativă între piesă și material o importanță deosebită o are formularea sursei termice mobile. Aceasta a fost formulată de către Rosental;
- **Scrierea și rezolvarea ecuației căldurii.** Aceasta înseamnă alegerea unei formulări unidimensionale, bidimensionale sau tridimensionale și definirea domeniului geometric, în multe cazuri se consideră un mediu semiinfini;
- **Formularea condițiilor la limită pentru zonele în care au loc transformări de fază**
- **Formularea unei surse termice negative pentru a descrie evoluția procesului de solidificare în material.**

Un punct important în realizarea unei modelări analitice în procesele de prelucrare cu laser îl constituie cunoașterea constantelor termice ale metalelor. În tabelul 1.7 sunt prezentate câteva date în acest sens, care permit abordarea mai multor tipuri de fenomene.

Chang citând diverși autori a prezentat mai multe tipuri de surse termice având o distribuție exponențială radială cât și în profunzimea materialului [Chang, 2002]. Formulele prezentate au fost aplicate folosind calculul numeric și comparate cu limita de separație pentru sudurile realizate experimental. Ideea

principala de aplicare a sursei termice este considerarea pentru densitatea de flux termic a acesteia a unei scăderi exponențiale a acesteia ținând cont de raza fascicolului în pata focală sau la suprafața piesei și de asemenea o scădere exponențială sau liniară în piesă care modelează efectul datorat keyhole.

Pentru sudarea în regim de conducție o modelare analitică a fost efectuată de [Okon, 2002]. Prin rezolvarea ecuației căldurii s-a arătat că profunzimea topiturii z_m este dată în funcție de raza spotului r după o relație pătratică de forma:

$$z_m = -\frac{\pi T_m k}{P} \cdot r^2 + 1.12 \cdot \sqrt{\frac{2a}{v}} \cdot r^{\frac{1}{2}} \quad (1.23)$$

Tabel 1.3 Constante fizice ale metalelor după [Leong, 2002]

Mărimea / Metalul	Al	Fe	Mg	Zn
Temperatura de topire T_m [K]	933	1808	923	693
Temperatura de vaporizare T_v [K]	2333	3003	1380	1203
Presiunea vaporilor la T_m [Pa]	10^{-6}	2.3	360	23
Presiunea vaporilor la 1000 K [Pa]	$1.2 \cdot 10^{-5}$	0	1360	12000
Vâscozitatea la T_m [mPa s]	1.3	6	1.25	3.5
Tensiunea superficială la T_m [N/m]	0.91	1.87	0.56	0.78
Conductivitatea termică pentru solid la T_m [$W m^{-1} K^{-1}$]	210	30	130	9
Absortivitatea la T_m A[%] pentru radiația de 1.06 μm	11	36 (300K)		42 (300K)
Absortivitatea la T_m A[%] pentru radiația de 10.6 μm	3	5 (300K)	3 (300K)	10

Variabila r descrie forma zonei topite relativ la centrul spotului laser. Zona topită are o formă de asemănătoare cu o parabolă. Se observă influența puterii și vitezei de sudare asupra acestei forme. Se prezintă suduri efectuate pe aliaj de aluminiu 5083. Majoritatea sudurilor realizate au fost nepenetrante și au prezentat regimul de conducție.

Se consideră o sursă termică caracterizată prin densitate de flux termic constantă sau prin temperatură constantă acest descrie câmpul termic înafara zonei de interacțiune care formează sursa termică. Pentru sudare înseamnă că această metodă va da corect temperatura în zonele depărtate de punctul de interacțiune. Prin acest tip de model nu se descrie ceea ce se întâmplă în zona de interacțiune între radiația laser și material acolo unde apare keyhole. O alternativă la formularea matematică arbitrară a sursei termice o reprezintă studiul acesteia prin considerarea fenomenelor fizice care au loc în keyhole. Se urmărește ca prin aceasta abordare să se obțină o descriere mai precisă a câmpurilor de temperatură. În studiul intervin probleme suplimentare. Astfel după [Lee 2002] se consideră ca probleme de studiu: considerarea reflexilor Fresnel în keyhole și prezicerea coeficientului de absorbție; formularea ecuațiilor de curgere ale materialului topit (ecuația de continuitate, ecuația de conservare a momentului, ecuația de conservare a volumului); formularea ecuației căldurii separat pentru metalul topit și pentru metalul solid; descrierea echilibrului dintre materialul topit și vapori prin formularea ecuației Clausius-Clapeyron care va da temperatura deasupra interfeței topitură vapori aflată sub presiune. Studiul menționat anterior arată efectul redus al presiunii termocapilare și formulează presiunea de recul funcție de temperatura în faza de vapori sub forma:

$$p_r = 0.54 p_0 \exp\left(L_v \cdot \frac{T - T_{int}}{R \cdot T_{int}}\right) \quad (1.25)$$

unde :

p_0 - presiunea atmosferică [N/m²];

T_{int} -temperatura interfeței [°K];

R- constanta generală a gazelor [J/K].

Presiunea de recul reprezintă jumătate din presiunea vaporilor saturați la interfața vaporii lichid.

Studiile de tipul menționat consideră o formă fixă pentru zona cu vaporii (keyhole), conică, cilindrică sau semisferică. Pentru acestea sunt formulate absorția radiației datorită reflexiilor Fresnel și cele legate de curgerea topiturii, prezența vaporilor și mișcarea acestora. Studiile se încadrează într-o tratare termică prin formularea ecuației căldurii, separat pentru faza solidă și faza lichidă cu scopul de a prezice forma băii de sudare. Legătura între cele două formulări se face prin formularea condiției la limită. [Percharapa, 1997] a formulat condiția la limită sub forma condiției Stefan care consideră temperatura la interfața egalitatea temperaturilor. Alternativa la această formulare este cea considerată de a considera „condiția cinetică” adică egalitatea potențialelor Gibbs la interfață [Kapat, 1998]. Alături de formularea ecuației căldurii se consideră că fascicolul laser se comportă ca o sursă termică descrisă de densitatea de flux termic la suprafața materialului asimilabilă cu intensitatea fascicolului laser. Mecanismul de absorbție al radiației laser în material beneficiază de o tratare secundară.

Trecerea de la formularea problemelor conform modelării termice clasice către combinarea acestei abordări cu cea prezentată în paragraful anterior în care partea principală este dată de curgerea topiturii este prezentată de [Mackwood, 2004]. Combinarea tratării termice în procesele de sudare cu aspecte particulare ale prezenței și formei keyhole și formulării unei balanțe energetice este obiectul unor studii în care se utilizează calculul numeric mai precis modelarea cu elemente finite. Dintre studiile de acest tip prezentăm următoarele studii. Punctul comun al acestor analize îl reprezintă predicția asupra câmpurilor de temperatură și tensiune din piesă.

În lucrarea [Lampa, 1997] se consideră cazul sudării cu penetrare completă în care apare o valoare a lățimii sudurii la partea superioară a piesei și o valoare lățimii sudurii la partea inferioară a piesei. Modelul nu ia în considerare transformarea de fază. El consideră existența unei surse liniare de căldură perpendiculară pe suprafața piesei, aflată la mijlocul sudurii. Sursa de căldură are densitate de flux termic diferită între partea superioară și partea inferioară a piesei. Se consideră conductivitatea termică la partea inferioară ca cea reală k_1 , iar la partea superioară se consideră o conductivitate termică modificată $k_2 = 2,5k_1$. Aceasta permite calcularea razei keyhole. Keyhole este considerată de formă fixă și anume formă conică. De asemenea se precizează și penetrarea keyhole în material. Densitatea de flux a sursei termice este considerată în funcție de forma Gaussiană a fascicolului laser. Se modelează forma keyhole și forma keyhole considerând curgerea topiturii datorită efectului termocapilar Maragonii reflexiilor multiple în keyhole (absorbția prin reflexie Fresnel și absorbția în plasmă). Aceste efecte sunt separat considerate iar apoi integrate într-un calcul numeric. Sunt considerate două reflexii Fresnel ca fiind semnificative. Se consideră o pierdere de intensitate conform unei atenuări exponențiale a fascicolului laser în plasmă.

[Van Elsen, 2007] a analizat analitic și numeric caracteristicile sursei termice în material. S-a o considerat o sursă termică sub formă de punct la

suprafața piesei aflată în mișcare. Prin modelarea pe baza ecuației căldurii poate fi exprimat profilul de temperatură. S-a arătat că o conductivitate termică ridicată poate fi asociată cu o căldură latentă coborâtă. Aceasta face aplicabilă ecuația căldurii. Importanța unei astfel de simulări constă în faptul că forma izotermelor arată forma băii de sudare. Aceasta se regăsește în forma craterului care se obține la sfârșitul procesului de sudare, dacă regimul de iradiere este moderat, se va obține la forma circulară sau ovoidă a craterului. În cazul sudării în regim de conducție se regăsește aceeași formă în secțiunea prin sudură. Izoterma temperaturii de topire și cea a zonei afectate termic (cu temperatura aflată sub temperatura de topire) urmează acest tip de model analitic. Sursa termică punctuală este considerată de coordonate $(0,0)$. Sursa punctuală poate fi cu ușurință extinsă la una circulară sau eliptică. În acest caz se obține numai o depărtare a izotermelor. Comparații între formele izotermelor și forme observate pe suprafața respectiv secțiunea sudurilor sunt prezentate în figurile 1.31 respectiv 1.32.

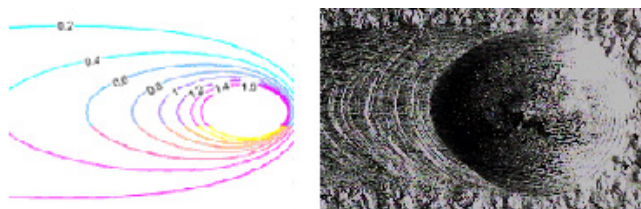


Figura 1.31 Comparație între forma izotermelor date de sursa punctuală și forma craterului obținut la sfârșitul procesului de sudare, asimilată cu forma băii de sudare



Figura 1.32 Comparație între forma izotermelor date de sursa punctuală și secțiunea printr-o sudură în regim de conducție

[Yeh, 1996] a modelat numeric forma băii de sudare pentru sudarea cu arc a tablelor subțiri, cu penetrare completă. Forma băii de sudare modelată a fost una ovală („egg shape”, formă de ou) sau alungită („tear drop shape”, formă de lacrimă). Importanța acestui studiu constă în faptul că aceste forme ale băii de sudare sunt observate și în sudarea laser. Metoda de studiu a constatat în scrierea separată a ecuației căldurii pentru faza lichidă și respectiv solidă. S-au considerat condițiile la limită între cele două faze și sursa termică mobilă. S-a arătat că alungirea băii de sudare crește cu puterea arcului electric și cu căldura latentă a materialului. S-a studiat efectul particular al variației căldurii latente, efectul preîncălzirii și cel al pierderii de căldură la suprafață. În sudarea laser la sfârșitul procesului de sudare se obține un crater care are o formă asemănătoare cu cea modelată pentru baia de sudare în această lucrare.

[Sabbaghzadeh, 2008] a efectuat o modelare cu element finit pentru sudarea în regim pulsant a unui oțel. S-au obținut profilele de temperatură iar acestea au fost comparate cu cele ale îmbinării sudate realizate. Simulările au fost realizate pentru oțel. S-a considerat absorbția radiației în plasmă iar mecanismul de

absorbție luat în considerare reflexiile Fresnel la suprafața keyhole. Ca problemă termică s-a formulat ecuația căldurii cu densitate de flux termic constant aplicată la suprafața piesei. Au fost simulate profilul de temperatură în material și forma keyhole folosind programul ANSYS. O comparație între sudurile realizate și simulările numerice este prezentată în figura 1.33.

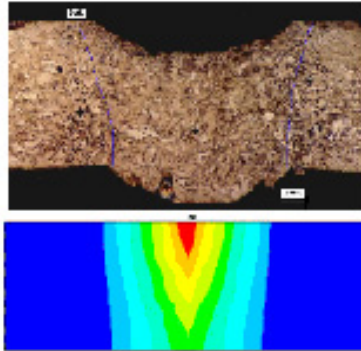


Figura 1.33 Comparație între sudura realizată și simularea numerică pentru câmpul de temperatură după [Sabbaghzadeh, 2008]

[Tsirkas, 2003] a prezentat o modelare cu element finit pentru sudarea a plăci groase din oțel AH 36 folosit în construcția de nave. S-a considerat o keyhole de formă conică. S-a obținut distribuția de temperatură în piesă și deformarea piesei. Modelările realizate au fost comparate cu sudurile realizate experimental.

[Moraitis, 2008] propune un model pentru sudarea prin suprapunere pentru table din Al, folosind un fascicul laser cu puterea de 4kW. Se efectuează o modelare cu element finit, folosind programul ANSYS. Se consideră keyhole având o formă conică. Se modelează forma keyhole, distribuția de temperatură și cea de tensiune din piesă.

Lucrarea [Bruggeman, 2000] prezintă rezultate asupra studiului proceselor de sudare laser a aliajului de aluminiu AlMgSi0.7 de 4mm grosime și a oțelului mediu aliat RSt37-2 de 6mm grosime, sudare cu material de adaos (fir) și folosind un fascicul laser CO₂ cu puterea de 5kW. Analiza s-a efectuat prin termografie în timpul procesului cu ajutorul unui pirometru și aplicarea de senzori termici. Sistemul a fost monitorizat prin folosirea unei camere rapide CCD. S-a efectuat o simulare numerică a câmpului de temperatură. Autorii au folosit o tratare matematică bidimensională în coordonate circulare, considerând o simetrie cilindrică pentru keyhole

Lucrarea [Carmignani, 1999] prezintă o analiză cu element finit asupra câmpurilor de temperatură și tensiune din piesă în cazul sudării laser în regim keyhole. Este prezentată legătura dintre problemele termodinamice, datorate în principal câmpului de temperatură, cele metalurgice datorate transformărilor de fază la nivel de microstructură și cele mecanice manifestate prin câmpul de tensiuni din piesă. Modelul este aplicabil pentru o putere a sursei laser de 15 kW. Modelul consideră pierderile de căldură prin radiație și convecție. La realizarea calculelor s-a folosit programul ABAQUS.

Lucrarea [Du, 2004] prezintă o modelare analitică și numerică în cazul curgerii metalului topit în baia de sudare. Modelul este aplicat pentru sudarea aliajelor de titan. Modelul consideră o sursă plană la suprafață și o sursă cilindrică în interiorul piesei. Prin aceasta se modelează prezența keyhole în baia de sudare.

Dintre rezultatele obținute se remarcă profilul băii de sudare obținut în cazul considerării curgerii termo-capilare Maragoni respectiv fără această curgere. Se remarcă că cazul fără curgerea termocapilară Maragoni este mai apropiat de forma craterului care se obține la terminarea procesului de sudare, figura 1.34.

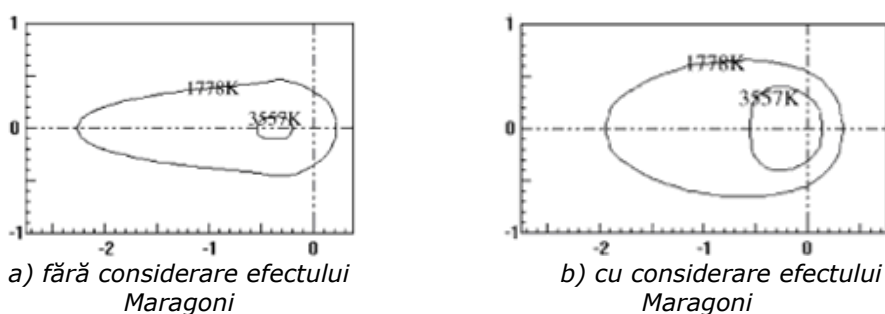


Figura 1.34 Simulări ale vederii de deasupra a băii de sudare după [Du, 2004]

Verificarea modelării cu element finit se face prin analiza structurală a sudurilor (zona topită, zona afectată termic, durificarea sudurii), aplicarea de senzori de temperatură sau termografie în infraroșu. Modelele realizate dau predicții în general în apropiate de rezultatele experimentale. Acest lucru se datorează în mare parte alegerii adecvate și particulare a coeficienților și a geometriei piesei, și a fenomenelor considerate. Astfel creșterea puternică a intensității fascicolului laser poate conduce la necesitatea modificării ipotezelor modelului. Astfel modelarea cu metoda elementului finit are o valoare practică și mai puțin una teoretică.

Prezența keyhole implică trecerea către o problemă complementară. Aceasta se referă la mișcarea metalului topit în condițiile unei vaporizări puternice și a mișcării vaporilor. Acest tip de studiu modelează formarea și evoluția keyhole și se depărtează de studiul procesului de sudare. Se abordează keyhole ca obiect de studiu în sine și nu rolul acesteia în procesele de sudare.

În lucrarea [Fabbro, 1999] sunt prezentate simulări privind forma și profunzimea keyhole la diverse momente de la începerea iradierii. S-a folosit un fascicul laser cu puterea de 5kW și viteza de sudare de 2cm/s. Simulările realizate sunt în acord cu fotografierea procesului în raze X. Se arată o formă neregulată a keyhole și creșterea acesteia odată cu timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Se observă că, creșterea keyhole se oprește la un moment dat. Mărirea timpului de interacțiune dintre radiația laser și material conduce la deformarea keyhole și producerea acelei forme de cizmă observată și experimental.

Acest model introduce „viteza de găurire”, ca fiind viteza de avansare a interfeței lichid-vapori în material. Aceasta mișcă peretele din față al keyhole iar a în combinație cu viteza de sudare definesc înclinarea peretelui din față al keyhole. Efectul fascicolului laser este considerat sub forma unei intensități I_{abs} , și a unui coeficient de absorbție dependent de unghiul de incidență și de ordinul de reflexie. Se consideră mai multe reflexii Fresnel. Se calculează astfel viteza de găurire pentru pornind de la un profil dat al suprafeței metalului topit și intensitatea fascicolului laser. Aplicând iterativ procedeul de calcul s-au obținut evoluții în timp și profile bidimensionale ale keyhole. Figura 1.35 arată simulări ale evoluției keyhole.

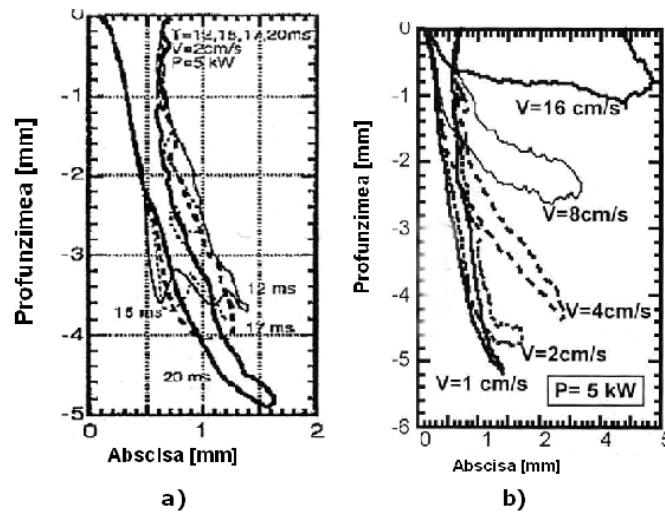


Figura 1.35 Simulări bidimensionale pentru variația formei keyhole a) evoluție în timp datorită iradierii b) dependența formei de viteza de sudare după [Fabbro, 1999]

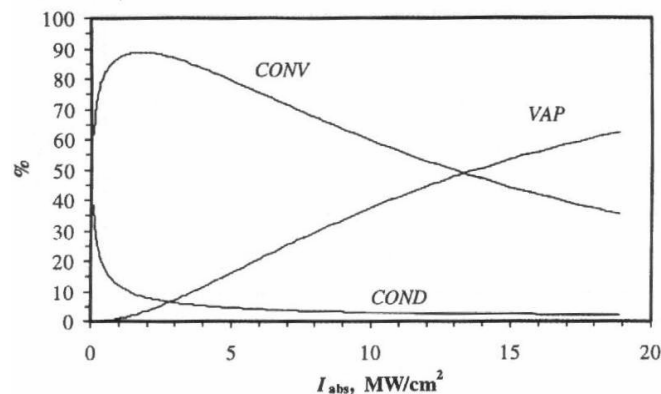


Figura 1.36 Partea din intensitatea fascicolului laser care întreține , conducția, convecția și vaporizarea materialului. Rapoartele COND, CONV și VAP pentru fier, raza fascicolului laser 0,19 mm, după [Semak, 1997]

Pe baza aceluiași idei de bază s-au efectuat modelări asupra dinamicii vaporilor în keyhole [Amara, 2002] [Fabbro, 2004]. Acestea au arătat creșterea presiunii în keyhole și diverse mișcări ale vaporilor. [Fabbro, 2002] Este cunoscut că se produc multiple reflexii în interiorul keyhole [Fabbro, 1999]. Viteza de deplasare a interfeței lichid-vapori în material este denumită viteza de găurire. Forma finală a cavității apare ca urmare a unui proces de găurire combinat cu deplasarea piesei. Forma keyhole rezultă din combinația dintre deplasarea peretelui din față al keyhole în formarea acesteia cu deplasarea interfeței lichid-vapori, datorită vitezei de sudare, figura 1.35.

Aceasta arată că la intensități mici se realizează mișcarea topiturii adică convecția și disiparea căldurii prin conducție în material. Vaporizarea este neglijabilă în această situație. Pe măsura creșterii intensității fascicolului laser crește efectul vaporizării. La creșterea cu un ordin de mărime acest efect ajunge să fie dominant.

Pe perețele din față al keyhole se înregistrează o mișcare a topiturii care produce valuri (ridicături, fenomen numit și „humping”) [Semak, 1999]. Aceste deformații apar datorită presiunii de recul și mișcării topiturii. Se estimează că mărimea ridicăturii este între 20-50 μm , raportat la planul interfeței dintre vaporii și lichid. Acestea au o mișcare de sus în jos. La partea inferioară a keyhole acestea devin mai late și mai puțin pronunțate. Se precizează că în zona ridicăturii temperatura este mai ridicată și în consecință și presiunea de recul este mai ridicată. Importanța acestor deformații se datorează faptului că ele apar pe suprafața supusă iradierii modificând local condițiile de absorbție. Astfel în modelare apare un interes deosebit pentru variația formei și poziției peretelui din față al keyhole. Schema peretelui din față al keyhole este prezentată în figura 1.37.

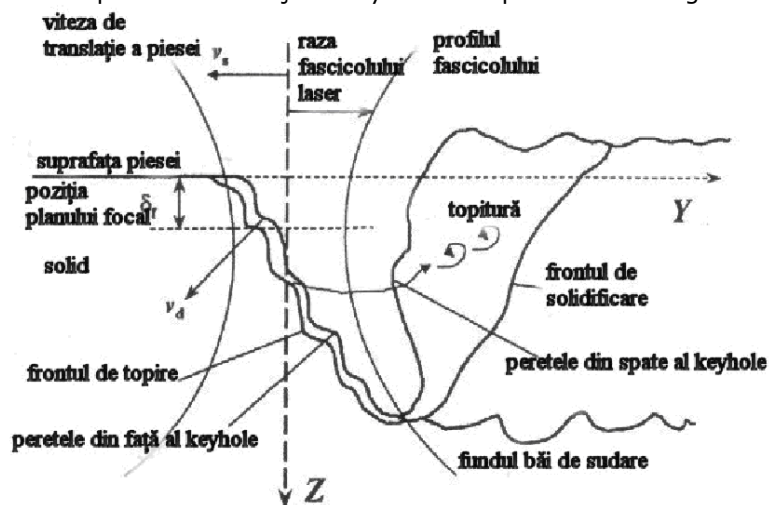


Figura 1.37 Schema băii de sudare pentru cu mișcarea topiturii la perețele din față al keyhole după [Semak, 1999]

Fascicolul laser este fix iar piesa avansează în direcția axei OY, mișcarea fiind reprezentată prin viteza de sudare v_s . Fascicolul laser este focalizat în interiorul piesei cu defocalizarea δ_f negativă. Raza fascicolului laser este considerată la suprafața piesei. Mișcarea frontului de topire în material este dată de viteza de găurire v_d , a cărei direcție diferă de direcția vitezei de sudare. Este prezentată o keyhole largă, cu mișcarea topiturii la perețele din față al keyhole, mișcarea de „humping”. Se prezintă mișcarea topiturii în jurul keyhole și în baia de sudare. De asemenea se prezintă frontul de solidificare.

O altă problemă abordată în modelare este predicția asupra temperaturii suprafeței băii de sudare. Aceasta este prezentată în figura 1.38. Modelarea realizată [Semak, 1999b] a avut în vedere atât cazul în care se consideră cuplajul radiației numai în transformările de fază fără a considera mișcarea topiturii, cât și cazul în care această mișcare este considerată. Suprafața topiturii se află sub presiune și din această cauză ea este supraîncălzită având o temperatură mai mare decât cea de vaporizare.

Modelarea analitică realizată de Semak, Matsunawa Fabbro și alții prezintă un fond principal de elemente prin care se caracterizează keyhole. Astfel efectul produs de fascicolul laser este prezentată prin intensitatea absorbită, eliminându-se din discuție radiația reflectată atât specular cât și difuz. Reflexiile Fresnel în keyhole

sunt principalul mecanism de absorbție a radiației în material. Absorbția depinde de unghiul local de incidență și de prezența plasmei. Keyhole este descrisă în principal prin interfața lichid-vaporii. Deplasarea acesteia în condițiile unei vaporizări intense și a mișcării topiturii descrie comportarea peretelui din față al keyhole.

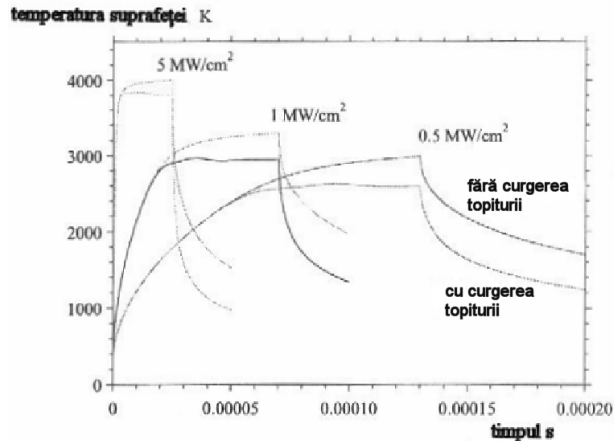


Figura 1.38 Temperatură calculată a suprafeței pentru fier, în centrul fascicolului laser, pentru valori ale timpului pulsului și intensității $130\mu\text{s}$ ($0,5\text{ MW cm}^{-2}$), $70\mu\text{s}$ (1 MW cm^{-2}) și $25\mu\text{s}$ (5 MW cm^{-2}), după [Semak, 1999 b]

Studiile anterioare prezintă bazele tratării fizice a fenomenelor care au loc în prezența vaporizării rapide simultan cu mișcarea interfeței solid-vaporii. Necesitatea acestei abordări vine în contextul în care metoda considerării unei surse termice cu o anumită distribuție a densității de flux termic devine dificilă chiar cu considerarea unei keyhole de o formă standard. Sursa termică va prezenta bine câmpul de temperatură în regiunea îndepărtată de sursa termică considerată în centrul băii de sudare. În cazul sudării laser fenomenele care au loc în sursa termică, adică care țin de keyhole au rolul dominant în evoluția celorlalte fenomene termice. Din acest punct de vedere se justifică studiul keyhole. Pentru keyhole profunde adâncimea keyhole se apropie de cea a băii de sudare și astfel se pot obține informații despre baia de sudare utile în studiul procesului de sudare.

1.4.3.2 Modelarea experimentală în sudarea laser

Modelarea experimentală pornește de la considerarea unor factori de influență numiți intrări și dorește să prezică în funcție de aceștia valorile pentru funcțiile obiectiv numite și ieșiri. Legătura se face prin relații matematice numite funcții de corelație sau model matematic (model empiric). Valorile unui factor de influență sunt numite și nivelele acestuia. Planul experimental conține valorile pentru fiecare factor de influență. Domeniul experimental (raportat la fiecare factor de influență în parte) reprezintă diferența dintre valoarea minimă și valoarea maximă. Modelarea experimentală are ca scop ca pe baza unui număr finit de experimentări (de obicei cât mai mic) să determine relații matematice care leagă factorii de influență de funcțiile obiectiv. Planul experimental trebuie pe de o parte să conțină un număr suficient de experimentări care să permită determinarea coeficienților care apar în expresia funcțiilor de corelație iar pe de altă parte să

permiță interpretarea statistică a variațiilor. Interpretarea statistică asigură încrederea în funcțiile de corelație obținute pe domeniul experimental. Funcțiile de corelație alături de coeficienții statistici formează modelul matematic. În cele ce urmează sunt prezentate câteva studii în care se abordează modelarea experimentală în sudarea laser a metalelor și în special a oțelurilor.

În lucrarea [Pan, 2004] este prezentată o modelare experimentală a sudării laser a aliajelor de magneziu. S-a efectuat o modelare experimentală cu scopul de optimizare a procesului de sudare. S-a folosit un laser cu Nd:YAG și sudarea laser cap la cap pentru table subțiri. Se remarcă factorii de influență considerați în studiu. Aceștia sunt: gazul ajutător, puterea laserului, viteza de sudare, poziția punctului focal (defocalizarea) în raport cu suprafața piesei, frecvența pulsurilor și forma pulsului. Pentru fiecare factor de influență s-a considerat două sau trei nivele. Au fost considerate 18 grupe experimentale conform metodei Taguchi. S-a folosit metoda de analiză a variațiilor ANOVA. Ca funcție obiectivă a fost studiată rezistența la rupere a îmbinării sudate. În urma analizei s-a prescris o rețetă de valori optime ale parametrilor pentru realizarea sudării.

În lucrarea [Olabi, 2006] este realizat un studiu privind modelarea experimentală a sudării folosind un sistem tehnologic laser cu CO₂ a oțelurilor cu conținut mediu de carbon, sudare cap la cap. Ca factori de influență (intrări) se consideră: puterea laserului, viteza de sudare, și poziția punctului focal relativ la suprafața piesei (defocalizarea). S-a măsurat lățimea sudurii la suprafață, lățimea zonei afectate termic și profunzimea sudurii. Ca funcții obiective (ieșiri) sunt analizate raportul dintre profunzimea sudurii și lățimea acesteia și raportul dintre profunzimea sudurii și lățimea zonei afectate termic. S-a folosit un plan experimental după metode Taguchi. S-a reprezentat grafic pentru fiecare din cele două funcții obiective studiate abaterea de la medie și abaterile raportului „semnal/zgomot”. Se marchează valorile maxime pe domeniul experimental. Îmbunătățirea calității sudurii presupune maximizarea acestor valori. Planul experimental nu permite considerarea interacțiunilor dintre factori.

În lucrarea [Pan, 2007] se studiază experimental sudarea aliajelor de titan folosind un sistem tehnologic laser cu Nd:YAG. S-au efectuat sudare cap la cap. Ca factori de influență au fost considerați: gazul protector, puterea fascicolului laser, viteza de sudare, defocalizarea, frecvența pulsurilor și forma pulsului. S-a urmărit optimizarea procesului în sensul creșterii rezistenței la rupere, scăderii zonei afectate termic, creșterea raportului dintre profunzimea și lățimea sudurii, scăderea rugozității suprafeței. Acestea au fost considerate funcții obiective. Metoda de analiză a lui Grey transformă valorile funcțiilor obiective măsurate într-un sistem arbitrar adimensional relative la valoarea maximă respectiv minimă, folosind diferența între valoarea maximă și cea minimă. Se folosește metoda ANOVA pentru analiza statistică a rezultatelor obținute. Planul experimental a permis realizarea unor modele matematice polinomiale pătratice. Ca rezultat al studiului se realizează o rețetă în ceea ce privește alegerea valorilor factorilor de influență pentru a optimiza funcțiile obiective.

În lucrarea [Benyounis, 2005] se studiază optimizarea procesului de sudare pentru un oțel cu conținut mediu de carbon (0.46% C, 0.2% Si, 0.7% Mn). S-a efectuat sudarea unor table cap la cap. S-a folosit un sistem tehnologic laser cu CO₂ cu putere maximă 1.5 kW și ca și gaz protector argonul cu o viteză de curgere de 5m/min. Sudurile realizate sunt în regim keyhole. Ca factori de influență se consideră puterea fascicolului laser, viteza de sudare, și poziția punctului focal, defocalizarea. Ca funcții obiective se consideră căldura necesară pentru realizarea procesului de sudare, lățimea sudurii, lățimea zonei afectate termic și profunzimea

sudurii. Pentru cele trei funcții obiectiv sunt prezentate funcții de corelație pătratică. Se prezintă secțiuni în suprafețele de răspuns (curbe de suprafață). Se stabilesc condițiile optime de realizare a procesului de sudare.

În lucrarea [Anwara, 2008] se prezintă un studiu asupra sudării a două materiale diferite: oțel inox AISI 316 și oțel cu conținut scăzut de carbon AISI 1009. S-au efectuat suduri complet penetrate. Iradierea s-a efectuat cu un sistem tehnologic laser cu CO₂ în regim continuu. Ca factori de influență s-au considerat: puterea laserului, viteza de sudare și defocalizarea. Ca funcții obiectiv s-au considerat lățimea sudurii la partea superioară a piesei, lățimea sudurii la partea inferioară a piesei și aria secțiunii transversale prin sudură. Funcțiile de corelație între factorii de influență și funcțiile obiectiv au fost de tip pătratic. S-a analizat statistic variația acestora prin metoda de analiză a variațiilor ANOVA. Studiul a condus la concluzia că puterea fascicolului laser și viteza de sudare sunt factori de influență semnificativi asupra băii de sudare în timp ce defocalizarea este un factor de influență nesemnificativ.

În lucrarea [Benyounis, 2008] se studiază sudarea laser pentru oțelul inox AISI304. Iradierea s-a efectuat folosind un sistem tehnologic laser cu CO₂ cu putere maximă de 1.5 kW și în atmosferă protectoare de argon. Ca factori de influență s-au considerat puterea fascicolului laser, viteza de sudare și defocalizarea (distanța de la suprafață la planul focal). Funcțiile obiectiv studiate au fost rezistența mecanică, rezistența la impact și costul procesului de sudare. Funcțiile de corelație determinate au fost de tip pătratic. S-a folosit metoda ANOVA pentru analiza statistică a variațiilor și metoda suprafețelor de răspuns pentru reprezentarea rezultatelor. Studiul a descris anumite condiții optime de realizare a procesului de sudare.

Lucrarea [Binda, 2004] prezintă modelare analitică și experimentală pentru sudarea laser pentru oțel inox 304 folosind un sistem tehnologic laser cu CO₂ cu emisie în regim continuu. Modelarea pornește de la soluția lui Rosental. Sursa termică liniară în profunzimea piesei este înlocuită cu o funcție necunoscută care urmează a fi determinată din datele experimentale. Din datele experimentale se determină coeficienții acestei funcții. Se prezintă un studiu experimental care a considerat ca factori de influență puterea, viteza de sudare și defocalizarea. Rezultatele obținute au fost analizate statistic folosind metoda ANOVA. Ca efecte au fost considerate primii patru coeficienți care intervin în modelul analitic. (coeficienții semnificativi dintr-o dezvoltare în serie Fourier). Efectul produs de defocalizare este semnificativ pornind de la al doilea coeficient.

Studiile anterior prezentate arată tipul problematicii cu care se ocupă modelarea experimentală. Astfel se remarcă alegerea ca factori de influență a puterii fascicolului laser vitezei de sudare și defocalizării iar ca funcții obiectiv considerarea profunzimii și lățimii sudurii. Modelarea matematică are ca rezultat formule de corelație, acestea sunt în general modele pătratice. Analiza statistică a variațiilor prin metoda ANOVA are scopul de a ierarhiza factorii de influență între ei și în raport cu interacțiunile lor. Modelarea experimentală se aplică și altor procese de prelucrare laser. Astfel pentru realizarea de șanțuri folosind fascicol laser au fost prezentate în lucrarea [Lallemand, 2000]. Texturarea prin realizarea de șanțuri pe aliaje de titan este prezentată în lucrările [Cicală, 2008] și [Soveja, 2008]. S-au prezentat modele polinomiale de gradul doi și s-a utilizat metoda suprafețelor de răspuns pentru modelarea variațiilor, funcțiilor obiectiv.

Modelarea experimentală prin serii clasice (unde se variază un singur factor influență este o parte importantă în modelarea experimentală. Deși funcțiile de corelație obținute prin modelare experimentală sunt foarte particulare acestea prezintă principalele tipuri de variații pentru funcțiile obiectiv studiate. Rezultatele

se prezintă sub formă de grafice. Reprezentarea variației funcțiilor obiectiv (mărimilor măsurate sau calculate) în funcție de mărimile măsurate folosind funcții de regresie însoțite de un coeficient de corelație dau un tip general al variațiilor care poate fi aplicat și altor situații. Reprezentarea variațiilor prin interpolare cu funcții spline va prezenta tendința de formare a maximelor și minimelor, lucru care va fi util în efectuarea de optimizări asupra valorilor funcțiilor obiectiv. Prezentarea variațiilor prin puncte (interpolare cu funcții liniare) arată tendința de variație, însă nu aduce un plus de cunoștințe comparativ cu cea dată de tabelele de date. Interesul în această lucrare se îndreaptă către variațiile asupra funcțiilor obiectiv datorate puterii fascicolului laser și cele datorate vitezei de sudare.

Studiul sudării laser a aliajelor de aluminiu a fost abordat în lucrarea [Dausinger 2002]. S-a stabilit următoarea relație care va da puterea minimă pentru care se poate realiza procesul de sudare.

$$\frac{P_{\min}}{D_f} = \sqrt{\pi} \cdot \frac{T_v \cdot k}{A} \cdot \sqrt{1.1 + \frac{v \cdot D_f}{4a}} \approx \sqrt{\pi} \cdot \frac{T_v \cdot k}{A} \quad (1.24)$$

Vitezele de sudare utilizate în cazul Al raportate la difuzivitatea termică conduc la valori apropiate de 1 pentru ultimul termen. În acest caz puterea minimă pentru a realiza sudarea depinde numai de temperatura de vaporizare, conductivitatea termică și coeficientul de absorbție. Acestea sunt numite sugestiv și tripletul termic.

Se studiază variația penetrației sudurii funcție putere, funcție de raportul dintre putere și diametrul petei focale, funcție de raportul dintre putere și pătratul diametrului petei focale, pentru aliaje de aluminiu și pentru oțel. Rezultatele au fost obținute folosind laser cu mediu solid și laser cu CO₂. Se observă o tendință de creștere liniară a profunzimii sudurii cu puterea. Această creștere se termină datorită creșterii contribuției vaporizării. Panta maximă a creșterii se obține pentru diametrul maxim al petei focale. Folosirea rapoartelor dintre putere și diametrul petei focale, respectiv pătratul acesteia duce la o concentrare a rezultatelor, prezentând același tip de creștere liniară întreruptă. Ca metodă folosită se remarcă concentrarea datelor pentru experimentările efectuate în condiții diferite. Modelarea experimentală prin serii clasice a fost utilizată în lucrarea [Grevey, 2005] în scopul optimizării parametrilor care controlează protecția gazoasă.

Principalele variații care fac obiectul modelării unei proces de sudare laser sunt cele legate variația puterii, vitezei de sudare, defocalizării și intensității fascicolului laser. Ca funcție obiectiv o importanță deosebită o are profunzimea sudurii. Unele din aceste variații vor fi prezentate în figurile următoare 1.39 și 1.40. Din figura 1.39 se observă că profunzimea sudurii crește liniar cu puterea și scade exponențial cu viteza de sudare. Scăderea diametrului petei fascicolului laser conduce la creșterea profunzimii. Aceasta se datorează creșterii intensității laserului la suprafața piesei.

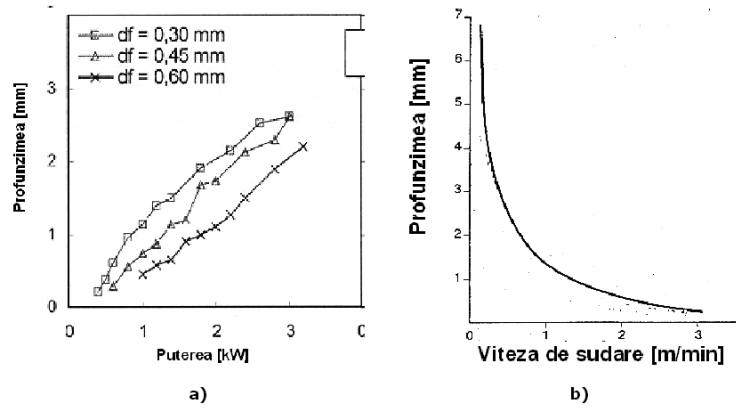


Figura 1.39 Variația profunzimii sudurii pentru oțel a) funcție de puterea fascicolului laserului, b) funcție de viteza de sudare (df - diametrul petei focale) după [Dausinger, 2000] și [CTIM]

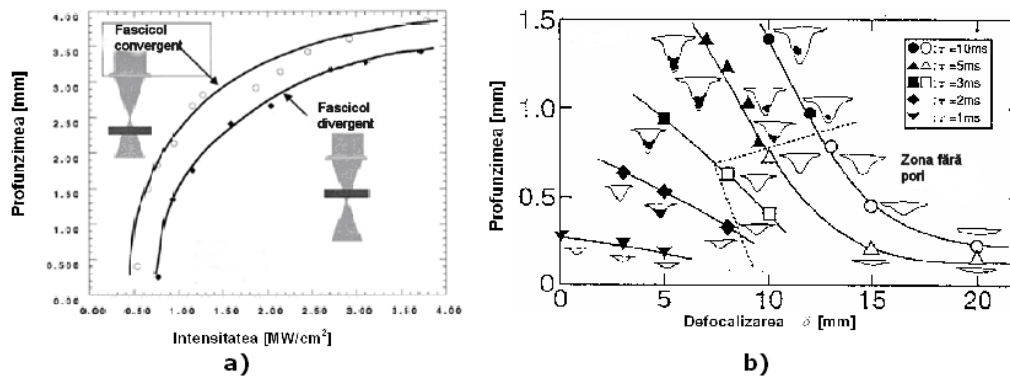


Figura 1.40 Variația profunzimii sudurii a) în funcție de intensitatea laserului după [Semak, 2000] b) în funcție de defocalizare după [Kaplan, 2002]

Figura 1.40a arată variația profunzimii sudurii cu intensitatea fascicolului laser pentru două situații ale ale reglării defocalizării, una cu planul focal deasupra piesei (defocalizare pozitivă) respectiv a doua cu planul de focalizare în interiorul piesei (defocalizare negativă). Se observă o creștere exponențială a profunzimii sudurii cu intensitatea fascicolului laser. Important în această variație este existența unui palier constant către care tinde profunzimea sudurii. Variația profunzimii cu coborârea punctului focal în interiorul piesei este prezentată în figura 1.40 b. Se prezintă și efectul asupra porozităților din sudură. Se observă o scădere a profunzimii sudurii cu defocalizarea. Aceasta este însoțită de scăderea numărului porozităților din sudură.

Aceste tipuri de variație generală au fost observate și de alți autori, au fost confirmate și de rezultatele experimentale din lucrare. Reprezentările prezentate sunt însoțite de funcții de regresie care prezintă astfel explicit modelul matematic.

1.5 Obiective ale cercetării doctorale

Investigarea în proces a sudării laser aduce foarte multe informații atât legate de procesul de sudare cât și de prezența și evoluția keyhole. Partea dificilă este interpretarea și sistematizarea acestor informații. La aceasta se adaugă și separarea aspectelor reproductibile asupra procesului de sudare de aspectele care au un caracter aleator. Studiile efectuate în lucrare nu au avut în vedere astfel de investigații. S-a analizat studiul sudurii astfel încât unele aspecte care pot fi observate numai în timpul procesului (formarea keyhole, mișcarea topiturii, formarea băii de sudare) să poată să fie modelate. Prin această metodă se face o selecție asupra aspectelor care merită a fi studiate și selecția și medierea rezultatelor în vederea comparării acestora cu caracteristicile sudurilor.

Investigarea sudurilor aduce cele mai multe informații despre procesul de sudare. Se pune problema ca cercetările efectuate să descrie procesul de sudare. Pentru a realiza această descriere se recomandă selectarea pentru studiu a părții procesului în care acesta este stabilizat. Aceasta depinde în principal de grosimea materialului. De asemenea se recomandă folosirea unui ordin de mărime pentru valorile măsurate astfel încât să se pună în evidență diferențele datorate parametrilor însă nu și instabilitățile generate de tipul termic al procesului. O problemă separată este considerarea parametrilor variați. Cercetarea experimentală a unui proces tehnologic (sudarea laser) are ca elemente de bază alegerea parametrilor variați (factorii de influență), a reglajelor (parametrii menținuți constanți) alegerea domeniului de variație pentru parametrii variați și a tipului și caracteristicilor materialului pe care se efectuează încercările. Intervenția asupra oricărui din aceste aspecte va induce un caracter de noutate în studiul procesului tehnologic.

Cercetarea sudurilor din punctul de vedere al controlului procesului de sudare impune cercetarea aspectelor geometrice ale sudurii. Aspectele de material completează această cercetare. Acestea se referă la caracteristicile zonei topite (aspecte de cristalizare porozități, duriități) și a celei afectate termic. Studiul acestora ia în considerare numai aspectele care au o anumită reproductibilitate și stabilitate. Transformările de material vor determina caracteristicile mecanice ale sudurii. La această problematică se adaugă cea legată de forma și calitatea suprafeței sudurii, acestea aduc informații despre curgerea topiturii și fenomenele fizice care au loc în baia de sudare.

Aspectele anterior menționate de cercetare a sudurilor vor fi abordate în lucrare pe suduri realizate pe oțel în urma unui program experimental care a permis efectuarea de modelări experimentale.

Modelarea analitică a procesului de sudare se confruntă cu un mare număr de fenomene fizice pe care trebuie să le ia considerare. Acestea se desfășoară în condiții particulare dificil de formulat. Identificarea unor legături de tip cauză efecte contribuie la înțelegerea fenomenelor fizice care caracterizează sudarea laser. În acest context se impune realizarea unei selecții a fenomenelor, chiar cu riscul pierderii unei părți importante din realitate. Propunem astfel concentrarea pe studiul fenomenului de vaporizare însoțit de propagarea frontului de vaporizare în material. Pe de altă parte se impune îmbunătățirea legăturii între modelarea termică a procesului de sudare și modelarea keyhole și a curgerii topiturii în baia de sudare. Legătura pe care o propunem este predicția profunzimii sudurii pe baza penetrării frontului de vaporizare în material.

Modelarea experimentală este legată de ansamblul cercetării experimentale. În domeniul prelucrărilor cu fascicul laser perfecționarea și evoluția laserilor

industriali face ca problemele legate de punerea la punct a noi procese de prelucrare să rămână una de actualitate. Problema implementării unei noi aplicații industriale apare în contextul apariției pe piață a unor noi surse laser cu domenii care diferă de cele deja existente prin domeniul de puterii, prin reglajele suplimentare care stabilesc regimul de iradiere, prin modalitățile de transmitere a radiației asupra piesei și prin modificarea unor aspecte conexe de prelucrare (natura și modalitatea de folosire a gazelor de lucru). De asemenea apariția noi materiale, de naturi și grosimi respectiv forme diferite determină încercarea prelucrării acestora cu sursele laser existente. Astfel punerea la punct a proceselor de prelucrare este o continuă provocare pentru inginerii tehnologi.

Punerea la punct a unui proces de prelucrare necesită identificarea a două tipuri de factori. Astfel se identifică ca factori de intrare mărimi fizice care pot fi reglate direct pe comenzile sistemului de prelucrare. De asemenea se identifică factorii de ieșire ca fiind mărimi fizice care caracterizează materialului prelucrat. Considerarea acestor factori în mod concret pentru ca cercetarea să fie eficientă este o sarcină dificilă pentru inginerul tehnolog. O astfel de cercetare începe cu identificarea factorilor de intrare care pot fi variați în mod continuu (sau aproape continuu) pe comenzile sistemului de prelucrare. Se recomandă ca alte reglaje să fie menținute la valori și în condiții cunoscute date de producătorul sistemului de prelucrare. Se recomandă studierea a unui număr mic de factori de ieșire (funcții obiectiv) care sunt într-adevăr semnificativi pentru obiectul prelucrat. Se elimină din studiu factorii a căror influență este mică asupra funcției, funcțiilor obiectiv studiate. Se repetă studiul aceiași problemă fiind definită acum ca o „optimizare”. Acesta înseamnă creșterea numărului de valori pentru factorii de influență studiați și extinderea dacă este cazul pe un număr mai mare de funcții obiectiv. Se urmărește realizarea unei rețete de alegere a parametrilor care să conducă la rezultatul dorit și care să poată fi transmisă către executanți.

Organizarea punerii la punct a procesului de sudare se poate realiza din două puncte de vedere diferite: din punctul de vedere al celui care deține un sistem de prelucrare și care dorește să identifice capacitățile de prelucrare ale unui material dat pe care îl vom numi problema directă (se prezic valorile factorilor de ieșire pe baza valorilor factorilor de intrare) și din punctul de vedere al celui care are niște valori pentru factori de ieșire pentru un produs de prelucrat și vrea să știe dacă folosind sistemul de prelucrare (laser) poate să obțină acest lucru, pe care îl vom numi problema inversă (se prezic valorile factorilor de intrare pe baza valorilor factorilor de ieșire). Modelarea empirică în urma căreia se obțin funcții de corelației între valorile factorilor de intrare și a celor de ieșire creează condiții realizării ambelor tipuri de predicții.

În procesul de sudare laser a metalelor puterea medie și viteza de sudare sunt recunoscuți ca fiind factorii de intrare care au contribuția principală asupra funcțiilor obiectiv. Cu toate acestea în sudarea laser fenomenele fizice care intervin la iradierea cu intensități mari de peste 10^6 W/cm² fac ca să apară alți factori care să modifice o formă standard a influențelor datorate puterii și vitezei. Regimul de sudare keyhole datorat vaporizării puternice face ca focalizarea fascicolului laser în interiorul piesei să modifice condițiile de absorbție. Astfel că profunzimea de focalizare se detașează în aceste condiții ca un factor de intrare care merită a fi studiat.

Alegerea funcțiilor obiectiv s-a realizat referitor la punerea în evidență a capacităților de topire ale materialului de către laser. Lățimea sudurii profunzimea și aria topită caracterizează aceste capacități. Aceleași funcții obiectiv caracterizează pe de altă parte sudura, utilizată pentru viitoare îmbinări sudate. O

categorie aparte de funcții obiectiv sunt cele care caracterizează suprafața sudurii și care vor fi explicitate ulterior. Aceasta completează descrierea regimului de sudare și arată efectul particular produs de defocalizare.

Defocalizarea generează efecte contrare în timpul procesului de sudare desfășurat în regimul keyhole. Astfel pe de o parte scade intensitatea la suprafață ceea ce scade în general capacitatea laserului de a induce căldură în material micșorând astfel valorilor parametrilor care caracterizează sudura. Pe de altă parte focalizarea radiației în interiorul piesei (prin distanța de defocalizare negativă) asigură propagarea convergentă a fascicolului laser în keyhole ceea ce ar face ca mecanismele de absorție primară (Reflexiile Fresnel) să acționeze mult mai eficient. Aceasta ar trebui să crească valorile parametrilor care caracterizează sudura.

Obiectivul acestei lucrări este investigarea experimentală asupra efectelor produse de defocalizare asupra valorilor parametrilor care caracterizează sudura. Acest obiectiv s-a reflectat în organizarea planurilor experimentale. Pentru acesta s-au ales două modalități de lucru și anume: modelarea experimentală prin serii experimentale clasice și de tip factorial care au inclus în modelare ca factor de influență defocalizarea (valori negative ale distanței dintre pata focală și suprafața piesei); un studiu detaliat al regimului de sudare keyhole pentru sudurile realizate și care includ o dependență de defocalizare. Aceasta este soluția identificată pentru studiul defocalizării asupra regimului de sudare keyhole.

Idealul în studiul sudării laser este reprezentat de o abordare globală a fenomenelor fizice susținută de cercetare experimentală extinsă pe multiple direcții însoțită de modelare analitică cu abordare detaliată a fenomenelor fizice și modelare experimentală extinsă în ceea ce privește alegerea factorilor de influență și a funcțiilor obiectiv.

Scopul lucrării este a studiului secțiunii sudurilor și a suprafeței acestora în vederea cunoașterii fenomenelor fizice care au loc în cadrul procesului de sudare cu orientare în principal către aspectul tehnologic, într-un caz concret de realizare a sudării pe oțel.

În urma celor arătate anterior lucrarea își propune atingerea următoarelor obiective operaționale:

O1 Stabilirea rolului defocalizării fascicolului laser ca factor de influență comparativ cu puterea laserului și viteza de sudare

O2 Studiul caracteristicilor suprafeței sudurii în vederea stabilirii legăturii dintre parametrii de proces și caracteristici ale băii de sudare, mișcării topiturii și formării keyhole.

O3 Stabilirea penetrării sudurii pentru sudarea în regim keyhole pe baza penetrării frontului de topire în material.

O4 Identificarea unor caracteristici de material ale sudurilor legate de parametrii procesului de sudare.

Cercetările din lucrare se vor referi la sudarea laser folosind un laser cu Nd:YAG pentru cazul particular al sudării metalelor în particular pentru oțel. S-au realizat linii de fuziune pe plăci de oțel, numite și suduri. Realizarea liniilor de fuziune nu exclude factorii de influență legații de interstițiul dintre piese. Cercetarea experimentală se axează pe efectul dat de condițiile de iradiere. Odată acest efect fiind cunoscut se pot obține ușor aprecieri asupra unor situații care apar la realizarea îmbinărilor sudate. Astfel studiul liniilor de fuziune (sudurii) prin lățimea sudurii, profunzimea sudurii și aria topită are o aplicabilitate directă în sudarea cap la cap cu material de adaos (fir), respectiv fără material de adaos și la sudarea prin suprapunere a pieselor.

1.6 Concluzii

Studiile pentru sudarea laser a diferitelor metale urmăresc cunoașterea și optimizarea procesului de sudare și de asemenea transformările structurale care se produc în metal în urma iradierii cu fascicol laser. Astfel sudarea laser a oțelurilor este prezentată în lucrările [Schmidt, 2008], [Berreta, 2007], [Ping, 2007]. Sudarea laser a aliajelor de aluminiu a fost prezentată în lucrările [Hu, 2006], [Haboudou, 2003], [Shannon, 2004]. Sudarea a aliajelor de titan a fost prezentată în lucrările [Akman, 2009] respectiv [Xu, 2002]. Sudarea laser a aliajelor de Ni este prezentată în lucrările [Ancona, 2007] respectiv [Leong, 2002]. Studiul procesului de sudare laser pentru aliaje de nichel a fost prezentat în lucrările [Cantello, 1996], [Han, 2001] și [Li, 1997]. Studiile prezentate în lucrare urmăresc următoarele obiective similare cu cele din studiile anterior enumerate în sensul de a pune în evidență aplicarea sudării laser la un anumit tip de material. Pentru aliaje de Al sudarea a fost prezentată în lucrarea [Cicala, 2005].

În Capitolul 1 s-a realizat prezentarea domeniului teoretic și experimental în care are loc cercetarea experimentală și teoretică propusă. Se prezintă dezvoltarea laserilor industriali, caracteristicile fascicolului laser și utilizarea acestora în procesele de prelucrare a materialelor. Apariția fenomenului de keyhole în baia de sudare a fost analizată pe larg la nivel de cauze, mecanisme și consecințe. Fenomenul de keyhole determină separarea situațiilor în care se realizează sudarea laser. Astfel se definesc două regimuri de sudare. Regimul de sudare prin conducție și regimul de sudare keyhole. Investigarea și studiul procesului de sudare laser are două direcții principale. Acestea sunt investigarea sudării în timpul procesului (on-line) și a sudurilor respectiv îmbinărilor sudate realizate (off-line). În această a doua categorie s-au încadrat investigațiile experimentale realizate în lucrare. Studiile în timpul procesului de sudare se referă la investigații asupra suprafeței băii de sudare și oscilațiilor care au loc în aceasta folosind, fotografii în raze X, fotografii cu camera rapidă, analiza spectroscopică a radiației emise din zona de interacțiune, analiza radiației emise din baia de sudare folosind fotodiode cu absorbție în UV și IR, analiza sunetelor emise în timpul procesului de sudare și variația intensității semnalului reflectat de suprafața băii de sudare de către o sursă de control (laser He-Ne, sau diodă laser) folosind un fotodetector. Aceste studii au ca obiectiv studiul băii de sudare și a keyhole ca obiect în sine și abordează mai puțin studiul parametrilor care controlează procesul de sudare.

Analiza sudurilor are ca obiect de studiu forma secțiunii sudurii, mărimea zonei afectate termic, și prezența porozităților în sudură și aspectul metalografic al sudurii, încercări de rezistență asupra îmbinărilor sudate. La aceste aspecte considerate principale se adaugă cele legate de suprafața sudurii (prin rugozitatea acesteia) și producerea undelor solide (valuri la suprafața sudurii). Studiul sudurilor și a îmbinărilor sudate reprezintă un domeniu de cercetare mult mai apropiat de variația parametrilor procesului de sudare. Lucrarea de față își propune o abordare care extinde ponderea cercetărilor asupra suprafeței sudurii arătând semnificația fenomenologică a aspectelor suprafeței sudurii.

Investigarea sudurilor și procesului de sudare este însoțită de modelare în scopul cunoașterii și predicției procesului de sudare. Se propune separarea modelării analitice care are o componentă fenomenologică importantă și modelarea experimentală care ignoră aspectul fenomenologic. Folosirea calcului numeric și metodelor de modelare numerică sunt considerate un instrument adițional modelării analitice. Diferența între modelele analitice constă în ipotezele simplificatoare propuse. Se propune o abordare graduală a acestora. Astfel se consideră o sursă

termică la suprafața materialului identificată cu fascicolul laser ,iar apoi se consideră mișcarea sursei termice caracteristică proceselor de prelucrare laser. Dezvoltarea topiturii are loc într-o formă specifică care solicită modificarea distribuției densității de flux termic inițial considerate. Se ajunge pentru modelele complexe pentru care se consideră o formă conică , cilindrică sau semisferică a keyhole. Modelarea experimentală realizează legătura între parametrii care controlează procesul de sudare (numiți factori de influență) și mărimi măsurate sau calculate în funcție de cele măsurate (numite funcții obiectiv). Această legătură se realizează cu ajutorul funcțiilor de corelație (formule matematice) numite și modele matematice sau empirice. Obținerea lor este însoțită de o cercetare statistică a variațiilor în urma căreia rezultă coeficienții de corelație. Modelarea experimentală folosește planuri experimentale factoriale în care sunt variați simultan mai mulți factori . Legat de acestea se pune problema alegerii tipului de formulă matematică (polinomială, logaritmică) care descrie tipul variațiilor și de realizarea unui studiu statistic al variațiilor. Se remarcă în acest sens folosirea unor formule pătratice (polinoame de gradul doi) și utilizarea metodei de analiză a variațiilor ANOVA. Modelarea după seriile experimentale clasice unde se variază un singur parametru este apropiată de prezentarea directă a rezultatelor experimentale. Diferența constă în utilizarea funcțiilor de regresie. Ca și parametrii variați modelarea experimentală din studiile citate au considerat puterea laserului , viteza de sudare și defocalizarea (poziția planului focal al laserului în raport cu suprafața piesei). Ca și funcții obiectiv au fost analizate, lățimea și profunzimea sudurii , lățimea zonei afectate termic și parametrii tehnico-economi care caracterizează sudura. Abordări similare vor fi folosite în lucrare. În încheierea capitolului se realizează o sinteză asupra a enumerate și se precizează direcțiile de studiu.

2.0 evaluare integratoare a evoluției și rolului fenomenelor termice în procesele de sudare laser

În Capitolul 1 au fost prezentate principalele probleme legate de sudarea laser în regim keyhole a materialelor metalice. Mai multe lucrări ale autorului au abordat problemele anterior prezentate. Astfel problemele legate de extincția fascicolului laser în material sunt prezentate în lucrarea [Stoican, 2007 a]. Probleme legate de propagarea radiației laser în keyhole sunt prezentate în lucrarea [Boboescu, 2006]. Prezentarea generală a fenomenului de keyhole în sudarea laser a fost discutată în lucrarea [Boboescu, 2007b]. Aspecte legate de mișcarea topiturii în baia de sudare și formarea keyhole în baia de sudare au fost prezentate în lucrările [Boboescu, 2009 c] , [Boboescu, 2009 d] .Formularea unor aspecte legate de modelarea termică este prezentată în lucrările [Bujor, 2009 a] și [Boboescu, 2009 e] . Aspecte legate de modelarea termică cu considerarea keyhole în baia de sudare sunt tratate în lucrarea [Bujor, 2009 b]. Aspecte legate de efectele termice în corelație cu regimul de iradiere au fost analizate în lucrările [Boboescu, 2008 b]. Asocierea dintre forma keyhole și câmpul de temperatură a fost prezentată în lucrarea [Boboescu, 2010 d].

În Capitolul 2 se va prezenta modul de descriere cantitativă a interacțiunii dintre radiația laser și material. Prin aceasta se pun bazele unor abordări cantitative asupra fenomenului de keyhole și a procesului de sudare.

2.1 Introducere în problemele termice

Intensitatea fascicolului laser este o mărime fizică care caracterizează radiația emisă. Intensitatea radiației este proporțională cu pătratul amplitudinii unde electromagnetice. Măsurarea intensității radiației se realizează pentru secțiunea transversală a fascicolului laser folosind efectul termic sau fotoelectric al radiației. Intensitatea fascicolului laser are o distribuție complexă în spațiu datorită modurilor electromagnetice transversale și longitudinale produse în cavitatea optică și în timp datorită regimului de iradiere pulsant (cu diferite forme ale pulsului) sau continuu. Pentru formularea efectelor termice produse de fascicolul laser asupra materialelor se recomandă o formulare simplificată pentru distribuția intensității fascicolului laser. Aceasta constă în separarea variației spațiale de cea temporală , cele două fiind considerate independente de asemenea se va limita discuția pentru fascicolul laser multimod.

Intensitatea fascicolului laser multimod în secțiune transversală la un anumit moment se prezintă sub formă de mai multe maxime și minime concentrate într-o zonă considerată circulară de rază r_s , care reprezintă pata produsă de fascicolul laser pe suprafața piesei. Aceasta zonă este considerată ca fiind caracterizată de intensitatea medie. Matematic această are distribuția sub forma unei funcții treaptă

$$i(r) = \begin{cases} i_0 & \text{pentru } r \leq r_s \\ 0 & \text{pentru } r > r_s \end{cases} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.1)$$

Pulsurile laser pot avea mai multe forme de variație în timp a intensității fascicolului laser (triunghiulară, dreptunghiulară, cu maxime repetete). Intensitatea medie poate fi descrisă sub forma unei funcții treaptă. Acest tip de variație poate fi considerată și pentru regimul cotinuu prin considerarea timpului pulsului infinit.

$$I^*(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ I & 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & t > t_p \end{cases} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.2)$$

unde t_p este durata pulsului laser.

Prin asumarea celor două variații de tip treaptă se consideră de fapt intensitatea laserului I constantă în timp și în pata produsă de fascicolul laser pe suprafața piesei.

Efectele termice produse de fascicolul laser în material se descriu prin prezența unei surse termice în material. Pentru cazul metalelor în care absorbția radiației are loc la suprafața materialului. Sursa termică produsă în material este caracterizată de densitatea de flux termic q [W/cm^2]. În figura 2.1 este reprezentat fascicolul laser și efectul acestuia în material, sursa termică. Densitatea de flux termic q se consideră legată de intensitatea fascicolului laser printr-o relație de proporționalitate.

$$q = A \cdot I \quad [\text{W/cm}^2] \quad (2.3)$$

A- coeficientul de absorbție [-]

În relația anterioară intensitatea fascicolului laser se consideră pentru cazul în care acesta se află la incidență normală pe suprafața iradiată. Coeficientul de absorbție depinde de starea suprafeței. Se remarcă cazurile în care suprafața piesei se află în stare solidă respectiv cazul în care aceasta se află în stare lichidă. Pentru iradierea în topitură coeficientul de absorbție are valori mai ridicate. Pentru iradierea metalelor un rol important îl are gradul de oxidare al suprafeței. Sursa termică produsă în material este descrisă relativ la intensitatea fascicolului laser, uneori se folosește o identificare între cele două noțiuni de "Intensitatea absorbită"

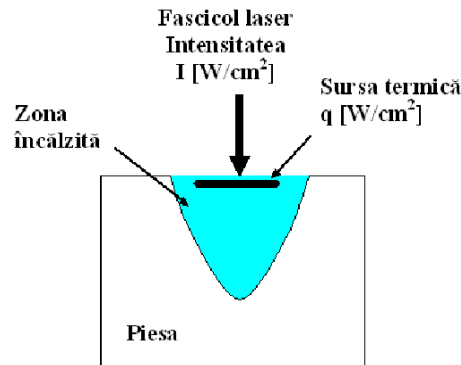


Figura 2.1 Sursa termică produsă în material la iradierea cu fascicol laser

Pentru materiale opace la radiația laser efectul termic al laserului se formulează sub forma unei surse termice la suprafața materialului. Cea mai simplă situație o constituie considerarea unei surse termice extinse la suprafața materialului caracterizată de o densitate de flux termic q [W/cm²]. Sursa termică este caracterizată prin densitatea de flux termic. Aceasta este astfel exprimată printr-o mărime fizică care mediază căldura (exprimată în jouli) relativ la timpul în care are loc procesul de transfer și la suprafața pe care se efectuează transferul de căldură. Căldura se propagă în profunzimea materialului (în direcția axei z). Câmpul termic în material este descris de ecuația căldurii. Ecuația diferențială a căldurii are următoarea formă: (**sursa termică de suprafață**)

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T, \left[\frac{K}{cm^2} \right] \quad (2.4)$$

Sursa termică este introdusă prin condiția la limită :

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q \left[\frac{W}{cm^2} \right] \quad (2.5)$$

Problema termică se aplică pentru metale aflate în stare solidă și lichidă unde absorbția fascicolului laser are loc la suprafața materialului.

Pentru materialele parțial transparente la radiația laser este absorbită (total sau parțial) într-o zonă extinsă a materialului. Sursa termică volumică se caracterizează prin apariția în interiorul volumului de material a unei surse termice, similar cazului în care ar fi o ardere internă în material. Aceasta este caracterizată prin densitatea volumică de flux de flux de căldură j_q [W/cm³]. La ecuația diferențială a căldurii se adaugă un termen suplimentar care caracterizează această sursă. Ecuația căldurii are următoarea formă (sursa termică volumică):

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta T + \frac{j_q}{k} \left[\frac{K}{cm^2} \right] \quad (2.6)$$

Încălzirea materialului este primul efect termic indus în acesta datorită iradierii cu fascicol laser. Frontul de încălzire se propagă progresiv în material. Încălzirea este urmată de transformarea de stare de agregare și anume topirea materialului. Producerea acestora va fi analizată pentru metale, considerând

variația temperaturii cu timpul pentru cazul metalelor pure și al aliajelor eutectice. În figura 2.2 se prezintă schema pentru procesul de încălzire în material. În figura 2.3 se prezintă schema pentru zona în care are loc transformarea de fază în material.

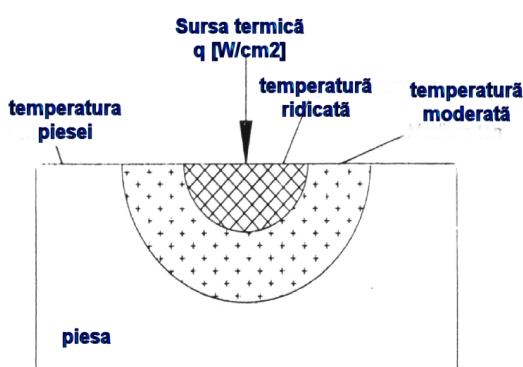


Figura 2.2 Propagarea frontului de încălzire în material

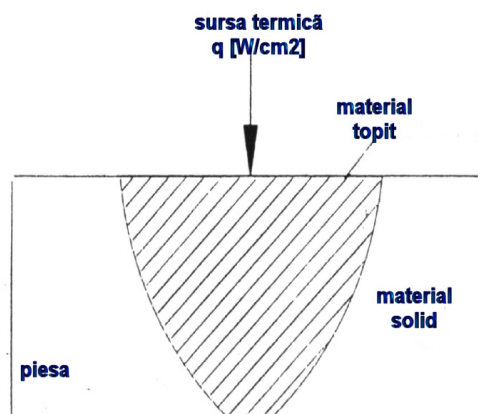


Figura 2.3 Transformarea de fază în material

Sudarea laser în regim keyhole implică prezența a două transformări de stare de agregare, topirea și vaporizarea, care se produc în metalul iradiat. În cele ce urmează vor fi analizate separat încălzirea materialului și transformările termice produse în acesta.

Prin transformări termice se va înțelege transformări care sunt izoterme și evoluează în material similar transformărilor de stare de agregare sau unor transformări de fază pentru meale pure.

2.2 Încălzirea materialului iradiat

Rezolvarea ecuației căldurii necesită ipoteze suplimentare. Astfel se mediul încălzit se consideră semi-infinit, aceasta înseamnă că dimensiunile corpului sunt mai mari decât regiunea iradiată. Se consideră o tratare unidimensională a transferului de căldură pe direcția propagării fascicolului laser. Ecuația diferențială a căldurii se scrie în coordonate cilindrice. Se va prezenta o soluție particulară a ecuației căldurii. Astfel pentru cazul iradierii metalelor în care sursa termică este considerată la suprafață se formulează problema termică cu **densitate de flux termic constantă impusă la suprafață** pentru un mediu semiinfinit și pentru o tratare unidimensională. Se consideră propagarea unidirecțională a căldurii în material în direcția axei Oz de la suprafața materialului către interiorul său. Ecuația căldurii are următoarea formă :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

Pentru aceasta se formulează următoarele condiții inițiale și la limită

$$T(z,0) = T_i \quad (2.8)$$

$$T(\infty, t) = T_i \quad (2.9)$$

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = q \quad (2.10)$$

Soluția ecuației căldurii este următoarea [Drăgănescu, 1986]:

$$T(z, t) - T_i = \frac{2q}{k} \sqrt{at} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \quad (2.11)$$

Se observă astfel că în urma rezolvării ecuației căldurii se obține distribuția de temperatură în interiorul materialului. Aceasta caracterizează încălzirea materialului. La suprafața materialului vom avea :

$$T(0, t) - T_i = \frac{2q}{k} \sqrt{at} \operatorname{ierfc}(0) \quad (2.12)$$

Expresia formulelor matematice care conduc la definirea funcției ierfc este dată de următoarele relații [Drăgănescu, 1986]:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du \quad (2.13)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-u^2} du \quad (2.14)$$

$$\operatorname{ierfc}(x) = \int_x^\infty \operatorname{erfc}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x \operatorname{erfc}(x) \quad (2.15)$$

O aproximare pentru funcția ierfc este următoarea :

$$\operatorname{ierfc}(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi} x^2} e^{-x^2} - \dots \quad (2.16)$$

Aceasta devine pentru x apropiat de zero:

$$\operatorname{ierfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 + x^2 - \frac{x^4}{6} + \dots\right) - x \quad (2.17)$$

Se va folosi aproximația : $\operatorname{ierfc}(0) \cong \frac{1}{\sqrt{\pi}}$ (2.18.a) și se va neglija T_i . Se va obține astfel formula pentru variația temperaturii la suprafață în funcție de timp:

$$T(0, t) \cong \frac{2q}{k} \sqrt{\frac{at}{\pi}} \quad (2.18)$$

Această relație reprezintă unul din rezultatele importante care va fi folosit în continuare. În aplicarea acestei formule trebuie să ținem seama că aceasta

reprezintă o diferență de temperatură. Adică ea prezintă creșterea temperaturii la suprafață relativ la temperatura inițială a materialului. Acesta este prezentat și în [Prohorov 1980], [Drăgănescu 1986] Relația anterioară se poate scrie sub următoarea formă:

$$q = \frac{0,885 T k}{(at)^{\frac{1}{2}}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.19)$$

Din aceasta se deduce expresia pentru timpul de interacțiune :

$$t = \frac{0,79 T^2 k^2}{q^2 a} \text{ [s]} \quad (2.20)$$

Relațiile anterioare prezintă legătura între temperatura suprafeței materialului densitatea de flux termic și timp. Aceste relații sunt aplicabile la efectuarea de predicții pentru cele trei mărimi atunci când două dintre ele sunt cunoscute. Aceste relații sunt aplicabile până la atingerea temperaturii de topire la suprafață.

Se pune problema stabilirea unei profunzimi în material pe care sursa termică să aibă un efect semnificativ din punct de vedere al variației temperaturii în material. Aceasta se numește și distanța (profunzimea) de penetrare termică. Se va considera raportul între variația temperaturii în interiorul materialului și cea la suprafața materialului folosind relațiile (2.13) și (2.9). Acest raport arată cât de puternică este încălzirea materialului la o anumită profunzime z după un anumit timp t . Raportul arată variația relativă a temperaturii și pentru o valoare arbitrară a sa se obține o relație de tipul $z = z(t)$ care va da profunzimea de penetrare în funcție de timp:

$$\frac{T(z,t) - T_i}{T(0,t)} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \quad (2.21)$$

Acest raport va fi evaluat pentru diferite valori ale profunzimii în tabelul 2.1 :

Tabel 2.3 Diferite valori ale distanței de penetrare termică

z	$\sqrt{\frac{at}{2}}$	\sqrt{at}	$2\sqrt{at}$
$\frac{T(z,t) - T_i}{T(0,t)}$	0.15	0.1	0.02

Stabilirea unei distanței de penetrare termică înseamnă definirea unei distanțe în profunzimea materialului pentru care încălzirea este semnificativă din punct de vedere al variației temperaturii. Această semnificație se pune în evidență prin raportul între diferența de temperatură indusă în interiorul materialului și cea la suprafață. Se folosește un prag de semnificație pentru variația relativă a temperaturii. În principiu valoarea raportului calculat este arbitrară , însă ea se

adaptează situații concrete. Se rețin trei valori pentru distanța de penetrare termică.

Distanța de penetrare termică $z = \sqrt{\frac{at}{2}}$ (2.22) indică o concentrare a

efectului termic obținut (similară cu un maxim de tip gaussian), altfel spus încălzirea materialului în interior trebuie să fie apropiată de cea la suprafață.

Distanța de penetrare termică $z = \sqrt{at}$ (2.23) arată scăderea diferenței de

temperatură cu un ordin de mărime. Aceasta o vom folosi în continuare. Distanța

de penetrare termică $z = 2\sqrt{at}$ (2.24) arată de fapt pierderea completă a efectului

sursei termice. Astfel pentru această distanță la o încălzire de 1000 de grade la suprafață la profunzimea z va fi doar o încălzire de 20 de grade.

Din formula distanței de penetrare termică se observă că aceasta este proporțională cu rădăcina pătrată a timpului. Atât temperatura la suprafață, cât și distanța de penetrare termică cresc cu radicalul timpului în care are loc încălzirea. Acest proces poate fi considerat până când la suprafață se atinge temperatura de topire. Indiferent care din cele trei formule prezentate anterior se consideră pentru distanța de penetrare termică, aceasta va fi proporțională cu radicalul din timpul de expunere la sursa termică. Distanța de penetrare termică se folosește independent de problema termică din care a rezultat. Ea este în principiu independentă de sursa termică.

Ecuția de conducție a căldurii conține prin modul în care a fost stabilită reprezintă o medie a fenomenelor de agitație termică produse la nivel atomic și molecular. Astfel conducția căldurii este validă pentru porțiuni semnificative de material. Astfel conducția căldurii (ecuația de conducție a căldurii și mărimile densitate de flux etc.) își pierd sensul pentru lungimi mai mici de $1\mu\text{m}$ și timpi de interacțiune corelați cu această lungime (10^{-8} s pentru metale).

Sursa termică generată de interacțiunea dintre fasciculul laser și obiectul de prelucrat are o anumită dimensiune. Formularea problemelor termice de încălzire depinde de dimensiunile sursei termice. În abordările teoretice pata produsă de fasciculul laser pe suprafața piesei este considerată de formă circulară. Aceasta este caracterizată de raza r . Raza spotului și distanța de penetrare termică conduc la stabilirea modului de considerare a propagării căldurii în material. Astfel dacă

$r \gg \sqrt{at}$, „unda termică” se va dezvolta într-o simetrie cilindrică. Ecuția

diferențială a căldurii va fi rezolvată unidimensional în direcția de propagare a fasciculului laser. Altfel spus încălzirea are loc în profunzime. Efectul de încălzire

lateral este neglijabil. Dacă $r \ll \sqrt{at}$, „unda termică” se dezvoltă într-o simetrie

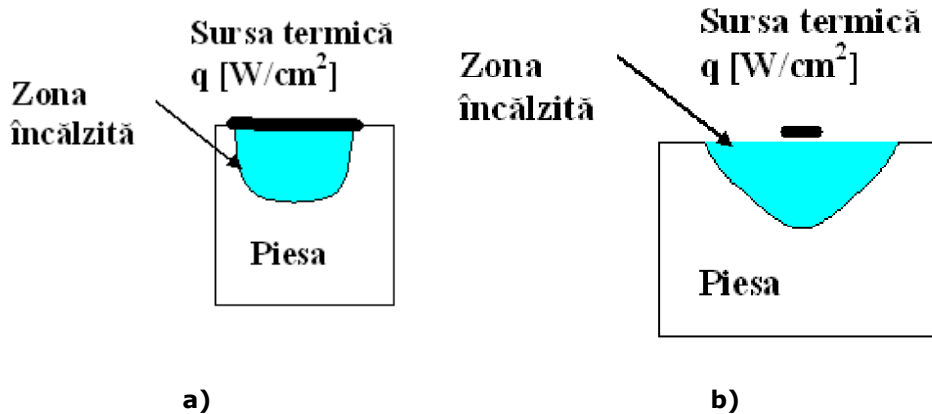
semisferică. Se va impune o tratare tridimensională a ecuației căldurii. Sursa

termică se comportă ca o sursă termică punctuală. Este foarte important ca

problemele de încălzire să fie încadrate într-unul din aceste cazuri. Tipurile de sursă

termică la suprafața piesei extinsă și respectiv punctuală sunt reprezentate în figura

2.4



a) Sursa termică la suprafața piesei a) sursă termică extinsă , b) sursă termică redusă (punctuală)

O altă mărime care se definește pe baza distanței de penetrare termică este viteza de penetrare termică a căldurii în material:

$$u_h \approx \frac{\sqrt{at}}{t} = \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (2.25)$$

Viteza de penetrare a căldurii în material, ca și distanța de penetrare termică nu are o dependență directă de densitatea de flux a sursei termice. Se observă astfel că pentru procesele de încălzire rolul principal îl are timpul de încălzire. Acesta este determinat astfel:

- Se consideră densitatea de flux termic q cunoscută
- Se impune ca la suprafața materialului să se obțină temperatura de topire sau temperatura de descompunere chimică a materialului sau temperatura primei transformări de fază care are loc.
- Se calculează timpul de interacțiune pe baza formulei (2.20).

2.3 Transformarea de stare de agregare a materialului iradiat

Transformarea de stare de agregare implică o schimbare structurală a materialului. Procesul termic în care sunt implicate transformări de fază nu poate fi descris de ecuația căldurii. În cele ce urmează se va descrie legătura dintre o anumită densitate de flux termic și rezultatul produs de aceasta ,o transformare de stare de agregare, figura 2.5.

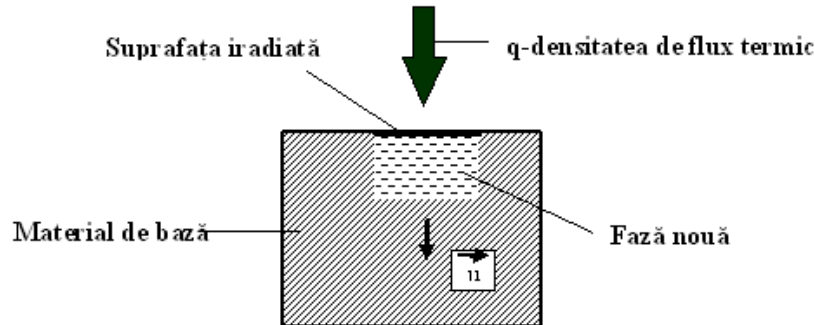


Figura 2.5 Evoluția frontului de transformare de fază în material, folosind o simetrie cilindrică

Se consideră o sursă termică de densitate de flux termic q aplicată pe o suprafață S . Se consideră că transformarea de stare de agregare are loc numai pe direcția normală pe suprafața S . Noua fază se dezvoltă având o simetrie cilindrică. Vom scrie egalitatea dintre căldura necesară transformării de fază a unui volum de material și cea introdusă de sursa termică prin suprafața S . Vom avea

$$\rho V L = q S t \Rightarrow \rho S z L = q S t \Rightarrow \rho L \frac{z}{t} = q \Rightarrow q = \rho L u \quad (2.26)$$

Unde:

ρ - densitatea materialului solid [kg/m^3]

u - viteza de propagare a frontului de transformare de stare de agregare în material [m/s]

S - suprafața sursei termice [m^2]

V - volumul de material supus transformării de stare de agregare [m^3]

L - căldura latentă pentru transformarea de stare de agregare [J/kg]

t - timpul [s]

z - distanța de propagare a frontului de transformare de stare de agregare în profunzimea materialului [m].

Relația (2.26) arată că densitatea de flux termic este proporțională cu viteza de propagare a transformării de stare de agregare și reciproc. Legat de stabilirea acestei formule apare ca factor arbitrar considerarea unei simetrii cilindrice pentru zona în care are loc transformarea de stare de agregare. Ea a fost stabilită în acord cu [Rykalin 1978] unde se consideră ca transformare de stare de agregare vaporizarea. Principala deficiență a relației anterioare este că ea nu spune dacă acea transformare de fază poate avea într-adevăr loc.

Transformarea de stare de agregare este un proces izoterm, pentru metale pure și aliaje eutectice. Se va considera în cele ce urmează acest caz. Între temperatura la care are loc transformarea de fază și căldura latentă pentru aceasta există o legătură. Într-o situație dată se recomandă folosirea numai a uneia din cele două mărimi. Se recomandă ca să se folosească numai căldura latentă pentru descrierea transformării de stare de agregare. Ca raționament pare destul de ușor să condiționăm transformarea de stare de agregare de obținerea temperaturii de transformare de stare de agregare la suprafață în urma unui proces de încălzire. Acest raționament exclude însă tocmai ideea de propagare a frontului de

transformare de stare de agregare în material. Transformarea de stare de agregare devine reală și de efect atunci când frontul de transformare de stare de agregare se propagă cu o viteză suficientă în material.

Aplicațiile directe în care transformările de stare de agregare topirea și vaporizarea sunt identificate numai pe baza atingerii temperaturii de transformare de stare de agregare la suprafața piesei în urma unui proces de încălzire sunt prezentate în cele ce urmează.

Se poate efectua o corelația utilă între densitatea de flux termic și timpul de interacțiune în cazul în care la suprafață se obține temperatura de topire. Aceasta se scrie astfel :

$$q_m = \frac{0,885 T_m k}{(a t_m)^{\frac{1}{2}}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.27)$$

Prin aceasta se leagă densitatea de flux q_m termic necesară obținerii temperaturii de topire la suprafață de timpul de interacțiune t_m . Obținerea temperaturii de topire la suprafața materialului nu înseamnă și obținerea unei topiri semnificative.

În mod analog se poate aplica același tip de relație pentru vaporizare. În unele cazuri aplicarea acesteia este utilă dar în acest caz se depășesc limitele de valabilitate a ecuației căldurii. Predicția este valabilă la suprafața piesei.

$$q_v = \frac{0,885 T_v k}{(a t_v)^{\frac{1}{2}}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.28)$$

Tabel 2.2 Timpii de atingere a temperaturii de topire (t_m) respectiv de vaporizare(t_v) la suprafața metalului pentru densitățile de flux termic de $q=10^5$ [W/cm²] respectiv $q=10^6$ [W/cm²] în urma unui proces de încălzire, pentru metale

metal	k [W/ (cm °C)]	a [cm ² /s]	T _m [°C]	T _v [°C]	t _m [ms] q=10 ⁵ [W/cm ²]	t _m [ms] q=10 ⁶ [W/cm ²]	t _v [ms] q=10 ⁵ [W/cm ²]	t _v [ms] q=10 ⁶ [W/cm ²]
Ag	4.07	0.65	961	2212	1.8592	0.018592	9.8508	0.098508
Al	2.09	0.87	660	2467	0.1727	0.001727	2.414	0.02414
Cu	3.89	1.12	1083	2595	1.2518	0.012518	7.1875	0.071875
Fe	0.73	0.2	1533	2750	0.4946	0.004946	1.5918	0.015918
Ni	0.67	0.18	1453	2730	0.4159	0.004159	1.4683	0.014683
Sn	0.64	0.387	232	2270	0.0045	0.000045	0.4308	0.004308
Ti	0.15	0.06	1700	3250	0.0856	0.000856	0.3129	0.003129
Zi	1.12	0.4	420	906	0.0437	0.000437	0.2033	0.002033

Prin aceasta se leagă densitatea de flux q_v termic necesară obținerii temperaturii de topire la suprafață de timpul de interacțiune t_v . Relațiile anterioare au fost aplicate în tabele 2.2 și 2.3 pentru obținerea temperaturii de topire, respectiv vaporizare la suprafață. Timpii de interacțiune și densitățile de flux termic au fost aleși legații de cei folosiții în sudarea laser. Aplicația relației este dată în tabelul 2.2 iar a relației în tabelul 2.3.

Se observă că creșterea cu un ordin de mărime a densității de flux termic produce scăderea cu două ordine de mărime a timpului de interacțiune. Creșterea cu două ordine de mărime a timpului de interacțiune duce la scăderea cu un ordin de mărime a densităților de flux termic. Observația cea mai importantă este că separarea fenomenelor de topire și vaporizarea numai pe baza temperaturilor de transformare de fază nu produce diferențe în aceleași condiții între timpii de interacțiune respectiv densitățile de flux termic mai mari de un ordin de mărime. Pe această observație se bazează considerarea topirii și vaporizării simultan ca transformări de fază în condiții de densitate de flux termic și timp de interacțiune specifice sudării laser.

Tabel 2.3 Valori pentru densitatea de flux termic necesară aducerii metalului la temperatura de topire (q_m) respectiv temperatura de vaporizare (q_v) pentru timpi de interacțiune de 1 ms, 10 ms 100 ms (contantele de material sunt cele din tabelul anterior)

metal	q_m [10^5 W/cm 2] t=1ms	q_m [10^5 W/cm 2] t=10ms	q_m [10^5 W/cm 2] t=100ms	q_v [10^5 W/cm 2] t=1ms	q_v [10^5 W/cm 2] t=10ms	q_v [10^5 W/cm 2] t=100ms
Ag	1.357	0.429	0.135	3.125	0.988	0.312
Al	0.413	0.13	0.041	1.547	0.489	0.154
Cu	1.114	0.352	0.111	2.669	0.844	0.266
Fe	0.7	0.221	0.07	1.256	0.397	0.125
Ni	0.642	0.203	0.064	1.206	0.381	0.12
Sn	0.066	0.021	0.006	0.653	0.206	0.065
Ti	0.291	0.092	0.029	0.556	0.176	0.055
Zi	0.208	0.065	0.02	0.449	0.141	0.044

Odată cu creșterea densității de flux termic crește și viteza propagării frontului transformării stării de agregare. Realizarea transformării de fază implică însă încălzirea materialului. Astfel transformarea de fază nu poate propaga în material cu o viteză mai mare decât viteza de încălzire. [Rykalin, 1978] a aplicat această condiție asupra vaporizării. Aceasta se consideră a fi raportul dintre distanța de penetrare termică și timp :

$$u = u_h \approx \frac{\sqrt{at}}{t} = \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (2.29)$$

Pentru ca viteza de încălzire astfel definită să fie aplicabilă în formula care caracterizează transformarea de fază trebuie ca viteza de încălzire să fie adusă la o valoare constantă , astfel parametrul variabil timpul va trebui fixat. O situație ideală

În care frontul de încălzire și cel de transformare de fază se propagă simultan în material va duce la rescrierea relației (2.17) sub forma:

$$q = \rho L \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (2.30)$$

Această relație este utilizată pentru a face legătura între densitatea de flux termic și timpul de interacțiune în cazul prezenței unei transformări de stare de agregare. Se pot efectua predicții utile pentru densitatea de flux termic dacă se cunoaște timpul de interacțiune și reciproc. Trebuie însă stabilit pe alte baze dacă într-adevăr transformarea termică are loc, pentru situația considerată. Aceasta înseamnă stabilirea corectă a domeniului de valori pentru timpul care intră în relația anterioară.

2.4 Calculul teoretic a condițiilor de obținere a regimurilor de sudare

În cele ce urmează se va aborda problema realizării sudării metalelor din punctul de vedere fenomenelor termice care au loc. Se va face o descriere a condițiilor în care se obține regimul de sudare prin conducție respectiv regimul de sudare keyhole. Sudarea laser este posibilă atunci când se obține o cantitate considerabilă de topitură. Problema are două variabile densitatea de flux termic și timpul de interacțiune. În lucrarea [Rykalin, 1978] sunt prezentate două valori limită pentru densitatea de flux termic. Acestea sunt date de următoarele relații:

$$q_m^0 = \frac{0,885 T_m k}{(a t_i)^{\frac{1}{2}}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.31)$$

Aceasta este de fapt relația (2.19) și stabilește densitatea de flux termic necesară pentru a atinge temperatura de topire în timpul de interacțiune t_i . A doua relație este :

$$q_v^0 \approx \rho L_v \sqrt{\frac{a}{t_i}} \quad (2.32)$$

Aceasta are la bază același raționament care a stat și la deducerea relației (2.30), egalitatea dintre viteza de propagare a frontului de topire și viteza de încălzire a materialului, și va da densitatea de flux minimă pentru ca frontul de vaporizare să se propage în material. Definirea regimurilor de sudare în funcție de aceste două densități de flux termic este prezentată tabelul 2.4.

Tabel 2.4 Identificarea regimurilor de sudare în funcție de densitatea de flux termic

$q < q_m^0$	Nu există topire
$q_m^0 < q < q_v^0$	Regim de sudare prin conducție
$q_v^0 < q$	Regim de sudare keyhole

Calculul celor două densități de flux termic critice, pentru topire respectiv vaporizare pentru mai multe metale este prezentat în tabelul 2.5.

În realitate pentru a obține un strat topit semnificativ la suprafață este necesară obținerea unei densități de flux termic mai mari la suprafață decât q_m^0 , deoarece nu ia în considerare căldura necesară transformării stării de agregare. Densitatea de flux termic q_v^0 arată propagarea frontului de vaporizare în material în situația în care vaporizarea are loc în materialul topit aflat deja la temperatura de vaporizare. Altfel spus se ignoră aspectul integral al transformărilor termice. Aprecierea anterioară asupra densităților de flux termic limită care separă cele două regimuri de sudare conducție și keyhole are ca variabilă timpul de interacțiune t_i . Acesta nu poate avea orice valoare. El trebuie ales astfel încât să fie suficient de mare ca topirea să fie semnificativă.

Tabel 2.5 Densitățile de flux termic necesare pentru topire și vaporizare la suprafața metalelor pentru timpul de interacțiune de 1 ms după [Stoican, 2007 b]

metal	q_m^0 [W/cm ²]	q_v^0 [W/cm ²]	metal	q_m^0 [W/cm ²]	q_v^0 [W/cm ²]
Ag	$1,357 \times 10^5$	$6,198 \times 10^5$	Ni	$0,642 \times 10^5$	$7,673 \times 10^5$
Al	$0,413 \times 10^5$	$0,837 \times 10^5$	Sn	$0,066 \times 10^5$	$2,702 \times 10^5$
Cu	$1,113 \times 10^5$	$14,363 \times 10^5$	Ti	$0,291 \times 10^5$	$1,272 \times 10^5$
Fe	$0,7 \times 10^5$	$7,908 \times 10^5$	Zi	$0,208 \times 10^5$	$2,536 \times 10^5$

Aceste cunoștințe elementare privind separare regimurilor de sudare pe baza delimitării cazurilor în care se produce topirea respectiv vaporizarea pot fi baza unei abordări generale ținând cont de următoarele:

- nu se aplică formule de tip (2.19) care au la bază numai fenomenul de încălzire pentru temperaturi care depășesc temperatura de topire.
- fenomenele termice sau termo-mecanice se formulează ca transformări termice (transformare cu variație de temperatură limitată) caracterizate de o căldură latentă integrală. Prin formule de tip (2.30) se urmărește definirea condițiilor în care frontul de transformare termică penetrează în material.

În abordarea unui proces tehnologic care folosește iradierea cu laser principalele impedimente care apar în formularea directă a problemelor termice sunt legate de coeficientul de absorbție care modifică intensitatea sursei termice la suprafața materialului comparativ cu cea a laserului și de asemenea timpul de interacțiune variabil în cazul folosirii regimului pulsant. Există un nivel de aproximare în care aceste probleme pot fi depășite.

Indiferent de formularea matematică folosită identificarea condițiilor în care are loc un anumit fenomen termic (încălzire, topire, vaporizare) implică alegerea a două variabile independente. Acestea sunt densitatea de flux termic și timpul de interacțiune. Definirea condițiilor în care se poate realiza un anumit fenomen termic conduce implicit la determinarea condițiilor în care se poate realiza la nivel de principiu un anumit proces tehnologic: tratament termic al suprafeței, sudare, găurire tăiere. În particular se poate efectua discriminarea între regimurile de sudare. Efectuarea discuției separat fie pentru densitate de flux termic fie pentru timpul de interacțiune nu conduce la o identificare precisă a condițiilor în care

poate fi realizat un anumit proces tehnologic. Este arătat în [Ion, 2005] că timpul de interacțiune pentru realizarea unei topiri semnificative este cuprins între 10^{-4} s și 10^{-2} s. La partea superioară a acestui interval se încadrează sudarea în regim keyhole. Pentru acest interval al timpului de interacțiune transformarea de fază principală în care cuplează densitatea de flux termic este topirea metalului.

În paragraful următor se va prezenta o abordare originală asupra fenomenelor termice folosind ideile enumerate pe scurt anterior.

2.5 Tratarea similară a unor fenomene fizice cu transformările de stare de agregare

La iradierea laser a metalelor apar ca transformări de fază topirea și vaporizarea și sublimarea metalului. În cele ce urmează vom prezenta o evoluție progresivă a ideilor care trec de la necesitatea considerării transformării de fază la generalizarea acestei tratări. Încălzirea materialului este un fenomen progresiv în material. Ea este însoțită de propagarea câmpului termic în material. Se remarcă două tipuri de fenomene fizice succesive în timp:

- Încălzirea materialului
- Transformarea de stare de agregare

Încălzirea materialului are un caracter progresiv iar transformarea de stare de agregare are un caracter simultan, la ea participă o masă dată de material. Încălzirea este fenomenul termic primar, fiind urmate de alte fenomene termice. În descrierea fenomenelor termice considerare caracterului simultan este utilă. Astfel o serie de fenomene fizice vor putea fi tratate la fel ca și transformările de stare de agregare. Se definesc astfel transformările termice particulare similare cu cele de stare de agregare.

Prin **transformare termică particulară** se înțelege un fenomen fizic de natură termică care are loc simultan într-o anumită masă de material și care poate fi caracterizat de un termen numit căldură latentă (similar ca unități de măsură cu cel care caracterizează transformările de stare de agregare)

Transformarea termică particulară este descrisă de viteza de propagare a frontului de transformare relativ la densitatea de flux termic care o întreține după relația :

$$q = \rho L_x u \quad (2.33)$$

Se consideră următoarele fenomene fizice care pot fi considerate transformări termice particulare:

- încălzirea simultană (a unei mase de material) la o diferență de temperatură constantă ΔT (termenul $c \cdot \Delta T$ se consideră echivalent cu căldura latentă)
- topirea , vaporizarea , sublimarea
- mișcarea topiturii , mișcarea vaporilor
- participarea materialului la o reacție chimică (endotermă) (căldura de reacție este echivalentă cu căldura latentă).

Se observă că transformările de fază produse de o diferență de temperatură în material pot fi clasificate ca fiind: termice , mecanice și chimice.

Există două fenomene mecanice care au o importanță deosebită în sudarea laser acestea sunt: ruperea în stare solidă (fracturarea sau fisurarea) și curgerea topiturii în baia de sudare. Studiul acestora pe baza relației (2.26) are la bază

interpretarea termenului ρL . Astfel cunoscând viteza de încălzire și densitatea de flux termic aplicată se poate evalua presiunea indusă în material după relația :

$$q = p_t u_h \quad (2.34)$$

respectiv

$$p_t = \frac{q}{u_h} \quad (2.35)$$

p_t - presiunea indusă în material ca efect termic [N/m^2]

Dacă se dorește studiul fracturării materialului aceasta va fi comparată cu tensiunea la care rezistă materialul. Dacă dorim să studiem curgerea materialului topit atunci aceasta reprezintă presiunea statică care se transformă integral în presiune dinamică pentru un fluid ideal. Astfel avem un instrument teoretic în abordarea fenomenelor de fisurare și de curgere a topituri.

Materialul iradiat se poate descompune chimic sau poate participa la o reacție cu elemente din mediul înconjurător. Cel mai sugestiv caz în acest sens fiind arderea. Pentru ambele cazuri căldura de reacție se poate asimila cu căldura latentă în relația L_x .

Transformările termice particulare reprezintă un mod concepție asupra fenomenelor fizice. Se presupune că fenomenul respectiv are loc. Atunci viteza de propagare a frontului de transformare este proporțională cu densitatea de flux termic. Viteza de propagare u fiind constantă va însemna că penetrarea este proporțională cu timpul de interacțiune.

Se pune problema care este relația între transformările termice particulare. Există o succesiune a fenomenelor termice de tip încălzire, topire, vaporizare. Aceasta este ideală și neaplicabilă pentru iradierea cu fascicol laser. Se va face distincție între încălzirea progresivă în material ca condiție pentru obținerea transformărilor termice particulare și acestea. Transformările termice particulare se consideră a fi independente și simultan susținute de sursa termică.

În contextul celor anterior arătate se introduce transformarea termică integrală ca efectul compus al transformărilor termice particulare. Prin transformare termică integrală se înțelege o transformare similară unei transformări de stare de agregare produsă de fenomene fizice diferite (de natură termică). Condiția de compunere o reprezintă ca fenomenele fizice care intervin să nu producă o schimbare puternică a densității materialului. Vom avea următoarea relație

$$q = \rho \left(\sum_x L_x \right) u \quad (2.36)$$

unde $L_I = \sum_x L_x$ (2.37) reprezintă căldura latentă integrală

Se menționează următoarele transformări termice integrale:

- încălzirea materialului la temperatura de topire urmată de topire
- încălzirea materialului la temperatura de topire urmată de topire urmată de mișcarea topiturii
- încălzirea materialului la temperatura de vaporizare însoțită de topire, mișcarea topiturii și vaporizare
- încălzirea materialului la temperatura de descompunere chimică urmată de descompunerea chimică a acestuia

Transformările termice integrale pot fi definite complet, luând în considerare toate fenomenele termice care au loc sau numai o parte din acestea.

Asupra transformării termice integrale se pun următoarele condiții:

- densitatea materialului să fie aproape constantă în transformările particulare care au loc. Acest lucru este necesar pentru a putea aplica formula (2.26). Din acest motiv nu se poate asocia fenomenele care au loc în faza de vapori și plasmă cu cele care au loc în stare lichidă și solidă.
- Fenomenele considerate să fie limitate de o anumită temperatură. Se asigură astfel similitudinea cu caracterul izoterm al transformărilor de stare de agregare.

Considerarea transformărilor termice integrale este un instrument important în evaluarea energiei necesare pentru ca un anumit proces tehnologic să aibă loc.

Pentru a evalua fenomenele termice trebuie cunoscute constantele de material. Materialul folosit în experimentări fiind oțel cu conținut relativ scăzut de carbon s-au cunoscute constantele de material fiind cele date pentru fierul pur. Căldura latentă pentru corespunzătoare unui proces de încălzire simultană, termenul $c \cdot \Delta T$ nu poate fi cu succes evaluat la modul general deoarece valorile căldurii specifice depind puternic de temperatură. S-a introdus ca reper evaluarea căldurii latente pentru transformări termice integrale care iau în considerare încălzirea simultană alături de topire sau vaporizare. Astfel în ordinea creșterii căldurii latente integrale se obțin trei transformări de fază compuse succesive (transformări de fază integrale), acestea sunt prezentate în tabelul 2.6.

Tabel 2.6 Căldurile latente integrale pentru transformările de fază pentru Fe

Fenomenul	simbol	Căldura latentă integrală pentru Fe[J/g]
Încălzire plus topire	L_0	2396
Încălzire , topire , încălzirea topiturii la temperatura de vaporizare	L_1	$2396+0.46(2750-1533)=2956$
Încălzire , topire , încălzirea topiturii la temperatura de vaporizare, vaporizare	L_2	$L_2 = L_1 + L_v = 2956+7106=10062$

Valoarea L_0 este cunoscută și sub denumirea de conținutul de căldură. Valoarea acesteia a fost introdusă după [Drăgănescu, 1986]. S-au folosit pentru căldura latentă de vaporizare o valoare de 7106 J/g iar pentru căldura specifică valoarea 0.46 J/g·grad, valoare după [Paicu, 2006]. Această valoare este dată pentru o temperatură în apropierea temperaturii de topire. Nu considerăm util ca să considerăm topirea o transformare de fază separată de încălzirea la temperatura de topire. La topire căldura latentă echivalentă necesară pentru a aduce metalul la temperatura de topire este mult mai mare decât căldura latentă de topire. Aceasta face ca să nu fie realist considerarea separată a topirii. În cazul vaporizării căldura latentă necesară aducerii la temperatura de vaporizare este mai mică decât căldura latentă de vaporizare. Considerarea separată a vaporizării este astfel mai plauzibilă decât cea a topirii, deși și în acest caz se pierde o parte din realitate. Ideea de reținut este că topirea și vaporizarea nu pot fi tratate similar în formularea problemelor termice. În tabelul următor sunt prezentate constantele termice pentru câteva metale a căror utilizare este frecventă în sudarea laser.

Pe baza celor anterior arătate se poate prezenta fenomenele fizice care au loc la iradierea cu fascicol laser:

- **Încălzirea materialului.** Încălzirea materialului este progresivă și este caracterizată de propagarea frontului de încălzire în material

$$u_h = \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (2.38)$$

- **Transformarea termică integrală.** Transformarea termică integrală desemnează mai multe fenomene fizice a căror efect este similar cu cel al unei transformări de stare de agregare (în particular topirea metalului. Ea este dată de relația:

$$q = \rho L_f u \quad (2.39)$$

Legătura dintre cele două tipuri de fenomene termice este următoarea: o transformare termică integrală nu se poate propaga în material cu o viteză mai mare decât viteza frontului de încălzire.

Această afirmație face ca în relația anterioară (pentru ca ea să rămână valabilă) căldura latentă integrală să fie considerată o variabilă. Variația căldurii latente integrale are la bază schimbarea calitativă a fenomenelor care constituie transformarea termică integrală.

Se explică astfel de ce atunci când creștem intensitatea fascicolului laser nu obținem proporțional o creștere a topituri ci obținem vapori, plasmă ablaarea materialului. Creșterea densității de flux termic duce către fenomene termice care au o căldură latentă integrală mai ridicată în detrimentul vitezei de propagare a lor în material.

Variația căldurii latente pentru o transformare termică particulară nu intervine în cazul în care densitatea de flux termic permite menținerea unei viteze de propagare u mai mică decât cea a frontului de încălzire. Importanța acestor transformări termice scade pe măsura scăderii vitezei de propagare a frontului de transformare deoarece ele penetrează puțin în material. Astfel fenomenele termice care se produc la iradierea cu fascicol laser se împart în fenomene termice la suprafață și fenomene termice care penetrează în material. O transformare termică care necesită o căldură latentă mai mare se va propaga în material cu o viteză mai mică la aceeași densitate de flux termic. Important este să considerăm că în relația $q = \rho \cdot L \cdot u$ sunt trei mărimi fizice care pot varia: densitatea de flux termic, căldura latentă și viteza de propagare a frontului de transformare termică.

Există două metode de abordare asupra fenomenelor fizice care au loc la iradierea cu fascicul laser:

- Cunoașterea fenomenelor fizice care au loc. Aceasta înseamnă stabilirea unor transformări termice particulare și integrale cu căldură latentă cunoscută. Ele trebuie să fie dovedite experimental și să se cercetează legătura dintre densitatea de flux termic q și viteza u .
- Nu se cunosc exact fenomenele termice care au loc, însă se consideră că acestea constituie o singură transformare de fază integrală. Se urmărește predicția căldurii latente integrale și apoi comparația și asocierea ei cu fenomene termice cunoscute. Căldura latentă în acest caz va fi numită căldura latentă integrală medie $L_{I\text{med}}$

În ambele cazuri este interesant cazul în care transformarea termică se propagă în material cu viteza maximă și anume cu viteza de încălzire.

Cazul cel mai întâlnit la sudarea metalelor consideră topirea ca transformare integrală (încălzire la temperatura de topire și topire) și vaporizarea ca transformare de fază particulară. Pentru aceste situații se calculează densitate de flux termic q_M și q_V care asigură propagarea frontului de transformare de fază cu viteza de încălzire, altfel spus încălzirea este utilizată complet în transformarea de fază. Se consideră că transformările de fază se propagă în material cu viteza maximă și anume viteza de încălzire. Aplicând relațiile anterioare vom avea:

- Pentru transformarea de fază integrală - încălzire la temperatura de topire și topire

$$q_M = \rho L_0 \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (2.40)$$

- Pentru transformarea de fază particulară - vaporizarea

$$q_V = \rho L_v \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (2.41)$$

Aplicații ale formulilor anterioare pentru două valori arbitrare ale timpului de interacțiune sunt prezentate în tabelul 2.7. Se constată că pentru majoritatea metalelor analizate este necesară utilizarea unei densități de flux termic mai ridicate pentru propagarea la viteză maximă a frontului de vaporizare decât a frontului de topire.

Tabel 2.7 Calculul densităților de flux termic pentru propagarea frontului de topire considerată ca transformare de fază integrală și vaporizare considerată ca transformare de fază particulară la timpii de interacțiune de 1 ms și 100 ms

metal	ρ [g/cm ³]	a [cm ² /s]	L_v [j/g]	Conținutul de căldură L_0 [j/g]	q_M [10^5 W/cm ²] t=1ms	q_V [10^5 W/cm ²] t=1ms	q_M [10^5 W/cm ²] t=100ms	q_V [10^5 W/cm ²] t=100ms
Al	2.7	0.87	1052	2697	2.147	0.837	0.214	0.083
Cu	8.96	1.12	4790	1433	4.296	14.363	0.429	1.436
Fe	7.87	0.2	7106	2396	2.666	7.908	0.266	0.790
Sn	5.765	0.387	2383	711	0.806	2.702	0.080	0.270
Ti	4.5	0.06	3650	2595	0.904	1.272	0.090	0.127

Asupra transformărilor termice care au loc în material se formulează următoarele alternative teoretice:

- fixarea timpului referitor numai la procesul de încălzire și a transformării termice prin căldura latentă conduce la definirea de mai multe surse termice. Laserul ca sursă principală și alte surse secundare în material (ex. topitura). Legătura dintre acestea va fi arbitrară sau realizată pe alte baze (experimentale). Aceasta înseamnă urmărirea unei transformări de fază, de exemplu topirea, în mod exclusiv ignorând restul fenomenelor

- fixarea prin condiții experimentale a densității de flux termic și a timpului de interacțiune și determinarea unei călduri latente integrale medii de a caracteriza o transformare de fază integrală.

Altfel spus se consideră variația căldurii latente generate de variația prin parametrii experimentali a densității de flux termic și a timpului de interacțiune. Pe această abordare este recomandată și va fi utilizată în cele ce urmează. O parte din constantele termice utile în calcule sunt prezentate în tabelul 2.8.

Tabel 2.8 Constante fizice pentru metale, utilizate la descrierea proceselor de încălzire și transformare de fază după [Drăgănescu, 1986]

metal	ρ [g/cm ³]	L_m [j/g]	L_v [j/g]	T_M [°C]	T_V [°C]	k [W/(cm°C)]	a [cm ² /s]	C la 20°C [j/(g °C)]
Al	2,7	395	1052	660	2467	2.09	0,87	0,896
Cu	8,96	213	4790	1083	2595	3.89	1.12	0,383
Fe	7,87	274	7106	1533	2750	0.73	0.2	0,465
Sn	5,765	59,5	2383	232	2270	0.64	0.387	0,226
Ti	4,5	435,4	3650	1700	3250	0.15	0.06	0,528
Zn	7,13	101	1779	420	906	1.12	0.4	0,384

Diferențierea între efectul transformărilor de fază produse în material la densitate de flux termic constantă este dată viteza de propagare a frontului de transformare de fază. Transformarea de fază care se propagă cu viteza cea mai mare în material va avea efectul cel mai vizibil. Se identifică următoarele două situații extreme pe baza relației $q = \rho \cdot L \cdot u$

- transformarea termică cu căldura latentă cea mai mică și viteza cea mare de propagare în material ;

$$q = \rho L_{\min} u_{\max} \quad (2.42)$$

unde

$$u_{\max} = \sqrt{\frac{a}{t}} \text{ cu } t = 10^{-8} \text{ s} \quad (2.43)$$

Timpul de interacțiune se consideră cel mai mic posibil pentru care poate fi aplicată teoria termică (ecuației căldurii la încălzirea materialului) Mărimile termice (temperatura, căldura) sunt obținute în urma unor medieri și nu sunt aplicabile pentru timpi de interacțiune oricât de mici.

- transformarea termică cu căldura latentă cea mai mare și viteza cea mai mică de propagare în material

$$q = \rho L_{\max} u_{\min} \quad (2.44)$$

Viteza u_{\min} se stabilește arbitrar. Spre exemplu se consideră viteza necesară ca în timpul de interacțiune dintre laser și material frontul de transformare de fază să avanseze în material pe o distanță de 10% din diametrul fascicolului laser. O astfel de transformare de fază are un efect nesemnificativ. Transformările de fază cu căldura latentă mică sunt încălziri uniforme la o diferență de temperatură mică iar

cele cu căldura latentă mare sunt vaporizare cu mișcarea vaporilor și sublimare. Constantele fizice utilizate în calcule sunt prezentate în tabelul 2.8.

2.6 Predicția regimurilor de sudare pe baza căldurii latente integrale

În practică se constată că pentru o anumită densitate de flux termic și pentru un anumit timp de interacțiune se întreține în material o anumită transformare termică. Problema este cu totul diferită de cea de la încălzire deoarece densitatea de flux termic este legată de viteza de propagare a frontului de transformare termică și nu direct de timpul de interacțiune. În realitate transformările termice se suprapun. Caracterizarea lor ca fenomene izoterme nu este suficientă. Spre exemplu la temperatura de vaporizare poate avea loc vaporizarea sau energia primită să fie consumată în mișcarea topiturii. Pe de altă parte temperatura nu este constantă în zona de interacțiune. Avem astfel pentru o densitate de flux termic dată mai multe transformări termice posibile sau „concurrente pe același domeniu al densității de flux termic”. Dintre acestea cea mai vizibilă (cu efect) este cea care se desfășoară cu viteza cea mai mare. Sudarea în regim keyhole este tipică pentru această situație deoarece are loc la densități de flux termic suficiente pentru a realiza vaporizarea materialului însă efectul principal înregistrat este topirea materialului fără de care sudarea nu ar fi posibilă.

Se pune problema de a aprecia care dintre transformările de fază care au loc. Soluția abordată în alte lucrări [Semak, 1997] este de a considera că anumite părți (exprimate în procente) din densitatea de flux termic susțin fiecare o anumită transformare de fază (limitate la încălzirea sub temperatura de topire care poate fi numită generic conducție, topire și vaporizare). Această divizare a densității de flux termic conform cuplajului energetic nu explică de ce faza asupra căreia o parte mică din densitatea de flux termic are de fapt un efect puternic. Se va considera această abordare eronată și se va considera ca densitatea de flux termic nu se divide, fiecare transformare termică beneficiază de aceeași densitatea de flux termic, căldura latentă fiind cea care determină viteza de propagare a frontului transformării termice. Timpul de interacțiune limitează penetrarea în material a transformării termice.

Pentru condițiile în care s-au realizat experimentările se propune calculul limitelor domeniului în care poate varia căldura latentă. Aceasta înseamnă o selecție a transformărilor de fază prin faptul că există o transformare de fază cu căldura latentă minimă L_{min} și una cu căldura latentă maximă L_{max} care pot fi întreținute în material. L_{min} descrie transformarea termică care se propagă în material cu viteza cea mai mare care poate fi asigurată de încălzirea materialului la timpul de interacțiune cel mai scurt caracteristic proceselor termice. (Se include astfel ipoteza că încălzirea are loc continuu). L_{max} descrie transformarea termică care se propagă în material cu viteza cea mai mică. Aceasta este stabilită arbitrar considerând situația în care distanța pe care frontul de transformare de fază pătrunde în material în timpul de interacțiune dat este neglijabilă. Nu există o identificare practică precisă a transformărilor termice cu căldurile latente L_{min} și L_{max} (ca de altfel și a celor cu călduri latente intermediare între cele două). Se face totuși o asociere intuitivă, astfel L_{min} va reprezenta o încălzire simultană cu o diferență de temperatură constantă de tip $c\Delta T$ iar L_{max} va reprezenta un fenomen energetic superior (formarea de plasmă ionizată) sau topirea și/sau vaporizarea materialului cu puternica mișcare a topiturii. Determinarea pe baze experimentale a temperaturii

suprafeței și a mișcării topiturii poate duce la identificarea și definirea corectă a transformărilor termice care au loc.

Se consideră că în material este absorbită la un moment dat 10% din intensitatea fascicolului laser sub forma densității de flux termic q . Aceasta se regăsește sub forma unei densități de flux termic constant în material folosită exclusiv în realizarea transformărilor de fază. Vom avea relația :

$$L_{\min} = \frac{q}{\rho u_{\max}} \leq L \leq \frac{q}{\rho u_{\min}} = L_{\max} \quad (2.45)$$

unde

$$u_{\max} = \sqrt{\frac{a}{t}} \text{ cu } t = 10^{-8} \text{ s} \quad (2.46)$$

iar u_{\min} = arbitrar (referitor la o distanță minimă)

S-au folosit următoarele valori calculate $u_{\max} = 0.4472 \cdot 10^4$ cm /s (pentru oțel pe baza relației anterioare) $u_{\min} = 6 \cdot 10^{-3}$ cm /s (considerată în cazul în care transformarea de fază se propagă pe o distanță de 1/10 din diametrul fascicolului laser timp de 100 ms). Rezultatele calculelor sunt prezentate în tabelul 2.9.

Tabel 2.9 Transformările de fază cu căldura latentă minimă și maximă care pot fi susținute de intensitatea laserului pentru condițiile de sudare din planul experimental

sudura	Intensitatea $\times 10^5$ W/cm ²	Lmin la 10% I [J/g] $\times 10$	Lmax la 10% I [J/g] $\times 10^5$	sudura	Intensitatea $\times 10^5$ W/cm ²	Lmin la 10% I [J/g] $\times 10$	Lmax la 10% I [J/g] $\times 10^5$
1	1.76	0.5	3.72	21	0.54	0.153	1.14
2	3.53	1.002	7.47	22	1.09	0.309	2.3
3	5.3	1.505	11.22	23	1.63	0.463	3.45
4	8.84	2.511	18.72	24	2.72	0.772	5.76
5	10.61	3.014	22.46	25	3.27	0.929	6.92
6-10	7.07	2.008	14.97	26-30	2.18	0.619	4.61
11	0.9	0.255	1.9	31	3.53	1.002	7.47
12	1.8	0.511	3.81	32	10.61	3.014	22.46
13	2.7	0.767	5.71	33	1.8	0.511	3.81
14	4.51	1.281	9.55	34	5.41	1.537	11.45
15	5.41	1.537	11.45	35,36	4.91	1.395	10.39
16-20	3.6	1.022	7.62	37	2.45	0.696	5.18

Calculule anterioare arată că transformările de fază integrale care pot apărea la iradierea cu laser pot avea călduri latente cuprinse între 1 J/g și 10^6 J/g. Ea este o aproximare prea largă pentru a da rezultate utile. Valoarea minimă poate fi interpretată ca încălzire uniformă cu 2 °C. Interpretarea valorii maxime este dificilă ea descrie o transformare de fază integrală cei 10^6 J/g sunt repartizații în formarea de topitură vapori și mișcarea acestora. Se poate pe baza unor date experimentale identificarea părții din căldura latentă implicată în formarea de topitură și /sau

vapori respectiv plasmă , respectiv mișcarea acestora. Considerarea că întreaga căldură latentă integrală ar fi consumată la creșterea temperaturii sau la inducerea unei tensiuni în material va da rezultate eronate. Se pot lua în considerare diferite restricții ale domeniului căldurilor latente care să restrângă domeniul transformărilor de fază ajutând astfel la definirea lor.

Tabel 2.10 Calculul căldurii latente integrale pentru intensitățile laserului și timpii de interacțiune folosiți în experimente.

Sudura	Intensitatea I [10^5 W/cm ²]	Timpul de interacțiune t _{is} [ms]	$\sqrt{\frac{a}{t_{is}}}$	$L_{I\ med}$ La 10%I [j/g]	Sudura	Intensitatea I [10^5 W/cm ²]	Timpul de interacțiune t _{is} [ms]	$\sqrt{\frac{a}{t_{is}}}$	$L_{I\ med}$ La 10%I [j/g]
1	1.76	60	1.82	1224	21	0.54	108	1.36	504
2	3.52	60	1.82	2449	22	1.09	108	1.36	1017
3	5.29	60	1.82	3681	23	1.63	108	1.36	1521
4	8.81	60	1.82	6131	24	2.72	108	1.36	2539
5	10.58	60	1.82	7363	25	3.27	108	1.36	3053
6	7.05	240	0.91	9813	26	2.18	432	0.68	4071
7	7.05	120	1.29	6938	27	2.18	216	0.96	2878
8	7.05	60	1.82	4906	28	2.18	108	1.36	2035
9	7.05	40	2.23	4006	29	2.18	72	1.66	1662
10	7.05	24	2.88	3103	30	2.18	43.2	2.15	1287
11	0.89	84	1.54	732	31	3.53	24	2.88	1553
12	1.79	84	1.54	1474	32	10.61	24	2.88	4670
13	2.69	84	1.54	2215	33	1.8	33.6	2.43	937
14	4.49	84	1.54	3697	34	5.41	33.6	2.43	2817
15	5.39	84	1.54	4438	35	4.91	43.2	2.15	2899
16	3.59	336	0.77	5912	36	4.91	43.2	2.15	2899
17	3.59	168	1.09	4180	37	2.45	43.2	2.15	1446
18	3.59	84	1.54	2956					
19	3.59	56	1.88	2413					
20	3.59	33.6	2.43	1869					

O soluție alternativă la abordarea anterioară o reprezintă considerarea unei singure transformări termice integrală caracterizată de căldura latentă integrală medie $L_{I\ med}$. Aceasta consideră o transformare termică integrală ipotetică care se propagă cu viteză maximă în material în condițiile densitate de flux termic și timp de interacțiune date. Căldura latentă integrală medie se calculează din relația:

$$q = \rho L_{I\ med} \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (2.47)$$

Se ca folosii timpul de interacțiune t_{is} definit Capitolul 3. Aceasta definește transformarea de fază care se propagă în material cu viteza de încălzire a acestuia , generată de timpul de interacțiune dintre laser și material. Aceasta este transformarea termică care este cel mai probabil să fie observată. Calcule pentru

căldura latentă optimă referitor la condițiile de iradiere utilizate în experimente sunt prezentate în tabelul 2.10:

Valorile obținute pentru căldura latentă integrală medie se află peste căldura latentă de topire. Relativ la conținutul de căldură (căldura latentă necesară topirii și aducerii la temperatura de topire) și cea de vaporizare, (fenomene care au avut loc în cazurile respective), acestea apar puternic subevaluate. Ea descrie fidel aspectul global al fenomenelor care au loc, considerând o singură transformare termică în toată zona de interacțiune. Aspectul cel mai important este acela că va da regimul de sudare. Prin comparația valorilor din tabel cu identificarea regimurilor de sudare pe sudurile realizate s-a observat că o valoare peste 1500 J/g va da un regim de sudare keyhole iar una sub această valoare va da un regim de conducție. Această căldură latentă integrală nu poate fi comparată cu cea reală care apare în transformările termice (de stare de agregare). Calculul căldurii latente integrale medii aduce informații și asupra zonelor influențate termic. Valori reduse ale căldurii latente integrale optime pot fi legate direct de zone influențate termic reduse.

2.7 Model analitic de predicție a zonei topite

În cele ce urmează se va propune un model care să prezică profunzimea sudurii h_z pe baza considerării penetrării frontului de topire în material. Modelul dorește a fi general pentru procesele de sudare are însă dezavantajul că nu consideră rolul în penetrare al vaporizării materialului. Ignorarea vaporizării este justificată deoarece în sudarea în regim keyhole ea are rolul de a împingea frontului de topire în material. Pe de altă parte verificarea experimentală este se efectuează mult mai ușor la caracteristicile (profunzimea) zonei topite prin analiza sudurii. Densitatea de flux termic ridicată explică penetrarea frontului de topire în material. Modelul considerat dorește să estimeze pătrunderea topiturii în material pornind de la densitatea de flux termic și timpul de interacțiune. Ambele sunt considerate relativ la suprafața materialului. Transformarea de fază considerată este topirea materialului. Aceasta este caracterizată de căldura latentă integrală sau conținutul de căldură 2396 J/g [Drăgănescu, 1986]. Se consideră că 10 % din intensitatea fascicolului laser este cuplată pentru obținerea topiturii. Aceasta este desemnată prin densitatea de flux termic q . Se consideră că transformarea de fază are loc în material într-o simetrie cilindrică dată de relația $q = \rho \cdot L \cdot u$.

Procedura de calcul are două etape :

- pe baza formulei $q = \rho \cdot L \cdot u$ se calculează viteza frontului de topire u_m

$$u_m = \frac{q}{\rho L_0} \quad (2.48)$$

- Se calculează penetrarea frontului de topire după relația

$$h_z = u_m \cdot t_{is} \quad (2.39)$$

Modelul propus consideră ca variabile de intrare densitatea de flux termic q și timpul de interacțiune t_{is} . Acestea sunt folosite independent în predicția

funcției de ieșire h_z . Astfel densitatea de flux termic determină viteza de propagare a frontului de topire.

Tabel 2.11 Calcule pentru profunzimea calculată a sudurii h_z și comparații cu profunzimea măsurată h

sudura	Densitatea de flux termic $q(10\%I)$ [W/cm ²] $\times 10^4$	Timpul de interacțiune t_{is} [ms]	u_m cm/s	Profunzimea h [mm]	Profunzimea calculată h_z [mm]
1	1.76	60	0.933	0.2	0.56
2	3.52	60	1.866	1.3	1.12
3	5.29	60	2.805	2.77	1.68
4	8.81	60	4.672	4.50	2.8
5	10.58	60	5.61	5.29	3.36
6	7.05	240	3.738	6.26	8.97
7	7.05	120	3.738	4.78	4.48
8	7.05	60	3.738	3.99	2.24
9	7.05	40	3.738	3.16	1.49
10	7.05	24	3.738	2.86	0.89
11	0.89	84	0.471	0.25	0.39
12	1.79	84	0.949	0.5	0.79
13	2.69	84	1.426	2.18	1.19
14	4.49	84	2.381	4	2
15	5.39	84	2.858	5	2.4
16	3.59	336	1.903	5.43	6.39
17	3.59	168	1.903	4.18	3.19
18	3.59	84	1.903	3.45	1.59
19	3.59	56	1.903	2.89	1.06
20	3.59	33.6	1.903	2.62	0.63
21	0.54	108	0.286	1.32	0.3
22	1.09	108	0.578	0.37	0.62
23	1.63	108	0.864	1.65	0.93
24	2.72	108	1.442	3.84	1.55
25	3.27	108	1.734	4.59	1.87
26	2.18	432	1.156	4.81	4.99
27	2.18	216	1.156	3.21	2.49
28	2.18	108	1.156	2.53	1.24
29	2.18	72	1.156	2.27	0.83
30	2.18	43.2	1.156	1.62	0.49
31	3.53	24	1.872	0.7	0.44
32	10.61	24	5.626	4.58	1.35
33	1.8	33.6	0.954	0.3	0.32
34	5.41	33.6	2.869	3.28	0.96
35	4.91	43.2	2.603	3.15	1.12
36	4.91	43.2	2.603	3.00	1.12
37	2.45	43.2	1.299	1.94	0.56

Timpul de interacțiune intervine ca factor de limitare a acțiunii vitezei de propagare a frontului de topire. Această abordare este în acord cu rezultatele experimentale. Astfel densitatea de flux termic q conține dependența de putere (la care se adaugă și defocalizarea) iar timpul de interacțiune conține exclusiv efectul vitezei de sudare. S-a considerat că densitatea de flux termic reprezintă 10% din intensitatea fascicolului laser. Transformarea de fază este considerată independent de fenomenul de încălzire și de alte transformări de fază.

Verificarea modelului a fost realizată pe baza rezultatelor experimentale prezentate în Capitolul 3. Aprecierea rezultatelor s-a efectuat prin compararea valorii profunzimii măsurate h cu cea a profunzimii calculate h_z . Calculele realizate sunt prezentate în tabelul 2.11.

Pentru sudurile realizate s-a măsurat profunzimea sudurii h . Aceasta a fost comparată cu cea prezisă de model. Forma variației profunzimi măsurate și a celei calculate cu puterea fascicolului laser și cu viteza de sudare este de același tip pentru toate cele trei valori ale defocalizării.

Modelul propus a arătat că profunzimea calculată urmează același tip de variație ca și cea măsurată. S-a arătat că pentru variația profunzimii calculate pot fi folosite același tip de funcții de regresie ca și pentru cea măsurată. Verificarea modelului constă în tipul variației.

2.8 Concluzii

În Capitolul 2 a fost realizată o abordare teoretică asupra fenomenelor termice care au loc la iradierea cu fascicul laser a metalelor. S-a prezentat un cadru teoretic care permite formularea generală a problemelor termice. Acesta a avut la bază lucrarea [Jannot, 2003] pentru partea de transfer termic general și specific pentru iradierea cu fascicul laser lucrările [Chryssoulis, 1991] și [Mattei, 2003]. Problemele termice abordate în Capitolul 2 au fost abordate de autor și în alte studii. Astfel în lucrările [Boboescu, 2009 g] și [Boboescu, 2009 h] s-au abordat separat fenomenul de încălzire respectiv transformare de fază în material. Un model termic cu aplicabil pentru sudarea laser a fost prezentat în [Boboescu, 2007 b]. Principalele teme abordate în Capitolul 2 sunt după cum urmează:

- Efectul produs de fasciculul laser asupra materialelor metalice este identificat cu o sursă termică aflată la suprafața piesei. Există o relație de proporționalitate între intensitatea fascicolului laser și densitatea de flux termic a sursei termice. Distribuția densității de flux termic a sursei termice urmează variația în timp și spațiu a intensității fascicolului laser.
- Fasciculul laser produce două tipuri de fenomene termice distincte: încălzirea materialului asociată cu variația progresivă a temperaturii în material și transformarea de stare de agregare a materialului asociată cu un proces izoterm. Caracterul izoterm al transformării de stare de agregare permite generalizarea considerațiilor legate de aceasta pentru o clasă largă de fenomene fizice numite transformări termice.
- Încălzirea materialului presupune formularea unei probleme termice. S-a formulat problema termică cu densitate de flux constantă la suprafața materialului pentru un mediu semiinfinit și propagare a căldurii unidimensional în profunzimea materialului. Acest caz este specific pentru iradierea cu fascicul laser a metalelor și o sursă termică extinsă. Încălzirea materialului se exprimă prin legătura între densitatea de flux termic, timpul de interacțiune și temperatura la suprafața piesei. Ca probleme termice particulare se remarcă

distanța de penetrare a căldurii în material și viteza de propagare a frontului de încălzire în material.

- Transformările termice se definesc ca fenomene fizice la care participă un volum dat de material. Materialul transformat are o simetrie cilindrică. Transformările termice sunt caracterizate prin relația care leagă densitatea de flux termic de căldura latentă și de viteza de propagare a frontului de transformare de fază. Transformările termice de interes pentru sudarea laser în regim keyhole a metalelor sunt topirea și vaporizarea materialului. Se arată necesitatea corelării vitezei de propagare a frontului de transformare termică în material cu viteza de încălzire a materialului.
- Definierea transformărilor termice integrale și particulare crează bazele pentru înțelegerea fenomenelor care au loc la iradierea cu fasciol laser. Se prezintă topirea materialului ca transformare termică integrală care ia în considerare căldura necesară pentru aducerea materialului la temperatura de topire și căldura latentă de topire în antiteză cu obținerea topirii ca rezultat al unui fenomen termic de încălzire prin atingerea temperaturii de topire la suprafața metalului. Se propune un model care arată penetrarea sudurii pe baza propagării frontului de topire în material.
- Asocierea unei călduri latente variabile cu o ipotetică transformare termică integrală conduce la o asociere a condițiilor de iradiere date de intensitatea fascicolului laser și timpului de interacțiune cu căldura latentă. Se remarcă un domeniu de variație al căldurii latente care limitează calitativ fenomenele fizice care au loc în material la iradiere. Introducerea unei călduri latente integrale medii asociată cu condițiile de iradiere arată care sunt fenomenele fizice care au efectul cel mai mare și astfel pot fi separate regimurile de sudare.
- Regimul de sudare prin conducție apare odată cu obținerea propagării frontului de topire în material. Propagarea frontului de vaporizare în material duce la obținerea regimului de sudare keyhole. Separarea regimurilor de sudare se realizează prin nivelul densității de flux termic.

În Capitolul 2 s-au pus în evidență următoarele aspecte de interes fenomenologic asupra fenomenelor fizice care au loc la iradierea cu fasciol laser a metalelor:

- Exprimarea condițiilor de iradiere a materialului prin densitatea de flux termic și prin timpul de interacțiune.
- Corelarea directă a intensității fascicolului laser cu densitatea de flux termic a unei surse termice aflate la suprafața materialului.
- Considerarea producerii simultane a mai multor fenomene fizice ca efect al iradierii întreținute termic și considerate fenomene fizice izoterme.
- Prezentarea unor criterii și metode de selecție transformărilor termice semnificative din punct de vedere cantitativ cu aplicație directă la separarea regimurilor de sudare conducție și keyhole.

În Capitolul 2 s-au pus în evidență următoarele aspecte de interes tehnologic asupra procesului de sudare:

- Modelul simplificat elaborat de autor este compatibil din punct de vedere calitativ evidențiată prin cercetările experimentale și corelațiile realizate.
- Introducerea și aplicarea conceptului de căldură latentă integrală crează premise favorabile pentru proiectarea procesului tehnologic de sudare laser pe considerații științifice în abordarea termică a proceselor de sudare.

Cele prezentate în Capitolul 2 lasă următoarele perspective de cercetare :

- Aplicarea relațiilor prezentate pentru condiții experimentale variate folosite în alte studii în scopul verificării și ajustării modelării analitice.

- Proiectarea unor cercetări experimentale care să arate exact propagarea frontului de vaporizare în material

Importanța științifică a rezultatelor prezentate în Capitolul 2 constă în exprimarea prin relații simple a unor dependențe importante. Acestea sunt utile la proiectarea cercetării experimentale la nivelul corelației între condițiile experimentale și obiectivele propuse. Domeniul de studiu a efectelor termice produse la iradierea cu fascicol laser respectiv alte surse termice concentrate este un domeniu larg. Studiul prezentat în Capitolul 2 realizează o abordare transversală a domeniului însoțite de structurare și generalizare. Prin introducerea unor ipoteze cu caracter foarte general se obține eficiență în înțelegerea fenomenelor fizice produse la iradierea cu fascicol laser. Acest nivel de abordare teoretică nu poate fi atins prin abordări restrictive. Conținutul Capitolului 2 oferă un sprijin important în înțelegerea cercetărilor în domeniul prelucrării cu fascicol laser a materialelor.

3. Cercetări experimentale

3.1 Obiective fenomenologice și tehnologice ale experimentelor

Cercetarea experimentală realizată a avut ca scop prioritar studiul regimului de sudare keyhole. Pentru aceasta au fost realizate linii de fuziune (suduri) pe plăci de oțel cu grosime de 10mm. Acestea vor fi numite în cele ce urmează suduri sau cordoane sudate. S-a urmărit ca sudura să nu penetreze complet placa pentru a putea măsura adâncimea de penetrare și a urmării profilul zonei resolidificate obținute în material. A fost studiată variația a trei parametrii (puterea medie a fascicolului laser, viteza de sudare, poziția punctului focal al fascicolului laser față de suprafața piesei).

Din punct de vedere fenomenologic liniile de fuziune realizate permit abordarea următoarelor probleme:

- Identificarea regimului de sudare prin caracteristicile zonei topite și resolidificate a sudurii: lățimea sudurii, profunzimea sudurii, raportul dintre lățimea și profunzimea sudurii, aria zonei topite.
- Obținerea de informații despre fenomenul de vaporizare și despre curgerea topiturii în baia de sudare prin incluziunile de gaz prinse în sudură prin analiza formei secțiunii transversale a sudurii (pentru regimul de sudare keyhole).
- Posibilitatea achiziționării unor informații suplimentare care caracterizează regimul de sudare prin studiul suprafeței sudurilor. Astfel se studiază forma valurilor (undelor solide) la suprafața sudurii și supraînălțarea sudurii în raport cu suprafața piesei. La sfârșitul procesului de sudare are loc o întrerupere bruscă a iradierii, se obține un crater numit craterul final. Acesta reflectă rezultatul combinat al vaporizării și mișcării topiturii. Craterul este o cavitate macroscopică care se obține în urma procesului de sudare. Există astfel posibilitatea efectuării unor comparații între crater și keyhole, cavitate care apare și dispare în timpul procesului de sudare. Pe de altă parte forma craterului o urmează pe cea a băii de sudare. În lucrare au fost studiate forma, dimensiunile și adâncimea acestui crater.
- Examinarea zonei afectate termic și transformările metalografice din sudură și din zona de tranziție sudură - material de bază și eventuala corelare a informațiilor dobândite. Un obiectiv de studiu important este ca o parte din mărimile care caracterizează sudura să fie corelate cu parametrii de proces.

Investigarea sudurilor urmărește abordarea următoarelor aspecte care pot fi asociate cu obiective tehnologice:

- Studiul cantității de topitură care se produce în anumite condiții de iradiere arată capacitatea de fascicolului laser de a realiza suduri cu o anumită penetrare. Penetrarea sudurii poate fi folosită pentru proiectarea unui proces de sudare real prin alegerea grosimii pieselor și a materialului de adaos astfel încât să se obțină o topire completă a acestora.
- Porozitățile prinse în sudură determină calitatea sudurii influențând caracteristicile de rezistență mecanică. Observarea calitativă și cantitativă a

porozităților oferă posibilitatea stabilirii dacă parametrii aleși conduc la o sudură de calitate corespunzătoare.

- Suprafața sudurii prezintă importanță ca aspect. Suprafața sudurilor arată cazurile în care parametrii folosiți au condus la o suprafață uniformă care nu prezintă ridicături și instabilități. Ridicăturile și instabilitățile de pe suprafață se asociază cu porozitățile și instabilitățile din interiorul sudurii și astfel există o nouă modalitate de predicție rapidă asupra rezultatului procesului de sudare.

- O problemă tehnologică importantă o reprezintă evoluția procesului într-un regim stabil. O caracteristică a acestei stabilități o reprezintă supraînălțarea. La începutul procesului de se produce o ridicătură pe suprafața materialului pe măsură ce iradierea avansează se produce scăderea supraînălțării. Aceasta se datorează preîncălzirii piesei care favorizează penetrarea sudurii. Piesele iradiate în cadrul experimentărilor fiind groase această stabilitate s-a obținut după o distanță semnificativă de la începerea procesului de sudare.

Regimul de sudare keyhole prezintă un interes tehnologic puternic prin creșterea penetrării sudurii. Pe de altă parte există interesul fenomenologic în ceea ce privește fenomenele de topire, vaporizare și curgere a topiturii. În general cele două abordări se desfășoară pe planuri diferite. Explicația acestui lucru constă în studiul unor aspecte de amănunt cum ar fi mișcarea topiturii sau a vaporilor în baia de sudare, transformările metalului la interfața cu zona resolidificată etc. Este dificil de corelat cu parametrii de proces. Pentru a împiedica această abordare pe planuri diferite trebuie făcută o încadrare în timp și spațiu a aspectelor de amănunt. Astfel trebuie excluse din studiu acele fenomene care au o variație prea rapidă sau se desfășoară pe distanțe prea mici. De asemenea se va da importanță numai acelor fenomene care produc efecte asupra zonei resolidificate a sudurii.

O parte din cercetările efectuate au avut ca scop studiul variației mărimilor măsurate care caracterizează geometric sudura în funcție de parametri de proces. S-au obținut astfel formule de corelații între parametrii variației și mărimile măsurate pe suduri, numite și funcții obiective. Acestea folosesc pentru a face predicții asupra mărimii măsurate la variația parametrilor de proces, scopul fiind tehnologic. Pe de altă parte cunoașterea tipului general de variație a procesului este importantă deoarece fenomenele specifice regimului keyhole (mișcarea topiturii, mișcarea vaporilor etc.) devin interesante atunci când ele aduc o nouă sursă de variație comparativ cu cea dată de parametrii de proces.

3.2 Condiții experimentale generale

Experimentul a constat în realizarea unor linii de fuziune cu lungime de 110mm pe plăci de oțel Dillimax 500 cu grosimea de 10 mm. S-a folosit o sursă Nd:YAG Trumph Haas 3006D care emite o putere maximă de 3kW în regim continuu. Fascicolul laser a fost transmis printr-o fibră optică cu diametrul mediului optic de 0,6 mm. Sistemul de focalizare a asigurat în pata focală un diametru al petei focale de 0,6 mm. Distanța focală a lentilei a fost de 200 mm. Ca și gaz protector a fost folosit argonul având un debit de curgere de 20 l/min. S-au folosit 6 plăci de material cu dimensiuni de 100×130×10 mm pe care s-au realizat între 5 și 8 suduri, cu o distanță de peste 10mm între suduri. Tăierea inițială a plăcilor a fost realizată folosind plasma.

Sursa laser folosită în experimentări a fost un sistem tehnologic laser industrial HL 3006D produs de firma TRUMPF. Acesta are un oscilator laser cu mediu solid Nd:YAG care emite radiație cu lungimea de undă de $\lambda=1064$ nm. Pompajul optic se realizează cu ajutorul lămpilor în impulsuri. Poate să emită atât în

regim continuu cât și în regim pulsant Puterea maximă la suprafața piesei este de 3kW. Parametru de calitate al fascicolului (BPP este egal cu 25 mm*mrad). Diametrul de ieșire al mediului optic al fibrei este de 600 μm.



Figura 3.1 Fotografii ale sistemului tehnologic laser folosit în experimente Trumph Haas 3006 D

Materialul folosit a fost oțel slab aliat denumit de producător DILLIMAX 500. Acesta este un oțel cu granulație fină și cu limită înaltă de elasticitate pentru construcții sudate, prezentând în starea de livrare o limită de elasticitate minimală de 500 Mpa (în gama grosimilor mici). Aceste caracteristici mecanice sunt obținute prin călire în apă urmată de o revenire. DILLIMAX 500 răspunde exigențelor normei EN 10137 (devenită EN 10025 partea 6). Este utilizat pentru construcții metalice, instalații de construcții și în construcții mecanice. Exemple: instalații de transport, mașini pentru lucrări publice, mașini de ridicat, macarale, porți de ecluze, poduri și structuri de oțel. DILLIMAX 500 este disponibil în gama de grosimi de la 6 la 150 mm, conform programului de livrare.

Compoziția chimică cu valorile limită pentru turnare exprimată în procente sunt prezentate în tabelul 3.1. Oțelul este elaborat cu grăunți fini prin adăugare de aluminiu.

Oțelul DILLIMAX 500 se distinge printr-un conținut relativ scăzut în carbon și în echivalent carbon. De aici decurge existența unei durități slabe în zona afectată termic, ca și un risc slab de fisurare la rece datorită hidrogenului, și o bună tenacitate. Experiența arată că se obțin caracteristici bune în zona sudată când

parametrii sudării sunt aleși astfel încât durata de răcire $t_{8/5}$ să fie cuprinsă între 10 și 30 secunde.

Tabel 3.1 Compoziția chimică a oțelului

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V+Nb
≤ 0.16	≤ 0.50	≤ 1.60	≤ 0.020	≤ 0.010	≤ 0.7	≤ 1.00	≤ 0.60	≤ 0.08

Caracteristici mecanice în starea de livrare pentru oțelul DILLIMAX 500 sunt prezentate în tabelele 3.2. și 3.3. Acestea sunt încercări la tracțiune și încercări de reziliență

Tabel 3.2 Încercări la tracțiune la temperatura ambiantă-sens transversal-

Grosimea [mm]	Rezistența la tracțiune R_m [Mpa]	Limita de elasticitate minimă, R_{eH} [Mpa]	Alungirea minimă A_5 [%]
≤ 50	590-770	500	17
>50 ≤ 100	590-770	480	17
>100 ≤ 150	540-720	440	17

Tabel 3.3 Încercări de reziliență pe epruvete Charpy-V

DILLIMAX 500	Sensul de laminare	Energia de rupere A_v [J] pentru temperatura de încercare de			
		0°C	-20°C	-40°C	-60°C
oțel de bază (B)	long/transv.	40/30	30/27	-	-
oțel tenace (T)	Long/transv.	50/35	40/30	30/27	-
oțel extratenace(E)	Long/transv.	60/40	50/35	40/30	30/27

Trebuie avut în vedere limita de elasticitate ridicată a metalului de bază ,la alegerea metalului de adaos. O recoacere de detensionare realizată după sudare cu temperaturi și durate de menținere importante, poate modifica proprietățile sudurii, limita de elasticitate scăzând în general. Dacă o recoacere de detensionare e prevăzută în timpul sau după punerea în lucru, trebuie deja ținut cont de aceasta la alegerea metalului de adaos. Pentru a obține recomandări generale în cea ce privește sudarea , se va consulta norma EN 1011. Alte date asupra materialului sunt prezentate în [Dillinger, 2003] .

3.3 Condiții experimentale particulare

Experimentele efectuate au fost de două tipuri și anume : suduri (linii de fuziune) cu lungimea de 110 mm și iradiere statice (fără a exista mișcare relativă între fascicolul laser și piesă) , prin acestea s-a urmărit observarea zonei topite. Realizarea sudurilor a constituit partea principală a experimentărilor.

În realizarea sudurilor s-au variat direct trei parametrii :puterea laserului, viteza de sudare ,distanța dintre planul focal și suprafața piesei, numită și defocalizare. Laserul a funcționat în regimul continuu. Puterea a fost măsurată în kW și a avut un domeniu de variație între 1 și 3 kW. Viteza de sudare a fost măsurată în m/min și a avut un domeniu de variație între 0,15 și 1,5 m/min.

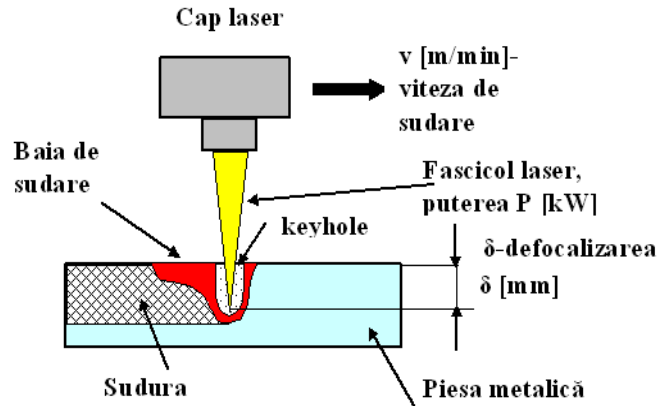


Figura 3.1 Parametrii variați în experimente

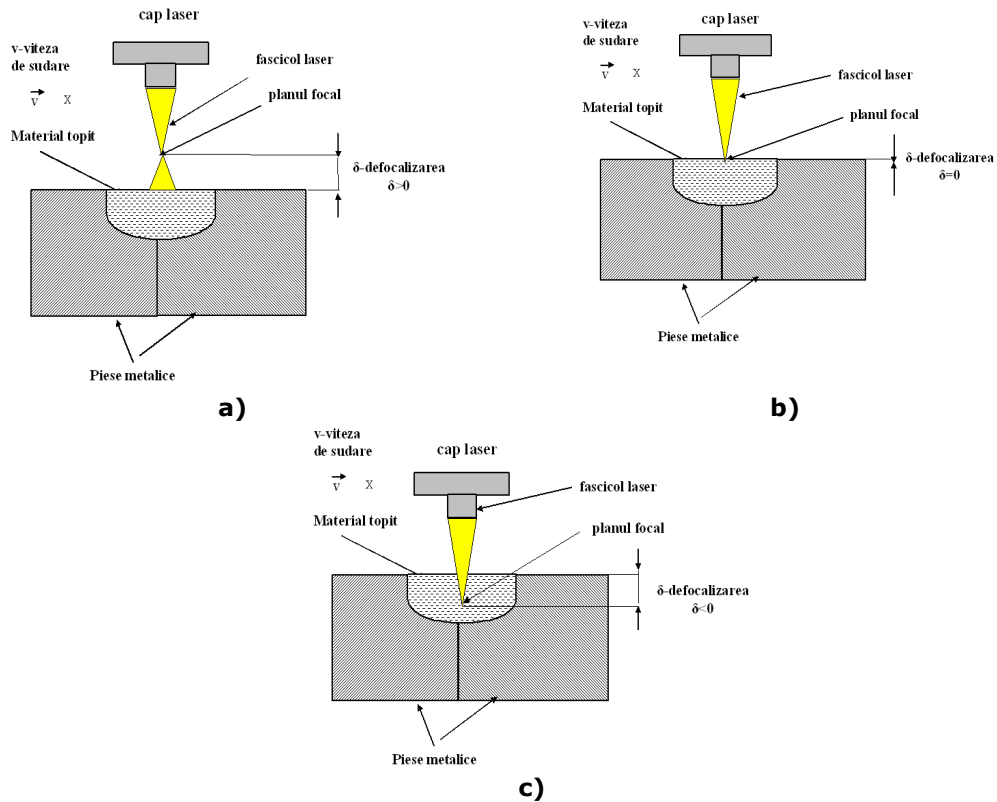


Figura 3.2 Poziția planului focal în raport cu suprafața piesei a) focalizarea deasupra piesei, defocalizarea $\delta > 0$ b) focalizare la suprafața piesei, defocalizarea $\delta = 0$ c) focalizare sub suprafața piesei, defocalizarea $\delta < 0$



Figura 3.3 Fotografii ale plăcilor cu sudurile realizate

Puterea și viteza de sudare au fost variate folosind comanda numerică a instalației. Pentru regimul de iradiere continuu folosit acești parametrii caracterizează procesul din punct de vedere al iradierii piesei. Defocalizarea are o influență suplimentară asupra iradierii prin modificare intensității fascicolului laser la suprafața piesei independent de modificarea puterii. Schema băii de sudare și parametri variați la realizarea sudurilor sunt prezentați în figura 3.1. Variația caracteristicilor sudurii (funcții obiectiv) cu puterea și viteza de sudare se consideră principal cunoscută. Scopul experimentărilor fiind acela de a investiga efectul particular produs de defocalizare.

Defocalizarea reprezintă distanța dintre piesă și planul focal. Planul focal este locul în care diametrul fascicolului laser este minim, pata focală. Poziția planului focal este dată de distanța focală a lentilei de focalizare iar mărimea petei de diametrul fascicolului nefocalizat. Piesa, desemnată prin suprafața ei în stare solidă, poate fi așezată în planul focal, lucru marcat prin defocalizarea 0 ($\delta = 0$), în acest caz diametrul petei focale este minim. Așezarea piesei sub planul focal conduce la o creștere a diametrului petei, în acest caz se consideră defocalizarea pozitivă. Așezarea piesei astfel încât planul focal să fie sub suprafața piesei duce la o creștere a diametrului petei, defocalizarea se consideră negativă. În acest caz radiația nu atinge planul focal deoarece întâlnește suprafața piesei și are loc interacțiunea cu aceasta. Cele trei cazuri de focalizare a fascicolului laser cu defocalizarea pozitivă, nulă și respectiv negativă sunt reprezentate în figura 3.2. Variația defocalizării în sensul folosirii valorii zero și a valorilor negative -2 mm și -4 mm a fost folosită în experimentării.

În procesele de prelucrare laser variația defocalizării este un procedeu pe larg folosit. În zona de interacțiune dintre radiația laser și material apare keyhole, cavitare umplută cu vapori (sau o cavitare care va rămâne la finalul procesului pentru procesele de tăiere sau găurire). Prin focalizarea fascicolului în interiorul piesei se urmărește ca fascicolul care se propagă în vaporii metalici să fie convergent. Prin aceasta se favorizează o zonă secundară de absorție în interiorul piesei. Focalizarea în interiorul piesei defavorizează absorția la începutul procesului prin scăderea intensității la suprafața piesei însă apoi în zona vaporizată favorizează absorția prin creșterea intensității datorită formei convergente a fascicolului laser. Aplicarea focalizării în interiorul materialului a condus la creșterea penetrării. Acest lucru a fost arătat pentru sudare în lucrările [Kaplan, 2002] iar pentru tăiere în lucrările [Yue, 1996]. Este evident că o focalizare excesivă în interiorul piesei va fi dăunătoare deoarece la suprafață intensitatea va fi prea mică pentru a putea vaporiza materialul. Fotografii ale celor 6 plăci cu sudurile obținute sunt prezentate în figura 3.3.

În experimentele realizate s-a considerat focalizarea la suprafață ca și caz de referință iar apoi s-a coborât în interiorul piesei planul focal cu un pas de 2mm pentru a obține ca defocalizarea să fie semnificativă. Valoarea de -4 mm pentru defocalizare se află undeva la limita care permite folosirea defocalizării ca parametru de proces. O creștere peste valoarea de -5mm ar compromite procesul de sudare deoarece intensitatea la suprafața piesei devine prea mică. Defocalizarea a fost reglată folosind sistemul de mișcare în coordonate x,y,z a capului laser, mai precis mișcarea pe verticală a acestuia. Tabelul 3.4 prezintă valorile parametrilor variații pentru sudurile realizate.

3.4 Planuri experimentale de tip clasic

Experimentarea de tip clasic constă în variația pe rând a factorilor de influență. În funcție de defocalizarea folosită planul experimental clasic s-au considerat trei serii experimentale principale fiecare din acestea având două serii secundare una în care se variază puterea și cealaltă în care se variază viteza de sudare. În tabelul 3.4 experimentările de tip clasic sunt reprezentate de sudurile 1-30. O sinteză a organizării variației parametrilor pentru seriile experimentale clasice este prezentată în tabelul 3.5. Fiecare din cele trei serii principale menține în mod analog aceleași valori pentru putere și pentru viteză. Astfel pentru sudurile 1-10 s-a folosit defocalizarea $\delta = 0$ mm, pentru sudurile 11-20 s-a folosit defocalizarea

$\delta = -2$ mm iar pentru sudurile 21-30 s-a folosit defocalizarea $\delta = -4$ mm. Pentru variația puterii s-a folosit o variație cu un pas de 0.5 W la viteza de 0.6 m/min la sudurile 1-5 la care se adaugă prin intercalare sudura 8. Aceleași valori au fost folosite și la sudurile 11-15 între care se intercalează sudura 18 și la sudurile 21-25 între care se intercalează sudura 28.

Tabel 3.4 Valorile pentru paramerii variații pentru fiecare încercare

sudura	Puterea P[kW]	Viteza de sudare v [m/min]	Defocalizarea δ [mm]	sudura	Puterea P[kW]	Viteza de sudare v[m/min]	Defocalizarea δ [mm]
1	0,5	0,6	0	21	0,5	0,6	-4
2	1	0,6	0	22	1	0,6	-4
3	1,5	0,6	0	23	1,5	0,6	-4
4	2,5	0,6	0	24	2,5	0,6	-4
5	3	0,6	0	25	3	0,6	-4
6	2	0,15	0	26	2	0,15	-4
7	2	0,3	0	27	2	0,3	-4
8	2	0,6	0	28	2	0,6	-4
9	2	0,9	0	29	2	0,9	-4
10	2	1,5	0	30	2	1,5	-4
11	0,5	0,6	-2	31	1	1,5	0
12	1	0,6	-2	32	3	1,5	0
13	1,5	0,6	-2	33	1	1,5	-2
14	2,5	0,6	-2	34	3	1,5	-2
15	3	0,6	-2	35	2	1	-1
16	2	0,15	-2	36	2	1	-1
17	2	0,3	-2	37	1	1	-1
18	2	0,6	-2				
19	2	0,9	-2				
20	2	1,5	-2				

Variația vitezei a fost realizată la puterea de 2kW cu un pas de 0.3 m/min și valori particulare la începutul și sfârșitul domeniului, pe de altă parte organizarea conține situații în care valoarea vitezei se dublează la unele încercării succesive. Variația vitezei a fost realizată la sudurile 6-10. Aceleași valori au fost folosite la sudurile 16-20 și la sudurile 26-30.

Tabel 3.5 Organizarea serilor experimentale clasice

Parametrul variabil	Parametrii constanții	sudurile
Variația puterii	$v = 0,6$ [m/min], $\delta = 0$ [mm]	1;2;3;8;4;5
Variația vitezei	$P = 2$ [kW], $\delta = 0$ [mm]	6;7;8;9;10
Variația puterii	$v = 0,6$ [m/min], $\delta = -2$ [mm]	11;12;13;18;14;15
Variația vitezei	$P = 2$ [kW], $\delta = -2$ [mm]	16;17;18;19;20
Variația puterii	$v = 0,6$ [m/min], $\delta = -4$ [mm]	21;22;23;28;24;25
Variația vitezei	$P = 2$ [kW], $\delta = -4$ [mm]	26;27;28;29;30

Stabilirea nivelelor paramerilor pentru experimentarea de tip clasic are următoarea justificare. Nivelul maxim al puterii a fost dat de puterea maximă a oscilatorului

laser utilizat. Nivelul minim al puterii a fost stabilit pe baza cunoașterii generale a condițiilor în care se poate realiza topirea materialului. Pasul de 0.5 kW între nivele produce o variație importantă a intensității fascicolului laser între nivele. Pentru variația vitezei s-a considerat un domeniu de variație folosit în sudare. Între nivele s-a folosit un pas relativ mare 0.3 m/min și respectiv dublarea vitezei de sudare la începutul domeniului experimental. Defocalizarea este un parametru a cărui variație este mult mai restrictivă. Variația defocalizării prin coborîrea punctului focal produce creșterea timpului de interacțiune și scaderea intensității fascicolului laser la suprafața piesei. Efectul defocalizării a fost arătat în lucrările. S-a considerat că un pas de 2mm pentru variația defocalizării este suficient de mare pentru a produce diferențe între efecte. Ideea generală pentru stabilirea valorilor parametrilor a fost acoperirea domeniului experimental caracterizat de valorile pentru intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei și timpul de interacțiune caracteristic pentru sudarea laser. Între valorile acestor mărimi există diferențe relativ mari, tabelul 3.13. Acesta a produs diferențe semnificative între suduri. Prin folosirea unui plan experimental care cuprinde cea mai mare parte a domeniului experimental face ca rezultatele să reflecte tendința generală de variație. Se reduce astfel riscul ca variațiile prezentate să fie particulare și să reflecte o comportare de conjunctură pentru anumite valori ale parametrilor.

3.5 Planuri experimentale de tip factorial

Experimentarea factorială are ca obiectiv studiul a corelațiilor între parametrii variației (numiți și factorii de influență în cadrul experimentelor factoriale) și funcțiile obiectiv (mărimi măsurate sau calculate în funcție de cele măsurate) luând în considerare variația simultană a tuturor parametrilor variați. Obiectivul este obținerea unor corelații care să includă ca variabile toți factorii de influență. Aceste corelații sunt numite și modele matematice sau modele empirice. Pentru fiecare factor de influență se stabilesc nivele (valori particulare). Matricea experimentalului factorial este un tablou experimental care consideră toți factorii efectuând combinații între nivele acestora de tipul „fiecare cu fiecare”. Numărul încercărilor astfel rezultat este suficient pentru a stabili multiple corelații între factorii de influență și mărimea măsurată sau calculată numită funcție obiectiv.

În cazul experimentelor realizate s-a folosit un plan experimental factorial complet de tipul 2^3 (2 nivele, 3 factori de influență)(experiment factorial complet). Nivele se de numesc nivelul inferior și nivelul superior. Pentru putere nivelul inferior a fost ales la 1 kW, nivelul superior a fost ales la 3kW. Pentru viteza de sudare nivelul inferior a fost ales la 0,6 m/min, nivelul superior a fost ales la 1,5 m/min. Pentru defocalizare nivelul inferior a fost ales la $\delta = 0$ mm iar cel superior la $\delta = -2$ mm Semnificația nivelului este dată de efect și nu de semnul mărimii. S-a considerat ca efect studiat focalizarea fascicolului laser în interiorul piesei. Planul experimental conține 8 încercări prin acestea fiind suficiente date pentru determinarea coeficienților unui polinom care conține factorii de influență și produsele acestora (care desemnează interacțiunile și care sunt tratate ca și când ar fi un factor de influență distinct). Matricea experimentului factorial este dată de sudurile 2, 5, 31, 32, 12, 15, 33, 34. Pentru a studia statistic formele de corelație obținute s-au efectuat două replici în punctul central (la media dintre nivelul superior și cel inferior pentru cele două valori ale nivelurilor), încercările 35 și 36. Încercarea 37 este realizată pe limita domeniului experimental pentru puterea minimă. Prelucrarea datelor experimentale necesită considerarea pentru valorile

factorilor de influență a aceluiasi sistem de unități de măsură. Acesta este un sistem codificat în care nivelul superior pentru un factor de influență are valoare +1 iar cel inferior are valoarea -1. Acestea sunt valori adimensionale. Tabelul 3.6 conține planul experimental pentru experimentul factorial iar figura 3.4 conține reprezentarea grafică a punctelor experimentale în folosind sistemul codificat.

Tabel 3.6 Planul de experimentare factorial

sudura	Puterea		Viteza de sudare		Defocalizarea	
	P[kW]	A[-]	v [m/min]	B [-]	δ [mm]	C[-]
2	1	-1	0,6	-1	0	-1
5	3	+1	0,6	-1	0	-1
31	1	-1	1,5	+1	0	-1
32	3	+1	1,5	+1	0	-1
12	1	-1	0,6	-1	-2	+1
15	3	+1	0,6	-1	-2	+1
33	1	-1	1,5	+1	-2	+1
34	3	+1	1,5	+1	-2	+1
Experimentări în punctul central						
35	2	0	1	0	-1	0
36	2	0	1	0	-1	0

Aplicarea unui plan experimental factorial la realizarea experimentărilor generează posibilități de analiză mai mari decât în cazul experimentărilor clasice. Acestea prezintă două aspecte: realizarea unor modele matematice formule în care se variază simultan mai mulți factori de influență (funcții de mai multe variabile) și folosirea unei cercetări statistice mai extinse. Ca modele matematice se vor realiza modele polinomiale și logaritmice (factorii de influență apar în produs la o anumită putere). Aspectul principal urmărit în analiză va fi cel legat de ierarhizarea și selecția factorilor de influență. Metodele de analiză sunt descrise în lucrările [Nichici, 1996], [Cicală, 1999], [Cicală, 2005], [Hahn, 1968].

Nivele pentru parametrii considerați la planul factorial sunt justificate după cum urmează. Pentru putere s-a considerat valorile minimă și maximă în experimente. Pentru viteza de sudare s-a considerat valori relativ ridicate. Între nivelul inferior și cel superior există aproximativ o dublare a valorii vitezei de sudare. Astfel planul experimental ia în considerare un domeniu al valorilor ridicate pentru viteza de sudare. Pentru defocalizare s-a considerat limitele domeniului experimental. S-a urmarit prin valorile parametrilor considerați a unor variații importante ale intensității fascicolului laser la suprafața piesei și a timpului de interacțiune.

Metoda de analiză întrebuintată presupune ca toți trei factori de influență să fie exprimați în „aceleași unități de măsură”. Aceasta înseamnă transformarea valorilor din sistemul real în sistemul codificat. S-a întrebuintat un sistem codificat în care valoarea maximă a fost considerată pentru fiecare factor de influență +1 iar valoarea minimă -1. Principiul de transformare este următorul: pentru fiecare mărime variată (factor de influență) se identifică valoarea minimă cu -1 iar cea maximă cu +1. Pe baza acestora se stabilește o lege de variație care menține proporționalitatea. Notând cu x (mic) valorile codificate (adimensionale) și cu X (mare) valorile reale avem următoarea relație de transformare.

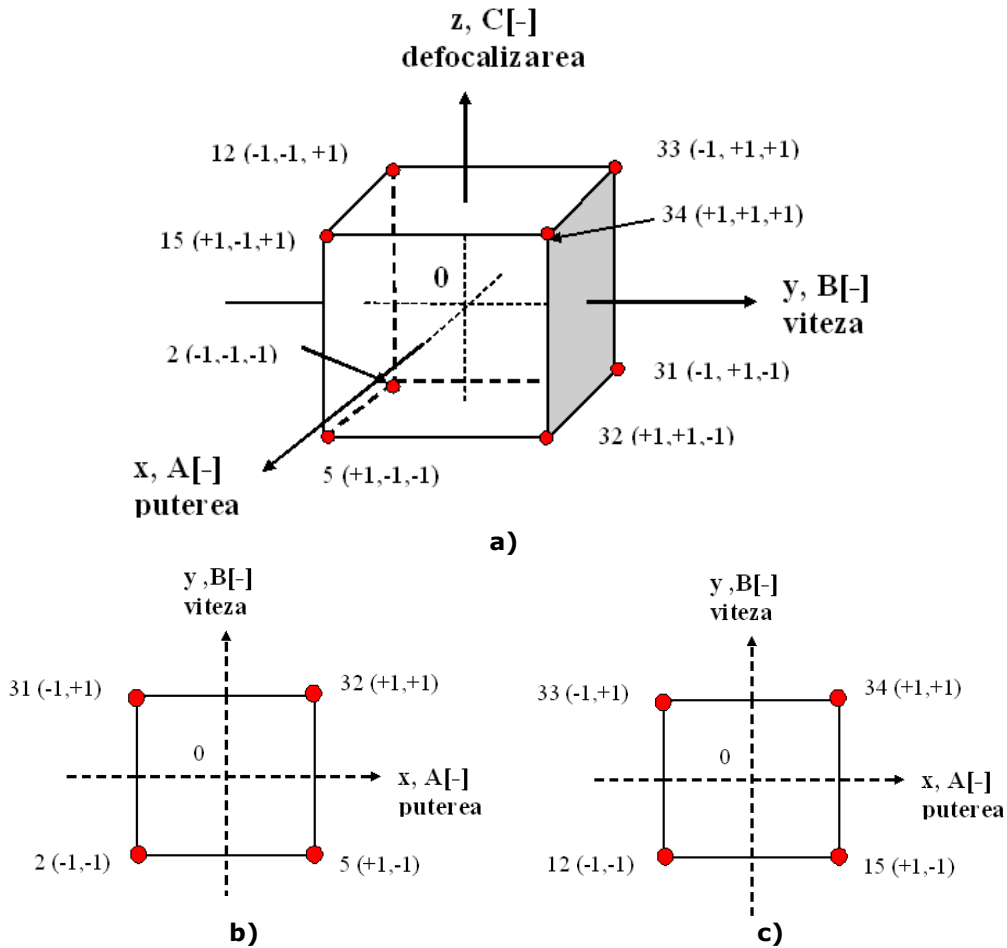


Figura 3.4 Schemă pentru situarea punctelor experimentale pentru planul experimental factorial a) planul experimental pentru analiza A, b) partea din planul experimental utilizată la analiza B, defocalizarea $\delta = 0$, c) partea din planul experimental utilizată la analiza C, defocalizarea $\delta = -2$ mm

$$\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3.1)$$

In toate cazurile studiate $x_{\min} = -1$ și $x_{\max} = +1$

Calculule pentru transformările celor trei factori de influență (cu notația A,B,C a acestora în sistemul codificat sunt prezentate în relațiile următoare:

puterea P[kW]

$$A = -1 + \frac{P-1}{3-1} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{P-1}{2} \cdot 2 = P - 2 \quad [-] \quad (3.2)$$

viteza v [m/min]

$$B = -1 + \frac{v-0.6}{1.5-0.6} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{v-0.6}{0.9} \cdot 2 = -1 + \frac{v-0.6}{0.45} = -2.33 + 2.22v \quad [-] \quad (3.3)$$

defocalizarea δ [mm]

$$C = -1 + \frac{\delta-0}{-2-0} \cdot (1 - (-1)) = -1 + \frac{\delta-0}{-2-0} \cdot 2 = -1 - \delta \quad [-] \quad (3.4)$$

Pentru defocalizare s-a considerat valoarea maximă -2 mm și minimă 0 deoarece efectul maxim al acestui parametru se află la focalizarea în profunzime. O sinteză a formulelor de transformare obținute, care include și transformările inverse este prezentată în tabelul 3.7.

Tabel 3.7: Funcțiile de transformare între valorile reale ale factorilor de influență și cele din sistemul codificat

Mărimea	Funcția directă	Funcția inversă
puterea	$A = P - 2 \quad [-]$	$P = A + 2 \quad [\text{kW}]$
viteza	$B = -2.33 + 2.22v \quad [-]$	$v = 1.04 + 0.45B \quad [\text{m/min}]$
defocalizarea	$C = -1 - \delta \quad [-]$	$\delta = -1 - C \quad \delta \quad [\text{mm}]$

Analiza planului experimental factorial a constat în:

- obținerea de formule de corelație între funcția obiectiv și factorii de influență
- studiul statistic a contribuției factorilor de influență prin metoda ANOVA
- ierarhizarea factorilor de influență prin diagrame Pareto
- prezentarea variației funcției obiectiv sub formă de suprafețe de răspuns

Tabel 3.8 Planul experimental factorial pentru analiza B

sudura	Puterea		Viteza de sudare		Defocalizarea	
	P[kW]	A[-]	v [m/min]	B [-]	δ [mm]	C[-]
2	1	-1	0,6	-1	0	-1
5	3	+1	0,6	-1	0	-1
31	1	-1	1,5	+1	0	-1
32	3	+1	1,5	+1	0	-1
Experimentări în punctul central						
35	2	0	1	0	-1	0
36	2	0	1	0	-1	0

Prezentarea rezultatelor s-a realizat îmbinând aspectele semnificative ale acestor analize.

S-a efectuat analiza planului factorial complet 2^3 (tabelul 3.6). S-a studiat efectul celor trei factori de influență (putere, viteză, defocalizare) și a interacțiunilor de

ordinul doi între ei și a interacțiunii de ordinul trei asupra funcțiilor obiectiv. Această analiză a fost notată cu A1. Tot pe planul factorial complet, s-a repetat aceeași analiză în situația în care nu se consideră interacțiunile. Această analiză a fost notată cu A2. Aceste analize A1 și A2 au arătat că principalii factori de influență sunt viteza și puterea. Puterea și viteza de sudare produc principalele efecte comparativ cu defocalizarea. S-a propus o analiză care elimină defocalizarea. Eliminarea defocalizării s-a realizat prin divizarea planului factorial 2^3 în două planuri factoriale 2^2 . Primul din acestea, notat cu B, a considerat defocalizarea $\delta = 0$ (tabelul 3.8), iar cel de-al doilea, notat cu C, a considerat defocalizarea $\delta = -2$ (tabelul 3.9).

Tabel 3.9 Planul experimental factorial pentru analiza C

sudura	Puterea		Viteza de sudare		Defocalizarea	
	P[kW]	A[-]	v [m/min]	B [-]	δ [mm]	C[-]
12	1	-1	0,6	-1	-2	+1
15	3	+1	0,6	-1	-2	+1
33	1	-1	1,5	+1	-2	+1
34	3	+1	1,5	+1	-2	+1
Experimentări în punctul central						
35	2	0	1	0	-1	0
36	2	0	1	0	-1	0

Încercările în punctul central au rămas efectuate pentru ambele planurile aceleași, efectuate la $\delta = -1$. Aceste planuri experimentale se vor considera separat independent de defocalizare. Se va nota însă pentru fiecare valoarea defocalizării pentru matricea principală ($\delta = 0$ pentru planul B, respectiv $\delta = -2$ pentru planul C) pentru a deosebi cele două studii între ele. Acestea sunt părți ale planului factorial 2^3 interpretate ca fiind două planuri factoriale 2^2 . Analizele C și B sunt similare deoarece consideră aceleași valori pentru viteză și putere. Studiul lor a urmat aceeași procedură ca cea de la planul experimental 2^3 . S-au efectuat analizele considerând separat cazul cu prezența interacțiunii (interacțiunea de ordinul 2 dintre putere și viteza de sudare), notat cu B1 respectiv C1, și cazul în care interacțiunea dintre factori este eliminată notat cu B2 respectiv C2. O analiză separată a avut ca scop obținerea unor formule de corelație care descrie funcția obiectiv prin produsul între factorii de influență, fiecare dintre aceștia fiind ridicat la o anumită putere. Pentru această modelare se consideră situația în care se elimină interacțiunile ca și în cazurile A2, B2, C2. Se studiază însă variația logaritmului funcției obiectiv în raport cu variația relativă a logaritmului valorilor factorilor de influență. Pentru planul factorial inițial în care se consideră defocalizarea a fost necesară o corecție a defocalizării pentru a logaritma o mărime strict pozitivă. Acest lucru afectează într-o oarecare măsură rezultatele obținute. Aplicarea metodei pentru cele două planuri factoriale 2^2 care elimină discuția asupra defocalizării dau rezultate bune. O sinteză a analizelor efectuate pe baza planului experimental factorial este prezentată în tabelul 3.10.

Tabel 3.10 Schema generală de analiză a planului experimental factorial

Analiza A, planul factorial cu 3 factori de influență (putere, viteză, defocalizare), plan factorial 2^3

A1. Studiul variației a trei factori de influență cu toate interacțiunile între aceștia

A2. Studiul variației a trei factori de influență fără interacțiunile între aceștia

Analiza B, planul factorial cu 2 factori de influență (putere, viteză), plan factorial 2^2 la defocalizarea $\delta = -0$

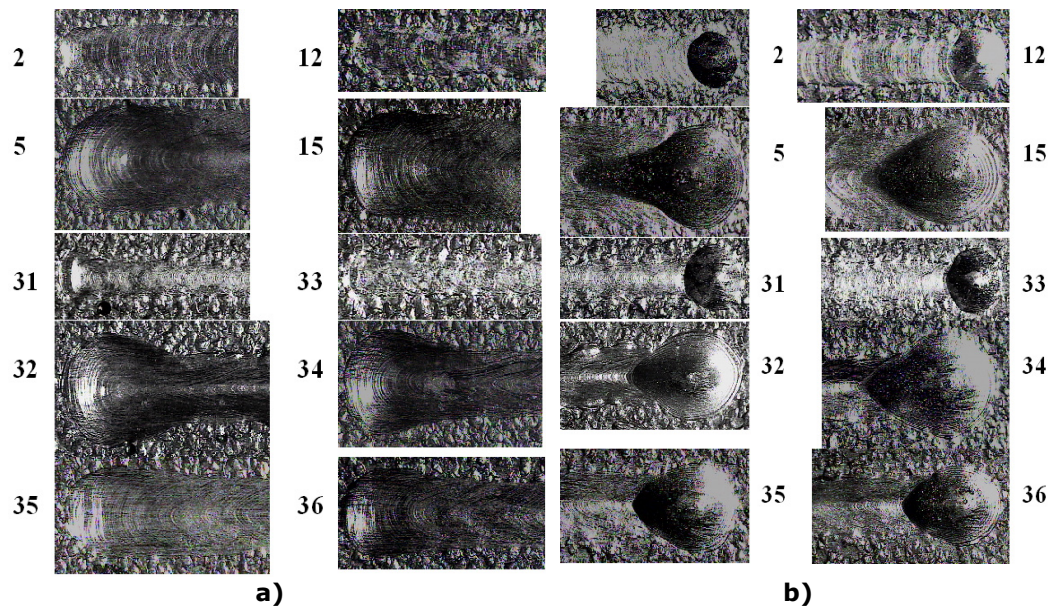
B1. Studiul variației a doi factori de influență cu interacțiune între aceștia

B2. Studiul variației a doi factori de influență fără interacțiune între aceștia

Analiza C, planul factorial cu 2 factori de influență (putere, viteză), plan factorial 2^2 la defocalizarea $\delta = -2mm$

C1. Studiul variației a doi factori de influență cu interacțiune între aceștia

C2. Studiul variației a doi factori de influență fără interacțiune între aceștia



*Figura 3.5 Fotografii ale suprafețelor sudurii realizate în experimentul factorial
a) Începutul sudurii b) Sfârșitul sudurii cu craterul final*

În prelucrarea de date după planul experimental factorial s-a urmărit obținerea folosind aceleași date și același design experimental mai multe funcții de corelație între funcțiile obiectiv și factorii de influență. Ideea acestei abordări este că realitatea este surprinsă mai bine în acest mod în care legătura dintre două mărimi este

modelată prin mai multe relații matematice. Încrederea într-o formulă de corelație este dată de coeficientul de corelație. Fiecare din aceste formule surprinde o parte a realității și într-un anumit context ar fi utilă. Ca și mod de prezentare prima problemă prezentată va fi formulele de corelație. Cele arătate de acestea se regăsesc în ierarhizarea factorilor prin diagrame Pareto Standartizat. Imagini ale suprafețelor sudurilor care constituie planul experimental factorial, pentru începutul sudurii respectiv sfârșitul sudurii sunt prezentate în figura 3.5.

3.6 Calculul unor mărimi fizice care caracterizează condițiile de iradiere a materialului

Pentru a avea o imagine clară asupra fenomenelor care au loc este necesar ca alături de parametri variații experimental trebuie cunoscute anumite mărimi fizice a căror valoare rezultă prin calcule din valorile parametrilor reglații experimental. S-au obținut astfel principalii parametri care caracterizează iradierea materialului.

Prima problemă care s-a pus a fost considerarea petei produse de fascicolul laser pe suprafața piesei de formă circulară. Aceasta este caracterizată de diametrul său. Legătura dintre defocalizare și diametrul petei pe suprafața piesei D a fost stabilită prin măsurători ale petei focale. Acestea sunt prezentate în tabelul 3.11. Pe baza acestora s-a formulat următoarea relație de corelație între defocalizarea δ și diametrul petei focale D. S-a ținut cont și de domeniul de variație a valorilor experimentale pentru defocalizare.

Tabel 3.11 Date experimentale privind variația diametrului petei fascicolului laser la suprafața piesei în funcție de defocalizare (distanța dintre planul focal și suprafața piesei)

δ [mm]	0	± 5	± 30
Diametrul petei pe suprafața piesei D [mm]	0,6	1.2	5

$$D = 0,12|\delta| + 0,6 \quad [\text{mm}] \quad (D - \text{diametru petei pe suprafața piesei}) \quad (3.5)$$

Aplicarea acestei relații pentru valorile defocalizării folosite în experimente sunt prezentate în tabelul 3.12:

Tabel 3.12 Date calculate după relația (3.5) pentru diametrului petei fascicolului laser la suprafața piesei funcție de defocalizarea referitor la defocalizările folosite în experimente

Defocalizarea δ [mm]	0	-2	-4
Diametrul petei pe suprafața piesei D [mm]	0,6	0,84	1,08

Energia liniară E_l este o mărime care caracterizează iradierea materialului din punctul de vedere al mișcării relative între piesă și capul laser, și din punctul de vedere al capacității fascicolului laser de a iradia materialul. În sudare energia liniară reprezintă o mărime standard care caracterizează iradierea cu fascicol laser procesele de prelucrare a materialelor. Energia liniară arată energia care este trimisă către material pe unitatea de lungime parcursă în timpul sudării. Energia liniară se calculează prin raportul dintre putere și viteză de sudare.

$$E_l = \frac{P}{v} \quad [\text{J/cm}] \quad (3.6)$$

Tabel 3.13 Mărimile care caracterizează iradierea pentru suduri

Sudura	Energia liniară E_l [kJ/cm]	Timpul de interacțiune t_{is} [ms]	Intensitatea I [10^5W/cm^2]	Sudura	Energia liniară E_l [kJ/cm]	Timpul de interacțiune t_{is} [ms]	Intensitatea I [10^5W/cm^2]
1	0,5	60	1.76	21	0.5	108	0.54
2	1	60	3.52	22	1	108	1.09
3	1,5	60	5.29	23	1.5	108	1.63
4	2,5	60	8.81	24	2.5	108	2.72
5	3	60	10.58	25	3	108	3.27
6	8	240	7.05	26	8	432	2.18
7	4	120	7.05	27	4	216	2.18
8	2	60	7.05	28	2	108	2.18
9	1,3	40	7.05	29	1.3	72	2.18
10	0,8	24	7.05	30	0.8	43.2	2.18
11	0,5	84	0.89	31	0.4	24	3.53
12	1	84	1.79	32	1.2	24	10.61
13	1,5	84	2.69	33	0.4	33.6	1.8
14	2,5	84	4.49	34	1.2	33.6	5.41
15	3	84	5.39	35	1.2	43.2	4.91
16	8	336	3.59	36	1.2	43.2	4.91
17	4	168	3.59	37	0.6	43.2	2.45
18	2	84	3.59				
19	1,3	56	3.59				
20	0,8	33.6	3.59				

Timpul de interacțiune t_{is} reprezintă timpul în care un punct considerat fix pe suprafața materialului este supus iradierii. Timpul de interacțiune t_{is} se calculează ca fiind raportul dintre diametrul petei fascicolului laser la suprafața piesei și viteza de sudare. Acesta caracterizează iradierea din punctul de vedere al expunerii materialului la radiația laser, fiind o consecință a mișcării relative și a dimensiunilor petei lăuate de fascicolul laser pe suprafața piesei.

$$t_{is} = \frac{D}{v} \quad [\text{s}] \quad (3.7)$$

S-a preferat definirea timpului de interacțiune referitor la diametrul fascicolului în pata pe suprafața piesei și nu relativ la pata focală. Prin această definiție timpul de interacțiune depinde (referitor la parametrii variației) de viteză și defocalizare (dublă dependență). După cum s-a arătat în Capitolul 2 timpul de interacțiune va determina mărimea (extinderea) efectelor termice.

Intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei este o mărime care caracterizează exclusiv fascicolul laser. Ea reprezintă iradierea instantanee datorată fascicolului laser într-un punct (fără dimensiuni) de suprafața materialului. Ea este rezultatul unei duble medieri în timp în spațiu a energiei furnizate de fascicolul laser. Ea se calculează ca raportul dintre puterea laserului și suprafața petei lăsate de fascicolul laser la suprafața piesei (pata este considerată circulară).

$$I = \frac{4 P}{\pi D^2} = \frac{4 P}{\pi (0.12|\delta| + 0.6)^2} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (3.8)$$

Intensitatea fascicolului laser este o mărime care calitativ fenomenele termice induse de fascicolul laser în material. Relativ la parametrii variații intensitatea fascicolului laser depinde de putere și defocalizare (dublă dependență).

Mărimile anterior descrise pentru condițiile în care s-au realizat fiecare sudură în parte sunt prezentate în tabelul 3.13.

Timpul de interacțiune și intensitatea fascicolului laser caracterizează iradierea piesei. În expresia intensității fascicolului laser la suprafața piesei. În expresia timpului de interacțiune este inclus caracterul dinamic iradierii (mișcarea relativă dintre fascicolul laser și piesă)

3.7 Metode și tehnici de analiză și măsurare a sudurilor

3.7.1 Măsurători pe secțiunii ale sudurilor

Studiul principal a constat în studiul secțiunii transversale a sudurilor. Pentru aceasta s-a realizat o tăietură pe fiecare placă perpendiculară pe direcția de sudare. Tăierea s-a efectuat către sfârșitul sudurii, la 20 mm de încetarea procesului de sudare. Astfel regiunea în care s-a studiat secțiunea se află în zona stabilă a procesului de sudare care a durat un timp suficient pentru să devină stabil. Tăierea plăcilor a fost efectuată cu o freză folosind lichid de răcire astfel că temperatura nu a depășit 50 °C în timpul tăierii, după tăiere s-a realizat o prelucrare primară prin aşchiere a suprafeței (seping). În urma acestei prelucrării secțiunea sudurilor a devenit vizibilă. S-au obținut în final 6 probe de la cele 6 plăci care conțin partea de sfârșit a sudurii și secțiunea prin suduri. Pe acestea s-a realizat o prelucrare metalografică a suprafeței secțiunii. Suprafața prelucrată metalografic a fost supusă unui atac acid folosind Nital, specific pentru analiza de microstructură. Probele astfel pregătite au făcut posibilă măsurarea lățimii în apropierea suprafeței (LS) a penetrării sudurii (h), a ariei zonei topite (AT). Măsurătorile au fost efectuate folosind un microscop care are o mărire de 15 și o precizie de 0.01 mm. Deoarece diferențele între valorile pentru diferite sudurii au fost semnificative s-a lucrat la o precizie inferioară de 0.1 mm. La măsurarea profunzimii s-a exclus supraînălțarea sudurii. Înafara de sudurile 5,15,25,32 supraînălțarea sudurii s-a situat înafara preciziei măsurătorilor. Aria zonei topite a fost măsurată prin marcarea amprentei acesteia pe folie transparentă și măsurată cu un raster milimetric aflat pe suport transparent. Secțiunea prin plăcile pe care s-au realizat sudurile și macrografi ale acestora sunt prezentate în figurile 3.7 și 3.8. A fost realizată fotografierea microstructurilor și zonei afectate termic, analiza durtății folosind încercarea Vikers pe unele sudurii.

3.7.2 Măsurători pe suprafața sudurilor

Imediat după prelucrare au fost înregistrate imagini ale suprafeței înainte de a se produce deteriorări ale acesteia prin manipularea pieselor. Obiectivele generale ale studiului au fost forma valurilor, craterul final care se obține prin oprirea iradierii. Fotografiera a fost realizată cu o mărire de $15\times$, ea a fost realizată pentru partea de început a sudurii și pentru partea de sfârșit a acesteia. Fotografii realizate au fost folosite și pentru realizarea unor măsurători indirecte. Aceste fotografii au fost utilizate pentru stabilirea dimensiunilor și a ariei craterului obținut la sfârșitul sudurii

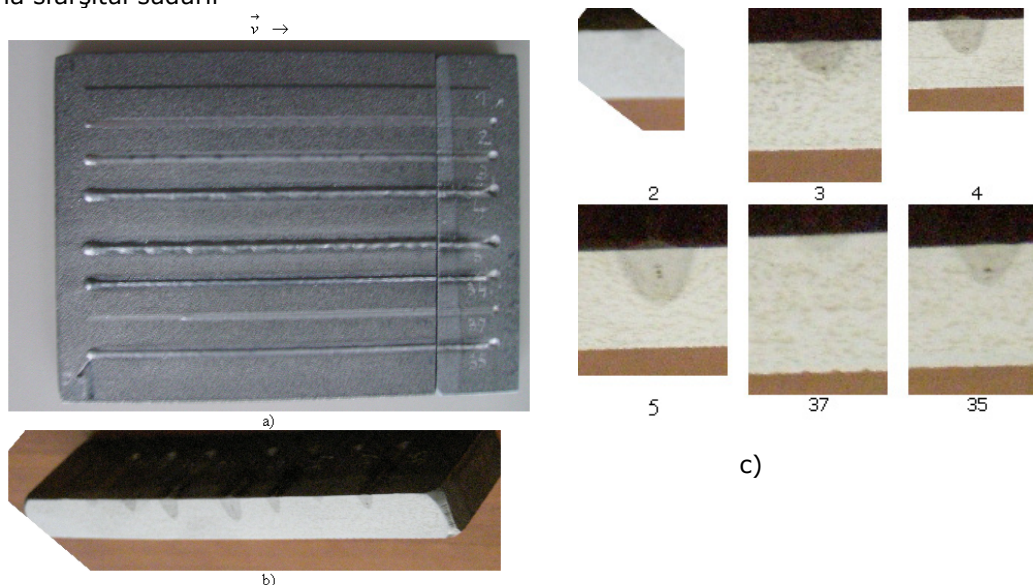


Figura 3.6 Fotografia plăcii 1 a) Vedere a suprafeței , b) Vedere a secțiunii ,de la stânga la dreapta sudurile 1,2,3,4,5, 34,37,35 , c)Macrografii ale sudurilor

Supraînălțarea sudurilor a fost măsurată în zona învecinată cu cea în care s-a realizat secționarea pieselor. Măsurarea supraînălțării sudurilor a fost realizată prin utilizarea unui comparator cu arc, cu precizia de 0.01 mm. Aceasta reprezintă distanța dintre partea cea mai înaltă a sudurii și suprafața învecinată a piesei neafectate. Măsurătorile au fost locale în apropierea zonei în care s-a realizat secțiunea prin suduri. Piesele iradiate deși suficient de groase suferit deformări comparabile cu supraînălțarea sudurilor. Astfel nu s-a putut efectua un profil general al suprafeței sudurii, supraînălțarea în părți apropiate ale sudurii a dat rezultate diferite din cauza deformării piesei. La începutul iradierii este o ridicătură, supraînălțarea este mare, pe măsură ce procesul de sudare avansează supraînălțarea scade până ajunge la o valoare stabilă. Această valoare a fost măsurată.

Cu ajutorul comparatorului s-a măsurat adâncimea craterului. S-a comparat adâncimea maximă a acestuia cu suprafața înconjurătoare a piesei. În cazurile în care s-a folosit o iradiere puternică s-a obținut o adâncitură pronunțată la partea interioară a craterului. Pentru celelalte suduri s-a obținut o parte inferioară care a avut aceeași concavitate. Adâncimea craterului nu atins penetrarea sudurii. Acest

lucru a arătat că, craterul a fost umplut de topitură. În aceste condiții volumul craterului poate fi considerat în mare parte efect al vaporizării materialului însă și depunerea de topitură are o contribuție importantă. Depunerea de topitură în crater a dus la mărirea (observată numai în unele cazuri) a lățimii craterului în raport cu lățimea sudurii, topitura rămasă aducând un aport termic suplimentar.

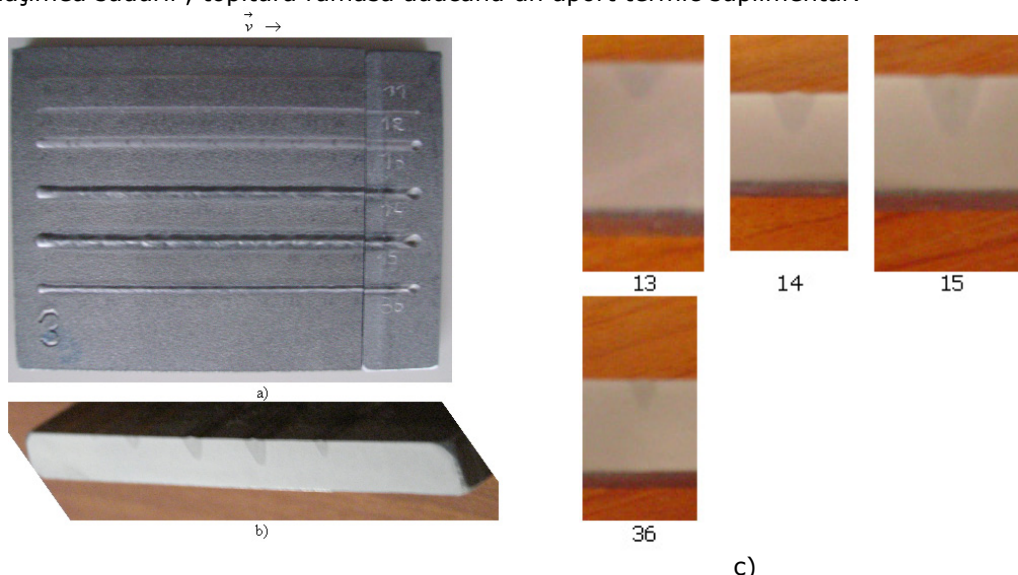


Figura 3.7 Fotografia plăcii 3 a) Vedere a suprafeței, b) Vedere a secțiunii, de la stânga la dreapta sudurile 11,12,13,14,15,36, c) Macrografii ale sudurilor

O atenție deosebită a fost dată formei craterului final. Aceasta are o formă ovoidă, care poate fi aproximată cu o elipsă. S-a considerat trei mărimi care caracterizează această formă și anume axa mare a elipsei, considerată pe direcția de sudare (notată cu X), axa mică a elipsei perpendicular pe direcția de sudare (notat cu Y) și alungirea ovoidului notată cu b care reprezintă distanța de la centrul de intersecție a celor două axe ale craterului la partea din spate a craterului. Cele trei mărimi au fost măsurate indirect pe fotografii și apoi transformate în valori reale ținând cont de mărimea relativă a fotografiei. Mărimea relativă a fotografiei a fost stabilită după prin raportul între lățimea sudurii măsurată pe fotografie și lățimea sudurii măsurată în aceeași zonă pe piesă. Operarea cu fotografiile în format electronic a necesitat calcularea măririi pentru fiecare fotografie în parte. În urma obținerii celor trei mărimi care caracterizează craterul ovoid s-a definit o mărime care să caracterizeze abaterea de la circularitate a craterului. Aceasta este o măsură directă a deplasării topiturii. Independent de dimensiunile craterului s-a măsurat suprafața acestuia. Pentru aceasta s-a apelat tot la fotografii. S-au listat fotografiile pe hârtie de Xerox, apoi s-au decupat formele respective. Acestea s-au cântărit cu o balanță care permite o precizie de 0.0001 g . Pe un număr de 5 probe de $100 \times 100\text{ mm}$ care au fost parțial acoperite de toner s-a determinat densitatea de suprafață a hârtiei. S-a aflat astfel suprafața probelor decupate care apoi prin folosirea scării de transformare s-a obținut suprafața reală a craterului. Suprafața craterului a fost utilizată pentru calcularea volumului craterului. Pentru aceasta s-a apelat la o aproximare conică a craterului. Deși acesta este foarte grosier ea ar putea aprecia corect cantitatea de material vaporizat.

O altă problemă abordată a fost măsurarea lăţimii sudurilor pe suprafaţa piesei, lăţimea medie (LM). Acesta a fost considerată ca zona topită şi măsurată cu microscopul. Valorile au fost mai mici decât la cea măsurată pe secţiune deoarece în cazul măsurătorii pe secţiune s-a adăugat şi zona influenţată termic care în apropierea suprafeţei este dificil de separat. Pe suprafaţa piesei sudura este marcat (despărţită de materialul înconjurător) de prezenţa a două adâncituri de 0.02mm care se află pe piesă înainte de supraînălţarea produsă de sudură. Acestea a fost pusă în evidenţă folosind comparatorul.

Lăţimea sudurilor nu a înregistrat variaţii puternice pe acelaşi sudură. La măsurare s-a luat în considerare ansamblul sudurii, fără a considera curgerea topiturii la contact cu suprafaţa. Aceasta depinde de supraînălţare. Din acest punct de vedere o precizie mai mare de 0.1 mm care a fost folosită în măsurare lăţimi la suprafaţă ar induce o variaţie falsă. S-au efectuat trei măsurători pentru lăţimea pe suprafaţa sudurilor: prima în primii 20 de mm, a doua aleatoriu în partea de mijloc a sudurii iar a treia în ultimii 20 mm ai sudurii. Prima şi ultima au folosit pentru a obţine scara de mărire a fotografiilor respective. S-a calculat media măsurătorilor respective şi dispersia corespunzătoare, astfel s-a obţinut lăţimea medie a sudurii. Pentru analiza microstructurilor şi a durităţilor s-au selectat sudurile la care iradierea a fost cea mai ridicată. Sudurile 5, 15, 25 au avut puterea cea mai ridicată iar prin urmare şi intensitatea cea mai mare. Sudurile 6, 16, 26 au avut viteza de sudare cea mai mică şi prin urmare timpul de interacţiune cel mai mare. Transformările de structură au fost cel mai bine puse în evidenţă în aceste cazuri.

3.7.3 Prelucrarea matematică a datelor experimentale

Cercetarea experimentală propusă a prezentat un interes principal tehnologic. Aceasta a urmat la nivel de principiu modelul cibernetic de tip intrări-ieşiri în care sistemul tehnologic este considerat o „cutie neagră”. Prin această formulare a problemelor însoţită de un aparat matematic specific abordării statistice se arată în mod clar corelaţiile între parametrii variaţiei şi funcţiile obiectiv. Schema modelului cibernetic este prezentată în figura 3.8.

Rezultatele obţinute pe baza experimentării clasice au fost reprezentate prin grafice în care mărimea analizată este prezentată pe rând ca funcţie de variaţia puterii iar apoi ca funcţie de variaţia vitezei de sudare. La acestea s-a adăugat variaţia funcţiei obiectiv în funcţie de energia liniară.

Pe fiecare grafic se află câte trei serii corespunzătoare celor trei poziţii ale petei focale în raport cu suprafaţa piesei, defocalizarea δ . S-au folosit trei metode de reprezentare grafică:

- Reprezentarea prin puncte. Aceasta este o interpolare liniară pe intervale (intervalul se consideră între abscisele a două puncte experimentale succesive). Ea arată variaţia mărimii considerate pe domeniul studiat. Interpretarea tendinţei de variaţie este generală. Se pot efectua aprecieri numai asupra punctelor experimentale.
- Reprezentarea cu funcţii spline. Aceasta este o interpolare pe intervale cu funcţii de gradul 3. Acestea sunt astfel alese încât să fi continue în punctele experimentale. Interpretarea tendinţei de variaţie este generală. Apar însă mult mai evident maximele şi minimele.
- Reprezentarea cu funcţii de regresie. Aceasta foloseşte metoda celor mai mici pătrate pentru a duce printre puncte o curbă. S-a ales forma funcţiei de corelaţie astfel încât să se obţină un coeficient de corelaţie cât mai bun. Acesta este calculat în ipoteza că datele sunt normal distribuite. Acest tip de reprezentare arată

tendința de desfășurare generală a procesului și face posibilă cercetarea efectuată cu alte cercetări similare.

Planul de experimentări factorial a fost prelucrat statistic folosind programul STATGRAPHICS. Rezultatele prelucrării statistice au fost orientate pe următoarele direcții:

- ierarhizarea factorilor de influență prin diagramele pareto
- realizarea unei corelații polinomiale între funcția obiectiv și factorii de influență, respectiv interacțiunile dintre aceștia .
- realizarea unei corelații între funcția obiectiv și produsul factorilor de influență la diverse puteri (formulă de corelație logaritmică)
- analiza surselor variației prin metoda ANOVA. Aceasta calculează dispersia de nivel pentru fiecare efect (parametri respectiv interacțiuni) și o compară cu dispersia generală. Se efectuează testul statistic Fisher. Se stabilește un prag de semnificație 0.05 caracteristic proceselor tehnologice.

De asemenea s-a stabilit coeficientul de corelație R^2 și coeficientul de corelație corectat pentru diferență R^2 (*adj. for d.f*)

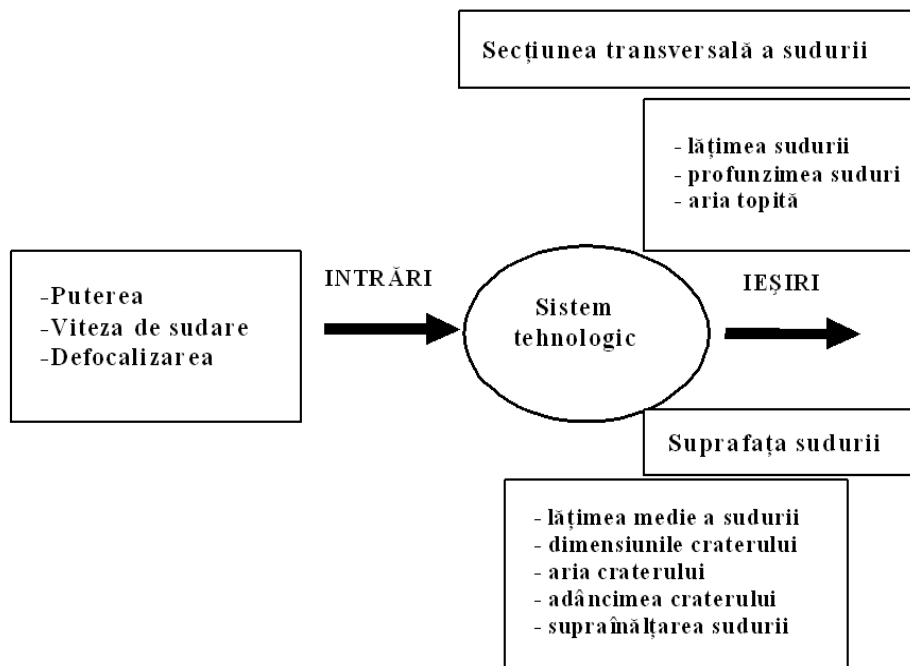


Figura 3.8 Schema unui model cibernetice asociat cu experimentul realizat

3.8 Concluzii

Capitolul 3 a avut ca scop prezentarea programului experimental , rezultatele experimentale și metodele de analiză utilizate. În experimente s-a utilizat un sistem tehnologic laser cu Nd:YAG și ca material un oțel carbon slab aliat. Experimentele au constat în realizarea de suduri. Conceperea experimentelor a permis abordarea simultană de probleme tehnologice și fenomenologice. Ca obiectiv tehnologic s-a considerat controlul și optimizarea procesului de sudare. Ca obiectiv

fenomenologic s-a considerat condițiile de producere a topiturii cu fascicol laser. Experimentările au fost de tip clasic și de tip factorial. S-au realizat suduri și iradieri statice. Analiza a avut ca obiect studiul secțiunii transversale a sudurilor și studiul suprafeței sudurilor.

În Capitolul 3 au fost prezentate experimentele realizate și programele experimentale propuse. Prezentarea experimentelor a avut următoarea structură:

- S-au prezentat obiectivele generale ale cercetării experimentale, caracteristicile sistemului tehnologic laser folosit și caracteristicile oțelului;
- S-au prezentat planurile experimentale și valorile pentru parametrii variației puterea, viteza de sudare și defocalizarea;
- S-au introdus mărimi care caracterizează din punct de vedere fizic condițiile de iradiere a materialului, energia liniară, timpul de interacțiune și intensitatea fascicolului laser;
- S-au prezentat pe metodele matematice de analiză a variațiilor și capacitățile de prelucrare statistică a programului STATGRAFICS.

Principalele aspecte ale experimentării propuse sunt următoarele:

- Asocierea experimentărilor de tip clasic cu experimentări de tip factorial;
- Asocierea caracterului dinamic al iradierii prin realizarea de suduri cu caracterul static dat de iradiere la suprafața piesei;
- Utilizarea unui material suficient de gros ca să nu fie penetrat iar zona topită să se dezvolte liber în material.

Experimentarea propusă are importanță științifică prin utilizarea în experimente a unui sistem tehnologic care a intrat relativ recent în industrie și care a cunoscut o răspândire rapidă asociat în procesul de prelucrare un oțel destinat pentru construcții sudate. Prin acestea s-au creat premise favorabile pentru studiul procesului de sudare. Capacitatea fascicolului laser de a topi materialul este pusă în valoare prin posibilitatea de dezvoltare liberă a zonei topite în material. Se completează cunoștințele legate de efectul defocalizării ca parametru în sudarea cu fascicol laser. Funcțiile obiectiv propuse spre studiu arată că experimentarea propusă conține metode originale de analiză și corelare între mărimi

4. Analiza secțiunii transversale a sudurilor

4.1 Secțiuni transversale prin suduri

Principalele informații despre sudurile realizate provin din analiza secțiunii transversale a sudurii. Prin secționarea piesei în zona unde s-a stabilizat procesul de sudare urmată de prelucrarea metalografică se obțin caracteristici ale sudurii. Schema secțiunii sudurii și imagini ale acestora pentru sudurile realizate sunt prezentate în figura 4.1. Pe secțiunea sudurii s-au măsurat lățimea sudurii LS , profunzimea sudurii h și aria zonei topite și resolidificate AT . Mărimile analizate sunt prezentate în figura 4.1.a.

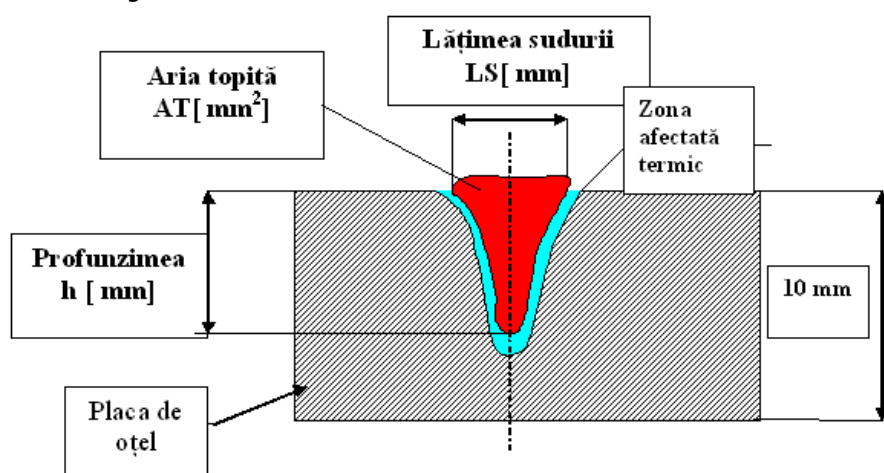


Figura 4.1.a Schema secțiunii prin sudură și a mărimilor măsurate

Secțiunea transversală prin sudură, prelucrată metalografic, arată forma zonei topite și a zonei afectate termic. Zona topită are forma unui cap de cui, pentru sudurile aflate în regim keyhole și semisferică pentru cele aflate în regimul de conducție. Contactul dintre zona topită și materialul netopit (dar afectat termic) pune probleme legate de recristalizarea materialului. Pentru sudurile realizate în regimul de conducție forma zonei topite este semisferică cu o mică zonă afectată termic. Pentru sudurile aflate în regimul keyhole forma clasică numită cap de cui se poate descompune în trei părți distincte, mergând de la suprafață în profunzime. La suprafață are o formă de trapez, urmată de una dreptunghiulară, care arată o penetrare simetrică. Această zonă se termină brusc cu una semisferică, similară cu cea obținută în la regimul de conducție. Zona afectată termic este ovală și înconjoară zona topită. Ea se pune în evidență vizual prin schimbarea culorii materialului. Zona afectată termic este semisferică pentru sudurile aflate în regimul

de conducție și ovală (urmărește penetrarea sudurii) pentru sudurile aflate în regimul keyhole.

Serile experimentale la care s-a variat puterea fascicolului laser au arătat că forma secțiunii transversale a sudurii se modifică pe măsura creșterii puterii. Variația formei secțiunii transversale a sudurii cu puterea este prezentată în figura 4.1.b. Astfel se trece de la regimul de conducție la regimul keyhole. Creșterea puterii face ca regimul keyhole obținut să prezinte alături de creșterea penetrării și diferențe între partea superioară și cea inferioară a sudurii.

Pentru serile la care s-a variat viteza de sudare, odată cu creșterea vitezei de sudare a scăzut penetrarea sudurii, însă formele secțiunii sunt geometric asemenea. Variația secțiunii sudurii cu viteza de sudare este prezentată în figura 4.1.c. Toate aceste suduri se află în regimul de sudare keyhole.

Modificarea secțiunii prin sudură cu defocalizarea (coborârea punctului focal în interiorul piesei), în aceleași condiții de putere și viteză poate fi observată pe figurile 4.1.b și 4.1.c urmărind sudurile (3,13,23), (4,14,24) (5,15,25) , (6,16,26) (7, 17, 27), (8,18,28). Se observă că penetrarea sudurii este apropiată dar lățimea sudurii crește pentru sudurile realizate cu focalizarea laserului în interiorul piesei.

Atât pentru variația puterii cât și a vitezei de sudare forma secțiunii este similară cu cele prezentate în figura 1. Analiza secțiunii sudurilor a dus la identificarea regimurilor de sudare conform celor prezentate în Capitolul 1. Astfel sudurile 1, 2, 11, 12, 21, 22, 31, 33, 37 au fost identificate ca aparținând regimului de conducție. Sudurile 3, 13, 23 au fost identificate ca aparținând regimului intermediar între conducție și keyhole. Restul sudurilor fiind identificate ca aparținând regimului keyhole. Puterea este singurul factor de influență care produce diferențierea regimurilor de sudare.

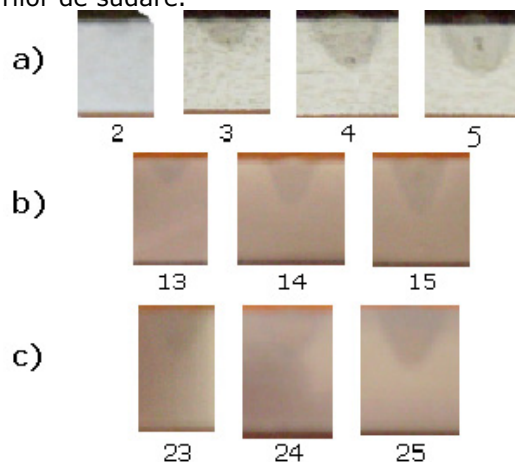


Figura 4.1.b Imagini ale secțiunilor prin sudură în funcție de putere (puterea crește de la stânga la dreapta) pentru defocalizările
a) $\delta = 0$, b) $\delta = -2\text{ mm}$, c) $\delta = -4\text{ mm}$

Zona afectată termic apare pe toate sudurile. Ea este extinsă la sudurile la care iradierea a fost puternică. Astfel apare vizibilă pe suprafață pentru sudurile (4,5,6,7,8) la defocalizarea $\delta = 0$, pentru sudurile (14, 15, 16, 17, 18, 19) la defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$, pentru sudurile (24, 25, 26, 27) la defocalizarea

$\delta = -4\text{ mm}$ și pentru sudurile 32. 35. 36. Zona afectată termic a fost vizibilă pe partea opusă suprafeței iradiate a piesei. Aceasta s-a observat spre sfârșitul procesului de sudare pentru sudurile (5, 6, 7), (15, 16, 17), (25, 26, 27). Pe secțiunea piesei, toate sudurile au arătat zonă afectată termic. Aceasta a fost cea mai extinsă pentru sudurile realizate la viteză minimă 6, 16, 26.

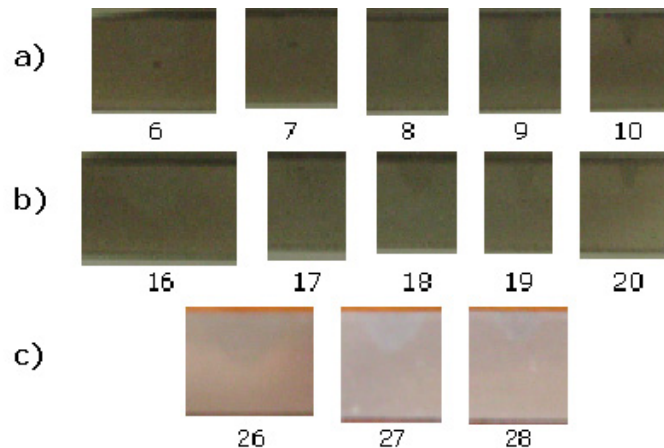


Figura 4.2 Imagini ale secțiunilor prin sudură în funcție de viteză (viteza crește de la stânga la dreapta) pentru defocalizările a) $\delta = 0$, b) $\delta = -2\text{ mm}$, c) $\delta = -4\text{ mm}$

Mărimile analizate au fost măsurate pe secțiune în zona stabilă, după sudarea a 8.5 cm, unde procesul a avut stabilitate maximă. Zona de secționare a fost din start predispusă să arate lățimi și profunzimi maxime ale sudurilor, prin aceasta se caracterizează în mod semnificativ procesul de sudare. Astfel, mărimile analizate caracterizează același stadiu al procesului. O descriere a mărimilor care fac obiectul analizelor următoare este prezentată în cele ce urmează.

Lățimea sudurii LS [mm] Lățimea sudurii a fost măsurată pe secțiune după prelucrarea metalografică a piesei tăiate pe secțiune în apropierea suprafeței, piesei (excluzând zona supraînălțată, acolo unde aceasta a existat). Lățimea sudurii a fost considerată între zonele afectate termic de o parte și de alta a sudurii

Profunzimea sudurii h[mm] Profunzimea sudurii se consideră ca fiind distanța de la suprafața piesei la partea inferioară a zonei topite. S-a exclus supraînălțarea sudurii acolo unde acesta a existat.

Raportul de formă F (LS/h) [-] Raportul de formă se consideră ca fiind raportul dintre lățimea sudurii LS și profunzimea sudurii h. Valorile mai mari decât 2 arată un regim de conducție. Valorile între 2 și 1 arată un regim intermediar între conducție și keyhole. În timp ce valorile mai mici decât 1 arată un regim keyhole. Raportul de formă este un parametru important care caracterizează procesul de sudare și capacitatea de a realiza o îmbinare sudată prin topire.

Aria topită a secțiunii prin sudură AT [mm²] Aceasta reprezintă suprafața zonei topite care apare pe secțiunea prelucrată metalografic. Aria topită este o măsură a zonei topite obținute în material.

Mărimile fizice anterior enumerate vor fi în continuare numite funcții obiectiv. Metoda de analiză depinde de modul cum au fost realizate experimentările. Astfel se va analiza separat seriile experimentale clasice și planul experimental factorial. Cele trei mărimi măsurate și cea calculată (raportul de formă F) arată principalele aspecte ale procesului de sudare. Ele sunt obținute pentru secțiunea prin sudură într-o etapă semnificativă a procesului de sudare. Funcțiile obiectiv apar corelate între ele, ansamblul informației fiind interpretabil. Pentru acest tip de date analiza propusă a fost una completă care a utilizat toate resursele puse la dispoziție de planurile experimentale și mijloacele de prelucrare matematică.

4.2 Analiza variațiilor funcțiilor obiectiv după seriile experimentale clasice

Experimentarea de tip clasic se caracterizează prin variația unei singure mărimi la un moment dat. Un număr suficient de puncte experimentale oferă posibilități multiple de reprezentare grafică. Astfel s-au realizat reprezentări grafice prin puncte, cu funcții spline și folosind funcții de regresie. Funcția de regresie este reprezentată de o formulă matematică folosită la trasarea unui grafic printre puncte, aceasta este însoțită de un coeficient de corelație. Funcțiile de regresie reprezintă un model experimental. Ele ajută la compararea între ele pentru diferite serii experimentale unde se variază aceeași mărime, prin compararea tendinței de variație. În același timp ele pot prezice valorile care s-ar obține pentru experimentări între punctele experimentale. Folosirea funcțiilor spline (interpolare folosind funcții spline) în reprezentările grafice pune în evidență prezența maximelor și minimelor. Acest lucru este util în optimizare prin posibilitatea de a identifica rapid minime și maxime legate direct de punctele experimentale. Aceste două tipuri de reprezentări grafice vor fi preferate celei prin puncte (interpolare cu funcții liniare care nu aduc un plus de cunoștințe în raport cu tabele de date prezentate în Anexa. Reprezentarea prin grafice a datelor aduce ca și cunoștințe aspectul calitativ al variațiilor și aspectul cantitativ în cazul folosirii funcțiilor de regresie.

Rezultatele experimentale s-au structurat pe variația funcțiilor obiectiv relativ la parametrii variației puterea P [kW] și viteza de sudare v [m/min] și la raportul lor, numit energia liniară E_l [J/cm]. Aceasta este o mărime care caracterizează procesul de sudare, fiind o mărime calculată ca fiind raportul dintre putere și viteză. Ea se utilizează în studiul proceselor de prelucrare termică. Folosirea energiei liniare conduce la concentrarea datelor experimentale apărute separat la variația puterii respectiv a vitezei. Prin aceasta se crește precizia în realizarea funcțiilor de regresie. Pentru fiecare din cele trei valori ale defocalizării s-a realizat o serie experimentală. Cele trei serii experimentale cu valori diferite ale defocalizării au fost reprezentate pe același grafic. Astfel efectul defocalizării este vizibil în modul în care evoluează procesul pentru fiecare din variațiile în funcție de putere și viteză și energia liniară.

Serile experimentale pentru variația puterii conțin 6 puncte experimentale. Variațiile acestora pentru funcțiile obiectiv considerate sunt reprezentate în figurile 4.2-4.5

Figura 4.2 prezintă variația lățimii sudurii LS în funcție de putere. Se observă că lățimea sudurii crește cu puterea. Această creștere poate fi considerată liniară dar întreruptă brusc la un moment dat pentru o valoare ridicată a puterii. Funcțiile de regresie din figură arată o creștere logaritmică. Tipul de funcție logaritmică modelează mai bine realitatea arătând că la puteri mari creșterea lățimii sudurii cu puterea este mai mică. Se obține apropierea de un palier

constant. Pentru toate cele trei valori ale defocalizării $\delta = 0$, $\delta = -2\text{ mm}$ și $\delta = -4\text{ mm}$, tipul de creștere este același. Se observă evoluția similară (însă foarte apropiată) a curbelor pentru defocalizările la $\delta = -2\text{ mm}$ și $\delta = -4\text{ mm}$. Pe tot domeniul experimental studiat, defocalizarea la $\delta = -4\text{ mm}$ care produce o pată mai mare a fascicolului laser pe suprafața piesei decât cea la $\delta = -2\text{ mm}$ va da lățimi ale sudurii mai mari. Pentru defocalizările $\delta = -2\text{ mm}$ și $\delta = -4\text{ mm}$ se respectă o proporționalitate între diametrul petei la suprafață și lățimea sudurii. Defocalizarea la suprafață $\delta = 0$ intersectează domeniul format de cele două focalizări în profunzimea piesei, se justifică astfel compararea situațiilor în care fascicolul laser este focalizat la suprafața piesei cu cele în care fascicolul laser este focalizat în interiorul piesei. Focalizarea la suprafața piesei $\delta = 0$ va produce cea mai mică pată pe suprafața piesei comparativ cu focalizările în interiorul piesei. Pentru puteri mai mici decât 1.3 kW focalizarea la suprafața piesei produce suduri mai late decât cele produse de focalizările în interiorul piesei. Peste puterea de 1.3 kW situația se inversează. Prin aceasta se arată că la puteri mici intensitatea ridicată (dată de o pată mică) are efect în creșterea lățimii sudurii în timp ce la puteri ridicate mărirea petei laserului pe suprafața piesei are efect asupra lățimii sudurii.

Figura 4.3 prezintă variația profunzimii sudurii h în funcție de puterea fascicolului laser. Tipul variației dat de funcția de regresie arată o creștere liniară a profunzimii sudurii cu puterea. Acest tip de variație este valabil pentru cele trei valori ale defocalizării. Pe cea mai mare parte a domeniului experimental se observă că pentru o putere dată profunzimea cea mai mare a sudurii se obține pentru focalizarea la suprafața piesei $\delta = 0$ urmată de focalizările în interiorul piesei la $\delta = -2\text{ mm}$ și apoi la $\delta = -4\text{ mm}$. Coborârea punctului focal produce creșterea diametrului petei fascicolului laser la suprafața piesei. Aceasta înseamnă scăderea intensității fascicolului laser pe suprafața piesei. Rezultatele experimentale arată că profunzimea sudurii este direct dependentă de intensitatea laserului la suprafața piesei prin creșterea liniară cu puterea și descreșterea cu coborârea punctului focal în interiorul piesei. Singura abatere de la forma generală de variație o constituie efectul defocalizării $\delta = -4\text{ mm}$ la puteri mici de până la 1.25 kW. Profunzimile arătate pentru această defocalizare depășesc succesiv în ordinea creșterii puterii pe cele la $\delta = 0$ și $\delta = -2\text{ mm}$ (care își mențin între ele tipul general de variație). Această variație arată ca aspect particular creșterea cuplajului dintre laser și material prin apariția fenomenului de keyhole. Pata mare a fascicolului laser pe suprafața piesei va produce cavitatea keyhole în baia de sudare iar partea din spate a fascicolului va avea o propagare în aceasta și va crește intensitatea absorbită și prin urmare și profunzimea sudurii. O pată mai mică a fascicolului laser pe suprafața piesei cum ar fi cea la $\delta = -2\text{ mm}$ nu poate pune în evidență fenomenul. Deși este de mică amploare ieșirea din dependența directă de intensitatea laserului a profunzimii sudurii este importantă.

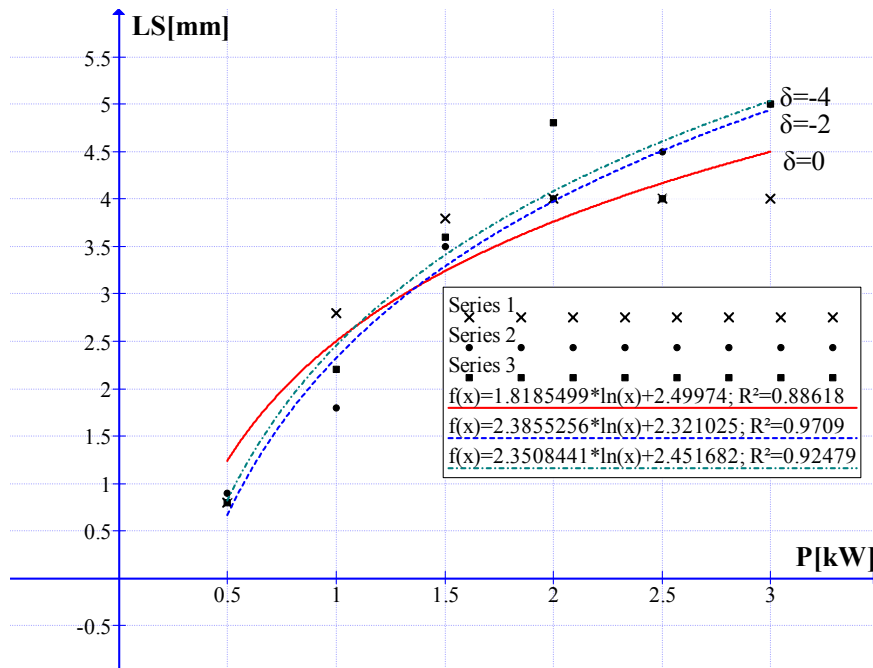


Figura 4.2 Lățimea sudurii LS în funcție de putere la viteza $v=0,6$ m/min

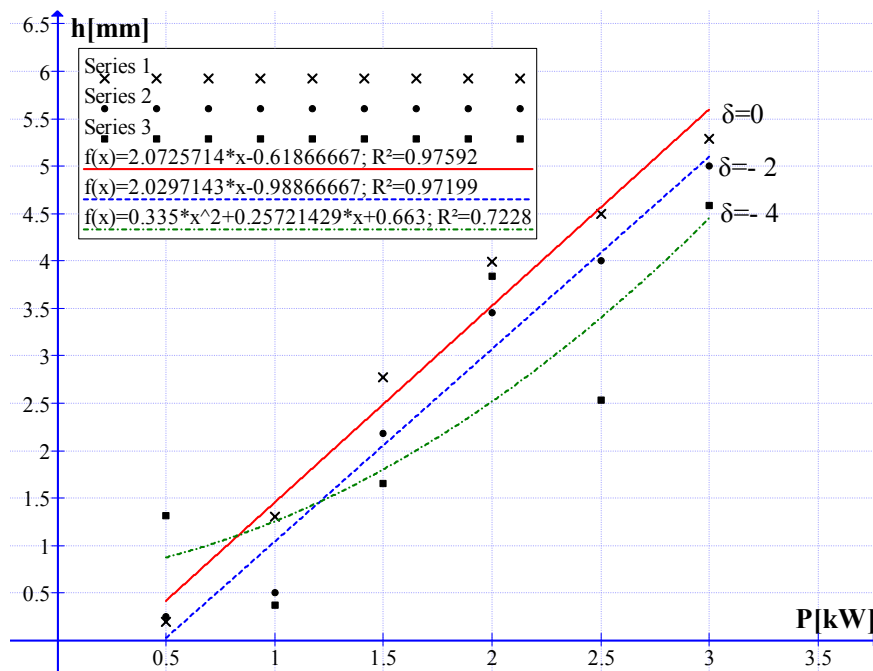


Figura 4.3: Profunzimea sudurii h funcție de putere la viteza $v=0,6$ m/min

Figura 4.4 prezintă variația raportului F (dintre lățimea și profunzimea sudurii) în funcție de putere. Valorile lui F peste 2 arată regimul de sudare prin

conducție, valorile între 2 și 1 arată un regim intermediar între conducție și keyhole iar valorile sub 1 arată regimul de sudare keyhole. Se observă tendința de scădere a raportului F pe măsura creșterii puterii. Creșterea puterii realizează trecerea între regimurile de sudare trecând de la regimul de conducție către regimul keyhole. Se observă că raportul F scade liniar cu puterea. Aceasta este cea mai potrivită apreciere a variației. Valorile cele mai mari ale raportului F la o putere dată se obțin pentru defocalizarea $\delta = -4\text{ mm}$ urmate de cele pentru $\delta = -2\text{ mm}$ și $\delta = 0$ pe domeniul experimental. Aceasta arată că raportul F crește cu lățimea sudurii (conform definiției acestuia) care la rândul ei este dependentă de pata lăsată de laser pe suprafața piesei. Pe de altă parte variația cu defocalizarea se interpretează în sensul că valorile scăzute ale lui F sunt asociate cu valori ridicate ale intensității fascicolului laser. Scăderea lui F cu creșterea intensității se manifestă atât prin tendința generală de scădere a lui F cu puterea cât și cu scăderea manifestată prin aducerea punctului focal către suprafața piesei. Scăderea lui F cu defocalizarea aduce și modificarea funcției de regresie astfel la $\delta = -4\text{ mm}$ scăderea este liniară, iar la $\delta = 0$ este una logaritmică. Aceasta sunt însă apropiate pe domeniul experimental. Scăderea logaritmică care se referă la $\delta = 0$ unde valorile sunt minime arată că se tinde către o valoare minimă de prag pentru raportul F care nu poate fi depășită prin creșterea intensității la suprafața piesei. Se observă de asemenea și o apropiere a valorilor pentru raportului F pentru cele trei defocalizări la capetele domeniului experimental. Acestea arată că defocalizarea are un rol scăzut la stabilirea celui mai pronunțat regim de conducție respectiv a celui mai pronunțat regim keyhole.

Figura 4.5 prezintă variația ariei topite a sudurii AT în funcție de putere. Se observă o tendință de creștere liniară a ariei topite cu puterea. Aceasta este valabilă pentru toate cele trei defocalizări și este arătată de funcțiile de regresie liniare. Pe cea mai mare parte a domeniului experimental aria topită cea mai mare se obține pentru focalizarea la suprafață, urmată de cea la defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$ respectiv $\delta = -4\text{ mm}$. Prin acest tip de variație se arată că aria topită este proporțională cu intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei. Intensitatea se manifestă prin creșterea generală în funcție de putere și prin creșterea datorată micșorării petei focale prin focalizarea către suprafață. La partea superioară a domeniului experimental se observă o apropiere de tendinței de creștere a ariei topite pentru defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$ de cea $\delta = 0$. Această apropiere poate fi explicată prin prezența keyhole. Deși intensitatea la suprafață este mai redusă în cazul $\delta = -2\text{ mm}$ puterea ridicată conduce la formarea keyhole. Menținerea iradierii în interiorul keyhole datorită unei pete mai mari a laserului conduce la creșterea cuplajului radiației laser în material efectul asupra ariei topite fiind similar cu cel obținut la $\delta = 0$.

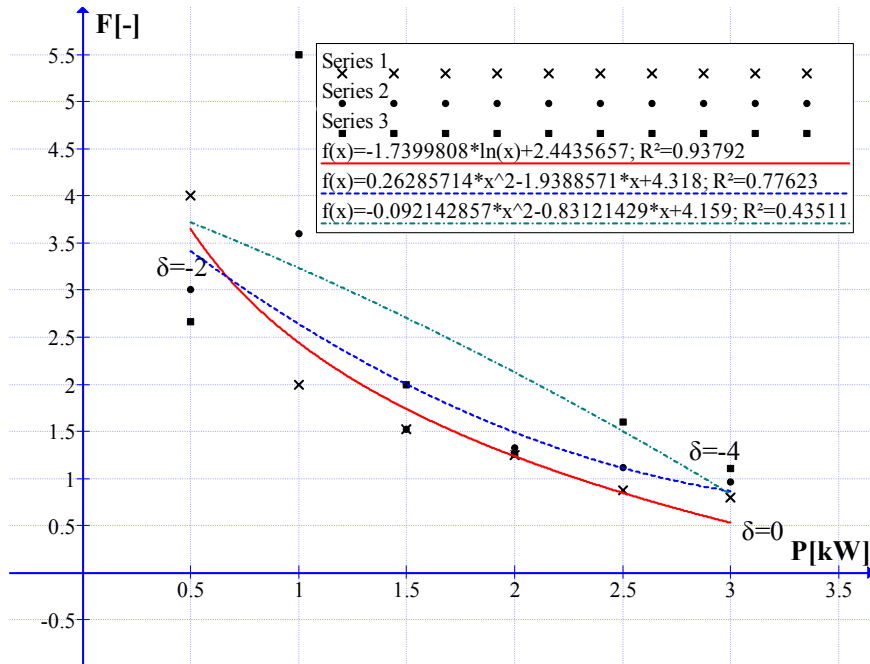


Figura 4.4: Variația raportului dintre lățimea și profunzimea sudurii F în funcție de putere la viteza de $v=0,6$ m/min

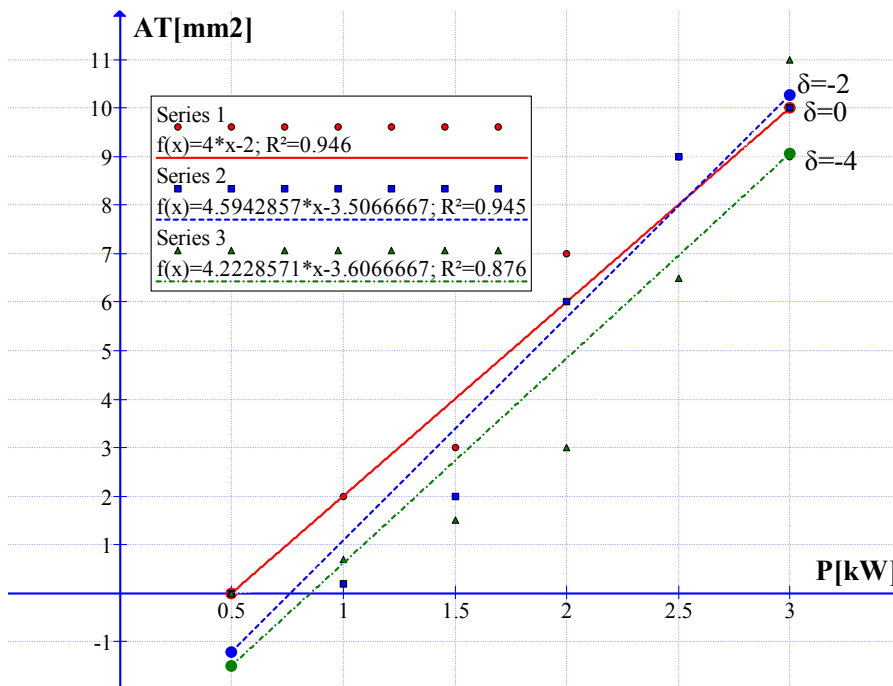


Figura 4.5: Aria topită a sudurii AT funcție de putere la viteza $v=0,6$ m/min

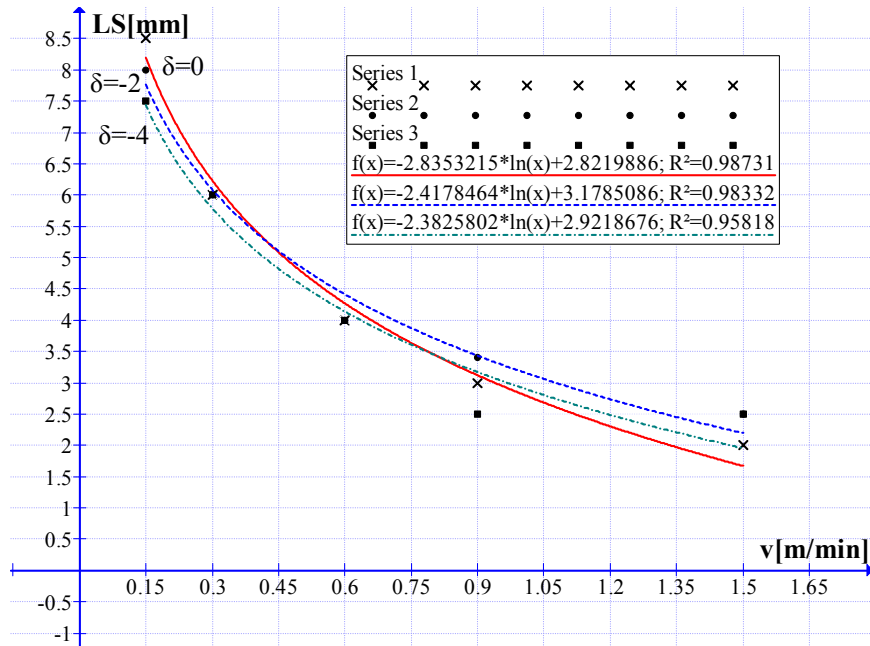


Figura 4.6: Variația lățimii sudurii LS în funcție de viteză la puterea $P=2kW$

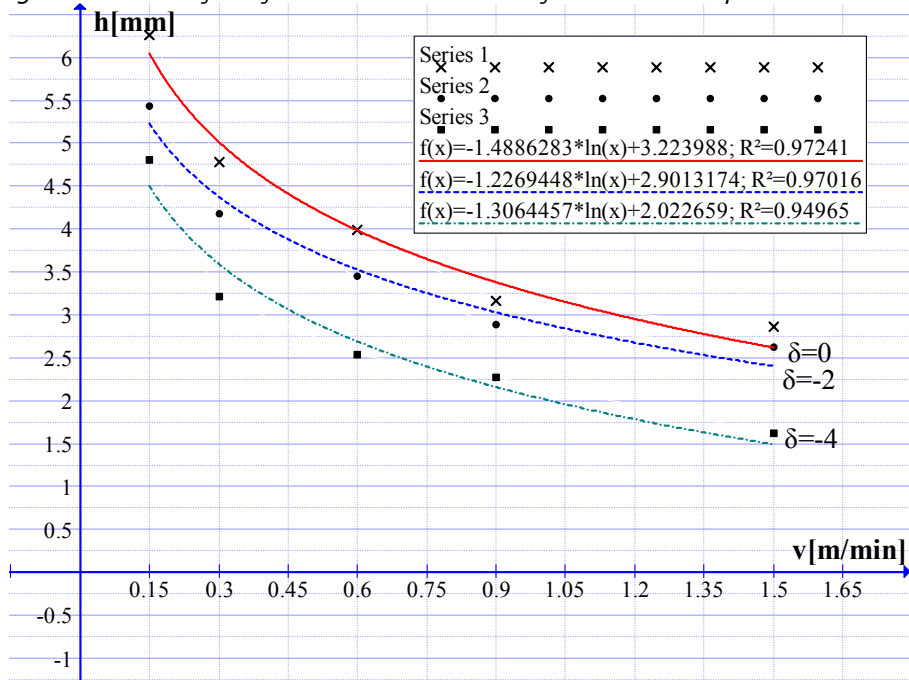


Figura 4.7: Variația profunzimii sudurii h în funcție de viteză la puterea $P=2kW$
 Serile experimentale pentru variația vitezei au conținut 5 puncte experimentale. Acestea sunt reprezentate în figurile 4.6-4.9

Figura 4.6 arată variația lățimii sudurii LS în funcție de viteza de sudare. Se observă că lățimea sudurii scade logaritmice cu viteza de sudare. Această variație este valabilă pentru toate cele trei valori ale defocalizării. Creșterea vitezei de sudare înseamnă scăderea timpului de interacțiune. Se observă că există tendința de a obține suduri mai late la defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$ decât pentru cele la $\delta = -4\text{ mm}$. Prin aceasta se arată că pentru aceste experimentări lățimea sudurii depinde de intensitatea laserului la suprafața piesei. Până la viteza de 0.45 m/min focalizarea la suprafața piesei $\delta = 0$ va produce cele mai late suduri. Peste această viteză lățimea sudurilor scade ajungând cele mai mici la sfârșitul domeniului experimental. Acest lucru se datorează faptului că pe de o parte focalizarea la suprafață asigură intensitatea cea mai ridicată iar pe de altă parte datorită petei reduse timpul de interacțiune este cel mai mic. Creșterea vitezei scade și mai mult timpul de interacțiune iar iradierea devine inefficientă.

Figura 4.7 arată variația profunzimii sudurii h în funcție de viteza de sudare. Profunzimea sudurii scade cu viteza. Scăderea este de tip logaritmice și este valabilă pentru toate cele trei valori ale defocalizării. La o viteză dată pentru defocalizarea $\delta = 0$ se produce sudura cea mai adâncă fiind urmată de cea la $\delta = -2\text{ mm}$, respectiv $\delta = -4\text{ mm}$. Scăderea profunzimii are loc odată cu creșterea diametrului petei fascicolului laser la suprafața piesei. Prin această variație valabilă pe tot domeniul experimental se arată că profunzimea sudurii este puternic dependentă de intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei. Această dependență se observă și prin spațierea importantă între seriile experimentale corespunzătoare celor trei defocalizări. Se observă că profunzimea sudurii este mai puternic influențată de mărimea petei laserului pe suprafața piesei decât lățimea sudurii. Scăderea exponențială datorată reducerii timpului de interacțiune, prin creșterea vitezei de sudare, este mai puternică pentru lățimea sudurii decât pentru profunzimea sudurii.

Figura 4.8 prezintă variația raportului F (raportul între lățimea și profunzimea sudurii) în funcție de viteza de sudare. Raportul F scade cu viteza de sudare. Tendința de scădere este una liniară pentru toate cele trei defocalizări produc această scădere. Valorile raportului F pentru seriile unde s-a variat viteza de sudare sunt sub 2. Aceasta arată că sudurile realizate au fost în regimul intermediar (între conducție și keyhole) și în regimul keyhole. Raportul F depinde de intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei. Pentru focalizarea la suprafață $\delta = 0$ unde intensitatea a fost cea mai mare valorile lui F sunt minime. Mai ridicate sunt valorile la $\delta = -2\text{ mm}$ și apoi mai ridicate valorile la $\delta = -4\text{ mm}$. Această tendință se păstrează pe tot domeniul experimental. Curbele de regresie sunt depărtate unele de altele ceea ce arată că creșterea intensității obținută prin variația defocalizării este puternică. Scăderea raportului F cu viteza de sudare este mai mică și mai puțin rapidă decât cea datorită puterii. Aproximarea prin funcție pătratică a variației raportului F pentru defocalizarea $\delta = -4\text{ mm}$ arată că scăderea raportului F este limitată de diametrul petei fascicolului laser pe suprafața piesei. Se observă un minim apropiat de viteza 0.75 m/min. La viteză mare, timpul de interacțiune scade iar topirea materialului se dezvoltă la suprafața piesei, frontul de topire nu mai pătrunde în material, crește lățimea sudurii și prin urmare și raportul F :

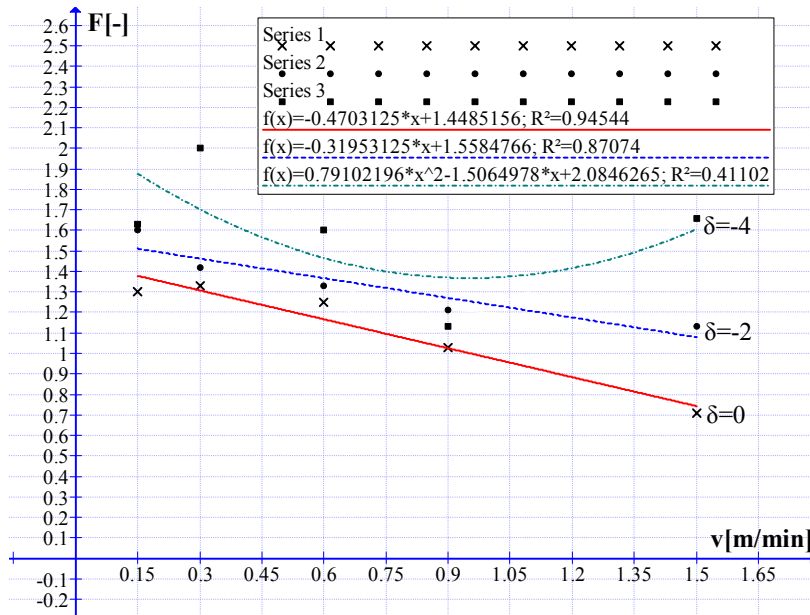


Figura 4.8: Variația raportului dintre lățimea și profunzimea sudurii în funcție de viteză la puterea $P=2kW$

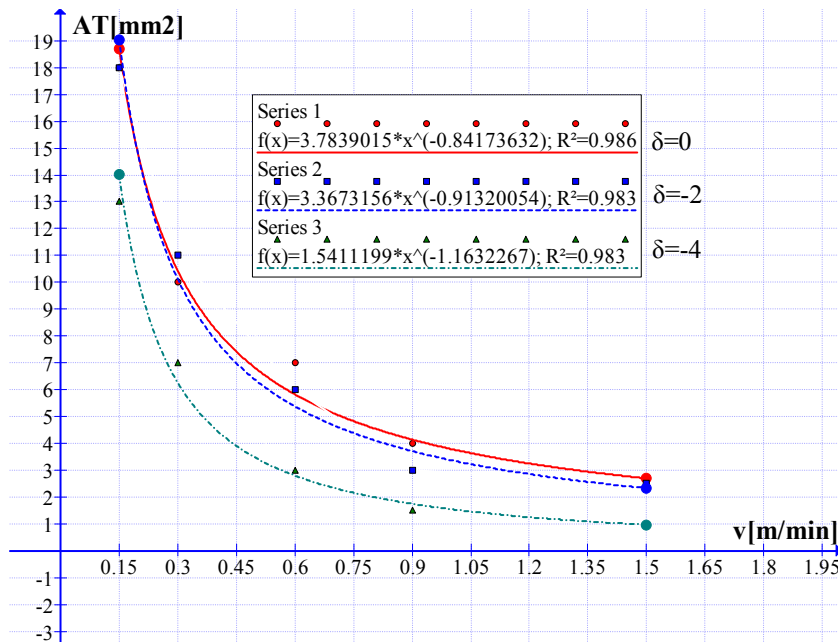


Figura 4.9: Aria topită a sudurii AT in funcție de de viteză la puterea $P=2kW$

Figura 4.9 prezintă variația ariei topite a sudurii AT în funcție de viteza de sudare. Se observă că pentru toate cele trei valori ale defocalizării se obține o scădere exponențială destul de bruscă a ariei topite cu creșterea vitezei de sudare. Pe tot domeniul experimental studiat valorile cele mai mari ale ariei topite au fost obținute

pentru focalizarea la suprafața piesei $\delta = 0$ urmate de cele în interiorul piesei la $\delta = -2\text{ mm}$ respectiv $\delta = -4\text{ mm}$. Prin aceasta se arată că aria topită depinde de intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei. Aria topită pentru defocalizările $\delta = 0$ și $\delta = -2\text{ mm}$ este foarte apropiată. La defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$ intensitatea la suprafața piesei scade dar crește diametrul petei fascicolului laser pe suprafața piesei. Prin aceasta se favorizează absorția radiației laser în keyhole. Astfel crește cuplajul dintre radiația laser și material iar efectul general asupra ariei topite este comparabil cu cel dat de un nivel superior de iradiere.

Variația cu energia liniară este prezentată prin serii experimentale care conțin 10 puncte experimentale pentru fiecare defocalizare, datorită considerării simultane a experimentărilor anterioare unde s-a variat puterea și viteza de sudare. Aceste rezultate sunt prezentate în figurile 4.10-4.13.

Figura 4.10 prezintă variația lățimii sudurii LS în funcție de energia liniară. Se obține o creștere logaritmică a lățimii sudurii LS cu energia liniară pentru cele trei valori ale defocalizării. Funcțiile de regresie pentru cele trei defocalizări sunt foarte apropiate între ele astfel încât se poate spune că lățimea sudurii este independentă de defocalizare. Aceasta face ca ea să fie dependentă numai de putere și de viteza de sudare prin energia liniară. Acest lucru poate fi înțeles prin compensarea între ele a efectelor defocalizării în baia de sudare. Astfel creșterea cupajului între radiația laser și material este favorizat de focalizarea în interiorul piesei prin creșterea absorției în keyhole dată de propagarea convergentă a radiației în keyhole și timpul de interacțiune mai mare asociat cu pata mai mare a fascicolului laser la suprafața piesei dar în același timp intensitatea mai scăzută la suprafața piesei afectează toate fenomenele termice având un efect contrar.

Figura 4.11 prezintă variația profunzimii sudurii h în funcție de energia liniară. Se observă o creștere exponențială pentru cele trei valori ale defocalizării. Pe tot domeniul experimental la o valoare a energiei liniare profunzimea cea mai mare se obține la $\delta = 0$, urmată de cea pentru $\delta = -2\text{ mm}$, respectiv pentru cea la $\delta = -4\text{ mm}$. Se arată astfel dependența profunzimii de intensitatea laserului la suprafața piesei. Se remarcă că curbele de regresie corespunzătoare celor trei defocalizări se depărtează puternic unele de altele pe măsura creșterii energiei liniare. Aceasta arată că pentru energii liniare ridicate defocalizarea are efect semnificativ asupra profunzimii sudurii.

Figura 4.12 prezintă variația raportului F (între lățimea și profunzimea sudurii) în funcție de energia liniară. Reprezentarea este realizată cu funcții spline. Se observă prezența de maxime și minime. Tendința generală este de scădere a raportului F cu energia liniară, însă există numeroase variații particulare. Se observă că pentru toate cele trei defocalizări forma de variație și poziția maximelor și minimelor este similară. La energii liniare mici valorile lui F pot situa sudura atât în regimul de conducție cât și în regimul keyhole. Peste valoarea de 1.5 kJ/cm valorile raportului F arată numai regimul keyhole (incluzând regimul intermediar). Interesul de studiu se va concentra pe studiul valorilor minime ale raportului F . La începutul domeniului experimental până la energia liniară de 0.7 kJ/cm valoarea minimă pentru raportul F este dată de defocalizarea $\delta = -4\text{ mm}$ urmată de defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$ respectiv defocalizarea $\delta = 0$. Această dependență este dată de creșterea lățimii sudurii datorită creșterii petei fascicolului laser pe suprafața piesei. Pe restul domeniului experimental situația se inversează valoarea minimă pentru raportul F fiind dată de defocalizarea $\delta = 0$ urmată de $\delta = -2\text{ mm}$ și $\delta = -4\text{ mm}$. Această

comportare este asociată cu creșterea rolului intensității fascicolului laser în creșterea profunzimii sudurii.

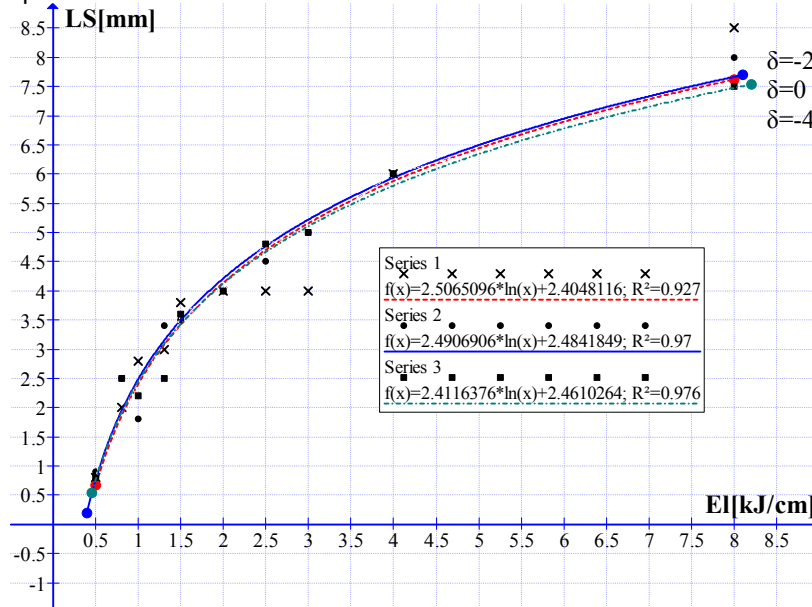


Figura 4.10: Lățimea sudurii LS în funcție de de energia liniară

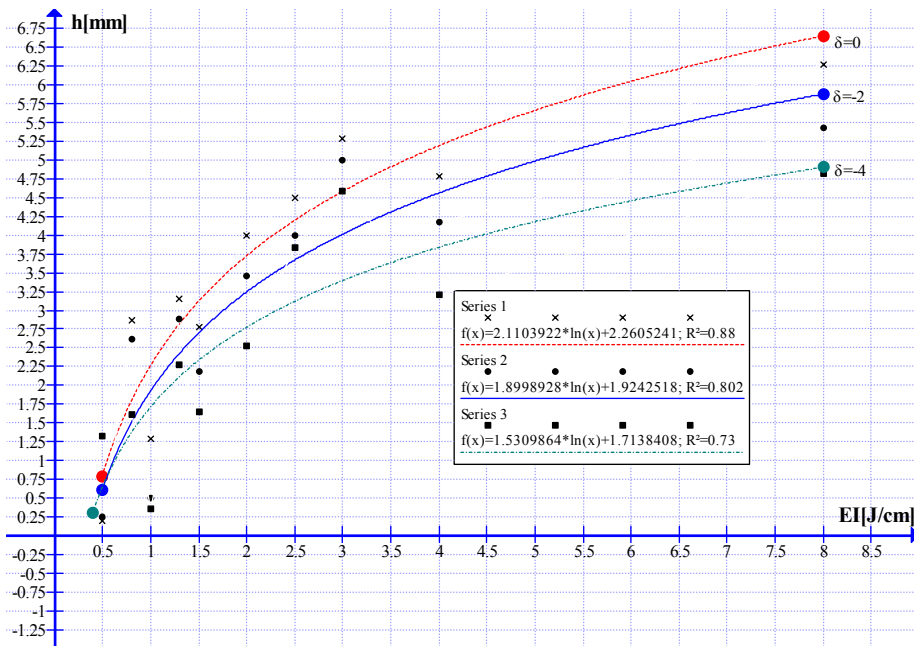


Figura 4.11: Profunzimea sudurii h în funcție de de energia liniară

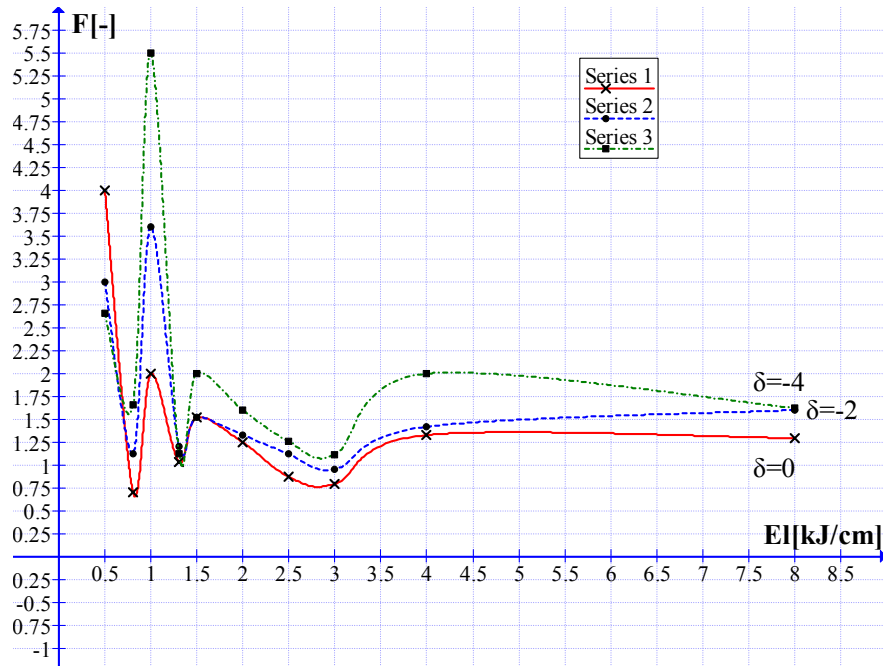


Figura 4.12: Raportul dintre lățimea și profunzimea sudurii F în funcție de energia liniară

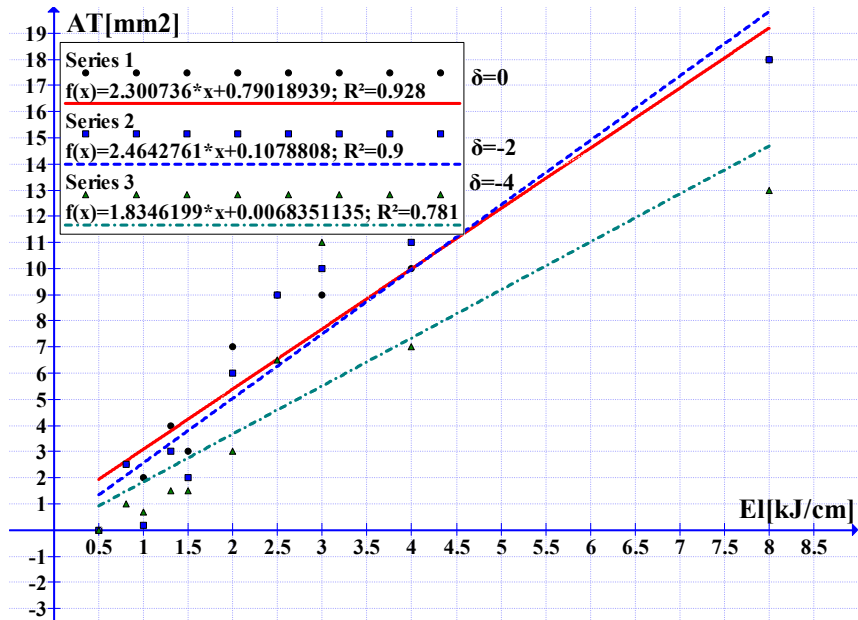


Figura 4.13: Aria topită AT în funcție de energia liniară

Minimele pentru raportul F se obțin la 0.75 kJ/cm, 1.3 kJ/cm respectiv 2.8 kJ/cm. Primul minim are valoare minimă absolută , ambele minime regimul de sudare

keyhole. Apariția acestor minime este asociată cu condiții favorabile de creștere a cuplajului dintre radiația laser și material asociate cu valori particulare ale energiei liniare. Se arată astfel prezența și contribuția keyhole. La energii liniare scăzute minimele alternează cu maxime fiind variații puternice. La energii liniare mari tendința este apropierea raportului F de o valoare constantă care însă nu este cea mai mică. Se arată astfel că creșterea energiei liniare nu e o soluție în obținerea unui regim keyhole extrem, soluția fiind dată de valori particulare ale energiei liniare care apar mai frecvent la energii liniare mici.

Figura 4.13 prezintă variația pentru aria topită a sudurii AT în funcție de energia liniară. Se observă că aria topită crește liniar cu energia liniară pentru cele trei valori ale defocalizării. Pe tot domeniul experimental se obțin arii topite mai mari pentru defocalizările la $\delta = 0$ și $\delta = -2\text{ mm}$ (care sunt foarte apropiate între ele) comparativ cu cele de la $\delta = -4\text{ mm}$. Această variație se datorează scăderii intensității la suprafață prin creșterea petei. Diferența devine mai mare pe măsura creșterii energiei liniare. Aproximarea valorilor ariei topite pentru $\delta = 0$ și $\delta = -2\text{ mm}$ se explică prin prezența fenomenului de keyhole care crește cuplajul la $\delta = -2\text{ mm}$ determinând creșterea ariei topite. Până la valoarea de 4 k J/cm ariile topite mai mari sunt obținute pentru focalizarea la suprafață, apoi pentru energii liniare mari ariile topite mai mari sunt date de defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$. Se arată astfel că o pată focală mare și energie liniară ridicată conduc la creșterea ariei topite și compensând nivelul mai scăzut al intensității laserului la suprafața piesei.

Analiza variațiilor pe seriile experimentale clasice a funcțiilor obiectiv studiate a arătat că există variații care pot fi caracterizate ca fiind „normale”. Acestea sunt legate de intensitatea laserului suprafața piesei (controlată prin variația puterii și a defocalizării care modifică diametrul petei la suprafață) și de viteza de sudare (care modifică timpul de interacțiune dintre laser și material). Ne vom referi la funcțiile obiectiv măsurate. Astfel lățimea sudurii, profunzimea sudurii și aria topită cresc cu puterea laserului și cu energia liniară și scad cu viteza de sudare. Tipurile de variații observate sunt comparabile cu cele obținute în alte studii și au o acceptare generală. Peste acest tip de variații se suprapun condiții particulare în care scăderea intensității nu are efectul așteptat deoarece crește cuplajul energiei în keyhole deoarece pata focală este mai mare. De asemenea există puncte experimentale care deși contribuie la forma generală a variațiilor prezintă de fapt situații în care profunzimea sudurii crește în defavoarea lățimii sudurii. Aceasta este arătată de raportul F prin valori particulare și pune în evidență fenomenul de keyhole. Analiza efectuată arată că fenomenul de keyhole poate fi pus în evidență prin studiul caracteristicilor geometrice ale sudurii și exprimat cantitativ prin modelele matematice date de funcțiile de regresie.

4.3 Analiza variațiilor funcțiilor obiectiv după experimentările factoriale

Experimentările realizate după planuri experimentale factoriale permit prezentarea variației funcției obiectiv ca funcție de 3 sau 2 variabile care reprezintă factorii de influență. Această variație duce la obținerea unor formule de corelație între valoarea funcției obiectiv și valorile factorilor de influență numite și „model matematic” sau „model empiric”. Tipul acestei funcții este unul prestabilit fiind un polinom în care apar ca variabile valorile factorilor de influență și produsele

între aceștia numite și interacțiuni. Alegerea acestui tip de model este legată de problema realizării ierarhizării factorilor de influență. Această constă în a stabili care din factorii de influență respectiv interacțiunile lor are cea mai mare contribuție în stabilirea valorii funcției obiectiv. Contribuția variațiilor este analizată prin metoda de analiză a variațiilor ANOVA.

Modelul matematic, scris în sistemul codificat, prezintă principalele informații asupra variațiilor astfel:

- ierarhia factorilor de influență este dată de modul coeficientului de regresie, prin comparația modulelor ;
- tipul variației (crescătoare sau descrescătoare) este dată de semnul coeficientului de regresie.

La aceste informații se adaugă cele date de tabele ANOVA, dintre acestea cele mai importante sunt coeficienții de corelație care dau valabilitatea modelului pe domeniul experimental.

Diagramele Pareto arată ierarhizarea factorilor de influență și semnificația statistică a variației date de model. Suprafața de răspuns prezintă grafic (tridimensional) funcția obiectiv în funcție de variația factorilor de influență. Diagramele Pareto și Suprafețele de răspuns sunt metode de studiu auxiliare care expun rezultatele într-o formă mai accesibilă.

Metoda de studiu abordată este aceea de a prezenta pentru toate prelucrările efectuate modelele matematice însoțite de coeficienții de corelație. Pentru cele care dau informații complete se vor prezenta și discuta diagramele Pareto și Suprafețele de răspuns.

4.3.1 Prezentarea generală a modelelor matematice (formule de corelație)

Formulele de corelație sunt prezentate pentru toate cele trei planuri factoriale analizate. Acestea sunt prezentate în tabelul următor. Pentru fiecare analiză sunt prezentate două forme ale formulei de corelație. Formula de corelație care conține valori codificate ale factorilor de influență arată ierarhia factorilor de influență (respectiv a interacțiunilor dintre aceștia) prin valoarea în modul a acestora și modul în care influențează prin valoarea prin semnul acesteia. Astfel semnul pozitiv arată o creștere iar semnul negativ o descreștere. Pentru a prezice valori ale funcției obiectiv pe acest tip de formulă este necesar transformarea valorilor reale ale factorilor de influență în sistemul codificat. Pentru a compensa acest neajuns este prezentată o a doua formă a formulei de corelație în care apar factorii de influență în valori reale, adică în sistemul de unități de măsură folosit pentru factorii de influență în experiment. Aceasta a fost realizată prin substituția în prima formă a legii de corelație pentru fiecare factor în parte.

Formule de corelație alături de coeficienții de corelație rezultați în urma studiului statistic raportat la valorile obținute în punctul central reprezintă principalul rezultat experimentale. Acest tip de analiză este prezentată pentru planurile experimentale A,B,C, în tabelele (4.1-4.6) cu cele două situații în care se consideră toate interacțiunile între factorii de influență, respectiv în situația în care nu se consideră aceste interacțiuni. Forme ale acestor formule de corelație sunt utilizate la realizarea diagramelor pareto de ierarhizare a factorilor de influență și realizarea suprafețelor de răspuns. Analiza detaliată a variațiilor o se efectua la studiul diagramelor pareto și suprafețelor de răspuns deoarece acestea sunt mai explicite comparativ cu modelul matematic.

Ca observație generală se precizează că toate formulele obținute au coeficienți de corelație ridicății. Aceasta înseamnă că ele pot fi utilizate pentru a efectua predicții asupra funcției obiectiv.

Tabel 4.1 Modelele matematice după planul factorial A (cu interacțiuni A1)

Funcția obiectiv (Analiza A1)	Modelul matematic (formula de corelație) în valori reale (1) respectiv codificate (2) ale factorilor de influență , coeficienții de corelație
Lățimea sudurii LS[mm]	$(1) \quad LS = 2.77 + 0.925A - 0.675B - 0.125C \quad (4.1)$ $- 0.175AB + 0.375AC - 0.125BC - 0.125ABC$ $(2) \quad LS = 0.7465 + 0.4335P - 0.999v + 0.5837\delta - 0.111Pv -$ $0.0837P\delta - 0.2775v\delta + 0.2775Pv\delta \quad (4.2)$ $R^2 = 0.99 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.96$
Profundimea sudurii h[mm]	$h = 2.71 + 1.91875.A - 0.40375.B - 0.34875.$ $(1) \quad C - 0.20375.AB - 0.04875.AC - 0.07625.BC -$ $0.17625.ABC \quad (4.3)$ $h = -1.511 + 1.9033P - 0.60492v - 0.3922\delta$ $(2) \quad - 0.06105Pv + 0.45924P\delta - 0.61316v\delta + 0.39116Pv\delta \quad (4.4)$ $R^2 = 0.98 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.95$
Raportul F[-]	$F = 1.7363 - 1.0587A + 0.0662B + 0.1312C -$ $(1) \quad 0.0987AB - 0.0337AC - 0.3087BC + 0.3262ABC \quad (4.5)$ $F = 5.677 - 1.622P - 1.548v - 2.437\delta + 0.505Pv +$ $(2) \quad 0.793P\delta + 2.133v\delta - 0.724Pv\delta \quad (4.6)$ $R^2 = 0.90 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.56$
Aria topită AT [mm ²]	$AT = 3.61 + 2.8625 - 1.7875.B - 0.2875.C$ $(1) \quad - 1.3375.AB + 0.1625.AC - 0.0875.BC - 0.5375.ABC \quad (4.7)$ $AT = -7.096 + 7.393P + 4.162v + 2.913\delta - 4.162Pv -$ $(2) \quad 1.414P\delta - 2.192v\delta + 1.193Pv\delta \quad (4.8)$ $R^2 = 0.97 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.90$

Există tendința ca coeficienții de corelație să fie mai buni pentru situația în care se consideră interacțiunile între factorii de influență decât în situația în care acestea sunt eliminate. Planurile factoriale 2² au rezultate apropiate, ceea ce arată că defocalizarea are contribuție relativ redusă la valoarea funcției obiectiv. Analiza următoare se va desfășura pe următoarele direcții:

Tabel 4.2 Modelele matematice după planul factorial A (fără interacțiuni A2)

Funcția obiectiv (Analiza A2)	Modelul matematic (formula de corelație) în valori reale (1) respectiv codificate (2) ale factorilor de influență , coeficienții de corelație
Lățimea sudurii LS [mm]	(1) $LS = 2.77 + 0.925 A - 0.675 B - 0.125 C$ (4.9) (2) $LS = 2.367 + 0.925 P - 1.498 v + 0.125 \delta$ (4.10) $R^2 = 0.86 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.79$
Profunzimea sudurii h [mm]	(1) $h = 2.71 + 1.91875 A - 0.40375 B - 0.34875 C$ (4.11) (2) $h = -0.535 + 1.918 P - 0.896 v + 0.348 \delta$ (4.12) $R^2 = 0.96 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.95$
Raportul F[-]	(1) $F = 1.736 - 1.05875 A + 0.06625 B + 0.13125 C$ (4.13) (2) $F = 3.83 - 1.058 P + 0.147 v - 0.131 \delta$ (4.14) $R^2 = 0.76 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.64$
Aria topită AT [mm ²]	(1) $AT = 3.61 + 2.8625 A - 1.7875 B - 0.2875 C$ (4.15) (2) $AT = 1.762 + 2.865 P - 3.968 v + 0.287 \delta$ (4.16) $R^2 = 0.82 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.73$

Tabel 4.3 Modelele matematice după planul factorial B (cu interacțiuni B1)

Funcția obiectiv (Analiza B1, $\delta = 0$)	Modelul matematic (formula de corelație) în valori reale (1) respectiv codificate (2) ale factorilor de influență , coeficienții de corelație
Lățimea sudurii LS[mm]	(1) $LS = 2.8833 + 0.55 A - 0.55 B - 0.05 AB$ (4.17) (2) $LS = 0.7348 + 0.4335 P - 0.999 v - 0.111 P v$ (4.18) $R^2 = 0.992 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.981$
Profunzimea sudurii h [mm]	(1) $h = 3 + 1.9675 A - 0.3275 B - 0.0275 A B$ (4.19) (2) $h = -1.566625 + 1.903425 P - 0.60495 v - 0.06105 P v$ (4.20) $R^2 = 0.998 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.995$
Raportul F[-]	(1) $F = 1.535 - 1.025 A - 0.375 B - 0.425 A B$ (4.21) (2) $F = 6.43925 - 2.01525 P + 2.7195 v - 0.9435 P v$ (4.22) $R^2 = 0.88 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.71$
Aria topită AT[mm ²]	(1) $AT = 3.866 + 2.7 A - 1.7 B - 0.8 A$ (4.23) (2) $AT = -1.7664 + 0.836 P - 0.222 v - 1.776 P v$ (4.24) $R^2 = 0.95 \quad R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.88$

- Analiza planului factorial A cu interacțiuni A1. Aceasta reprezintă o abordare completă a variațiilor asupra funcțiilor obiectiv produse de factorii de influență (puterea, viteza de sudare, defocalizarea) și de interacțiunile dintre aceștia.

Tabel 4.4 Modelele matematice după planul factorial B (fără interacțiuni B2)

Funcția obiectiv (Analiza B2) $\delta = 0$	Modelul matematic (formula de corelație) în valori reale (1) respectiv codificate (2) ale factorilor de influență , coeficienții de corelație
Lățimea sudurii LS [mm]	(1) $LS = 2.8833 + 0.55A - 0.55B$ (4.25) (2) $LS = 0.5018 + 0.55P - 1.221v$ (4.26) $R^2 = 0.988 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.980$
Profunzimea Sudurii h [mm]	(1) $h = 3 + 1.96A - 0.32B$ (4.27) (2) $h = -1.694775 + 1.9675P - 0.72705v$ (4.28) $R^2 = 0.998 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.996$
Raportul F[-]	(1) $F = 1.535 - 1.025A + 0.375B$ (4.29) (2) $F = 4.45875 - 1.025P + 0.8325v$ (4.30) $R^2 = 0.76 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.61$
Aria topită AT [mm ²]	(1) $AT = 3.8666 + 2.7A - 1.7B$ (4.31) (2) $AT = -5.4944 + 2.7P - 3.774v$ (4.32) $R^2 = 0.89 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.83$

Tabel 4.5 Modelele matematice după planul factorial C (cu interacțiuni C1)

Funcția obiectiv (Analiza C1) $\delta = -2$	Modelul matematic (formula de corelație) în valori reale (1) respectiv codificate (2) ale factorilor de influență , coeficienții de corelație
Lățimea sudurii LS [mm]	(1) $LS = 0.5826 + 1.999P - 0.444v - 0.666Pv$ (4.33) (2) $LS = 2.7166 + 1.3 \cdot A - 0.8 \cdot B - 0.3 \cdot A \cdot B$ (4.34) $R^2 = 0.98 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.95$
Profunzimea sudurii h [mm]	(1) $h = 2.5383 + 1.87 \cdot A - 0.48 \cdot B - 0.38 \cdot A \cdot B$ (4.35) (2) $h = -1.8541 + 2.7554P + 0.6216v - 0.8436Pv$ (4.36) $R^2 = 0.94 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.86$
Raportul F[-]	(1) $F = 1.71 - 1.0925A - 0.2425B + 0.2275AB$ (4.37) (2) $F = 5.520175 - 1.622575P - 1.548450v + 0.505050Pv$ (4.38) $R^2 = 0.79 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.49$
Aria topită AT [mm ²]	(1) $AT = 3.4843 + 3.025A - 1.875B - 1.875AB$ (4.39) (2) $AT = -6.93545 + 7.39375P + 4.16250v - 4.1625Pv$ (4.40) $R^2 = 0.95 \quad R^2(\text{adj. for } d.f) = 0.89$

- Analiza planului factorial A fără interacțiuni A2 . Prin aceasta abordare se realizează strict ierarhia factorilor de influență, în absența interacțiunilor. Comparația cu analiza A1 a suprafețelor de răspuns va arăta trecerea de la o suprafață reprezentată după o funcție pătratică A1 la o suprafață reprezentată după o funcție liniară. Tabele 4.1 și 4.2 arată o scădere a coeficienților de corelație în cazul renunțării la interacțiuni.

- **Analiza separată a planurilor factoriale B și C (cu interacțiuni B1 respectiv C1).** Aceasta analiză elimină defocalizarea , considerat ca factor nesemnificativ reducând analiza la factorii de influență putere și viteză. Pe de altă parte analiza comparativă a celor două planuri factoriale B și C arată sub o altă formă decât planul A efectul defocalizării. Analiza planurilor B și C (fără interacțiuni B2 respectiv C2) nu aduce un plus de cunoștințe comparativ cu cazul în care s-au considerat interacțiunile. Pentru aceste analiza s-au prezentat anterior modelele canonice anterior în tabelele 4.4 respectiv 4.6.

Tabel 4.6 Modelele matematice după planul factorial C(fără interacțiuni C2)

Funcția obiectiv (Analiza C2 $\delta = -2$)	Modelul matematic (formula de corelație) în valori reale (1) respectiv codificate (2) ale factorilor de influență , coeficienții de corelație
Lățimea sudurii LS [mm]	(1) $LS = 2.7166 + 1.3A - 0.8B$ (4.41) (2) $LS = 1.9806 + 1.3P - 1.776v$ (4.42) $R^2 = 0.94$ $R^2(adj. for d.f) = 0.91$
Profunzimea sudurii h [mm]	(1) $h = 2.538 + 1.87A - 0.48B$ (4.43) (2) $h = -0.833 + 1.87P - 1.0656v$ (4.44) $R^2 = 0.91$ $R^2(adj. for d.f) = 0.85$
Raportul F[-]	(1) $F = 1.71 - 1.0925A - 0.2425B$ (4.45) (2) $F = 4.46 - 1.0925P - 0.53835v$ (4.46) $R^2 = 0.76$ $R^2(adj. for d.f) = 0.61$
Aria topită AT [mm ²]	(1) $AT = 3.48 + 3.025A - 1.875B$ (4.47) (2) $AT = 1.8025 + 3.025P - 4.16250v$ (4.48) $R^2 = 0.75$ $R^2(adj. for d.f) = 0.58$

4.3.2 Analiza diagramelor pareto și a suprafețelor de răspuns pentru funcțiile obiectiv care descriu secțiunea sudurii

Interpretarea diagramelor pareto standartizat s-a realizat din perspectiva ierarhizării factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia. De asemenea s-a considerat semnificația statistică a acestora dată de linia punctată. Aceasta înseamnă că modelul empiric propus poate prezice acest factor cu o probabilitate mai mică decât 0.05.(vezi tabelele ANOVA din Anexa 2). Interpretarea diagramelor Pareto se va realiza prin interpretarea ierarhiei referitor la factorii de

influență semnificativi și la sensul de variație (creștere descreștere) asupra funcției obiectiv generată de creșterea factorului de influență sau a interacțiunii respective. Suprafețele de răspuns fost interpretate din punctul de vedere al identificării condițiilor extreme. Pentru fiecare funcție obiectiv există o valoare minimă sau maximă care intuitiv apare ca fiind de dorit a se obține în urma unui proces tehnologic. Condițiile în care aceasta se obține funcție de factorii de influență vor fi discutate pentru fiecare grafic. Pentru planul factorial A unde intervin trei factori de influență unul din aceștia este considerat constant, având considerată valoarea în punctul central.

A1 Studiul variației a trei factori de influență cu toate interacțiunile între aceștia

Diagrama pareto pentru lățimea sudurii LS, figura 4.14a arată ca fiind factori de influență semnificativi puterea și viteza, alături de interacțiunea dintre putere și defocalizare. Puterea crește lățimea sudurii iar viteza de sudare o scade.

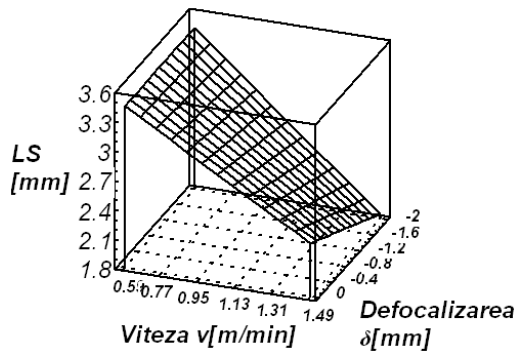
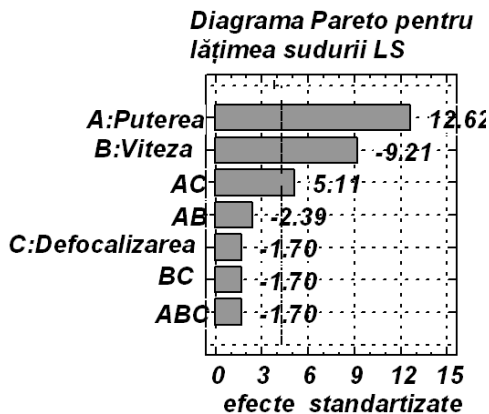


Figura 4.14.a Diagrama pareto pentru lățimea sudurii (după analiza A1)

Figura 4.14.b Suprafața de răspuns pentru lățimea sudurii funcție de viteza și defocalizare (după analiza A1)

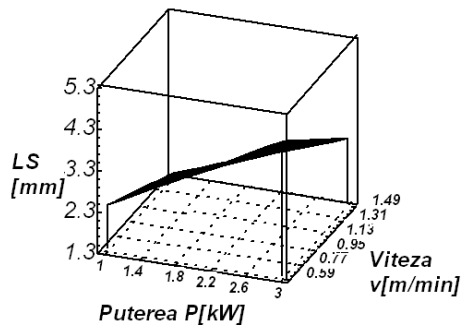


Figura 4.14.c Suprafața de răspuns pentru lățimea sudurii funcție de putere și viteza (după analiza A1)

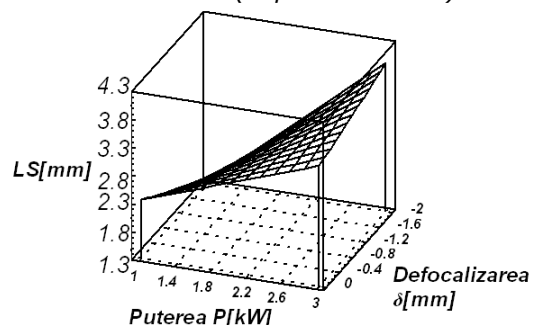


Figura 4.14.d Suprafața de răspuns pentru lățimea sudurii funcție de putere și defocalizare (după analiza A1)

Interacțiunea dintre putere și defocalizare crește lățimea sudurii, se arată astfel contribuția creșterii lățimii petei laserului pe suprafața piesei la stabilirea lățimii sudurii. Interacțiunea dintre putere și viteza de sudare scade lățimea sudurii,

de asemenea și interacțiunea dintre viteză și defocalizare și interacțiunea dintre cei trei factori. Deși efectul de scădere dat vitezei este mai mic decât cel al puterii, efectul de scădere a lățimii sudurii este asociat cu toate interacțiunile la care participă viteza. Defocalizarea scade lățimea sudurii. Aceasta se interpretează ca un transfer al energiei în interiorul piesei la creșterea defocalizării (în modul), care arată fenomenul de keyhole. Efectul defocalizării asupra lățimii sudurii este dat în principal de interacțiunea dintre defocalizare și putere. Se observă că efectele datorate factorilor de influență și interacțiunilor de ordinul doi dintre acestea este mai mare decât interacțiunea dintre cei trei factori care arată efectul de fond. Pentru lățimea la suprafața piesei prezintă importanță obținerea de valori minime care să asigure obținerea unor suduri înguste lucru important pentru aspectul îmbinării sudate. Suprafața de răspuns din figura 4.14 b arată că lățimea sudurii minimă se obține la defocalizarea maximă și la viteza de sudare maximă. La viteze de sudare mici lățimea sudurii are valori maxime indiferent de defocalizare. La viteze de sudare mari lățimea sudurii scade cu creșterea defocalizării. Suprafața de răspuns din figura 4.14 c arată că lățimea la suprafață minimă pe domeniul experimental studiat se obține pentru putere minimă și viteză de sudare maximă. Suprafața de răspuns din figura 4.14 d arată că pentru lățimea la suprafață minimă pe domeniul experimental se obține pentru putere minimă și defocalizare maximă.

Diagrama pareto figura 4.15.a pentru profunzimea sudurii arată că efectul cu cea mai mare influență este puterea. Profunzimea sudurii crește puternic cu puterea. Efectul puterii este cu un ordin de mărime mai mare decât cel al vitezei. Efectul puterii este singurul semnificativ din punct de vedere statistic. Viteza, defocalizarea și interacțiunile la care participă acestea scad profunzimea sudurii. Această scădere se explică prin scăderea timpului de interacțiune respectiv a intensității fascicolului laser la suprafața. Se observă că viteza și defocalizarea provoacă efecte apropiate. Interacțiunea dintre cei trei factori este apropiată de interacțiunea între viteză și putere și este mai mare decât cele între defocalizare și putere și viteză și defocalizare. Se observă că numai puterea are un efect în sensul creșterii profunzimii sudurii. Efectele celor trei factori de influență sunt mai ridicate decât cele ale interacțiunilor lor. Interacțiunile de ordinul doi ale defocalizării au efect mai scăzut decât cea între cei trei factori. Aceasta arată că puterea viteza și defocalizarea au o influență directă asupra profunzimii sudurii. Intensitatea fascicolului laser la suprafață are rolul predominant în stabilirea profunzimii sudurii.

Ca și obiectiv tehnologic pentru profunzimea sudurii apare cerința de a obține valori maxime. Suprafața de răspuns din figura 4.15 b arată că valoarea maximă pentru profunzime pe domeniul experimental se obține pentru viteza minimă și defocalizarea maximă. Suprafața de răspuns din figura 4.15c arată că pe domeniul experimental studiat se obține pentru puterea maximă aproape independent de viteză. Suprafața de răspuns din figura 4.15 arată că valoarea maximă pentru profunzimea sudurii se obține la puterea maximă independent de defocalizare.

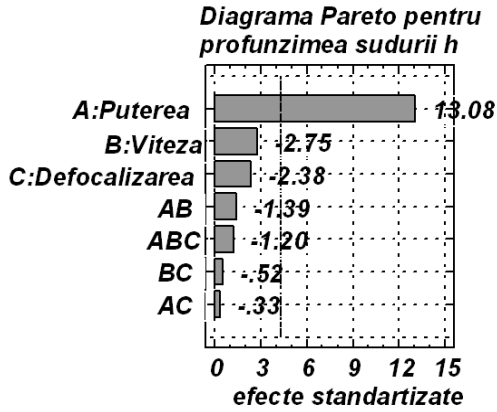


Figura 4.15 a Diagrama pareto pentru profunzimea sudurii (după analiza A1)

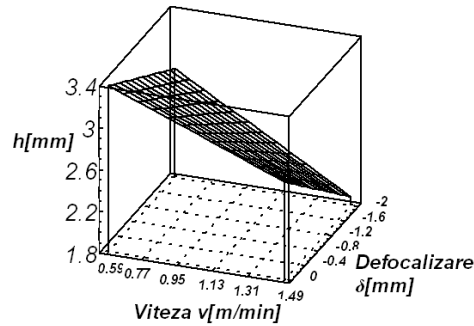


Figura 4.15 b Suprafața de răspuns pentru profunzimea sudurii, funcție de viteză și de defocalizare (după analiza A1)

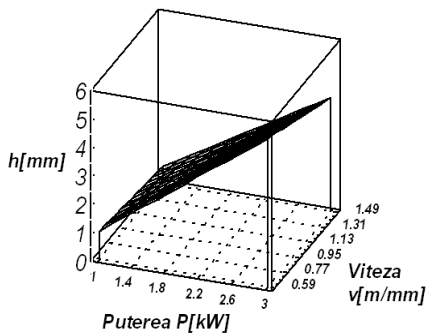


Figura 4.15 c Suprafața de răspuns pentru profunzimea sudurii funcție de putere și de viteză (după analiza A1)

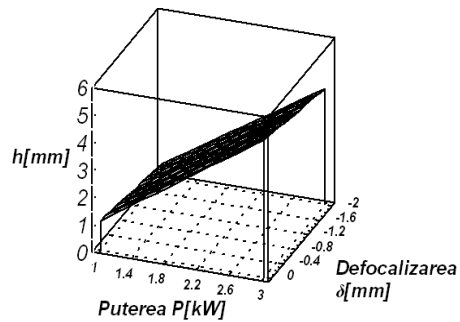


Figura 4.15 d Suprafața de răspuns pentru profunzimea sudurii funcție de putere și defocalizare (după analiza A1)

Din diagrama pareto figura 4.16 se observă că raportul F scade puternic cu puterea. Puterea scade raportul F. Puterea este singurul factor semnificativ din punct de vedere statistic. Efectul următor puterii îl reprezintă interacțiunea dintre cei trei factori. Aceasta înseamnă că restul efectelor produse de factori și interacțiuni sunt acoperite de acesta. Interacțiunea dintre putere, viteză și defocalizare crește raportul F. Aceasta are la bază creșterea raportului F produsă de viteză și de defocalizare în parte. Se observă că interacțiunile de ordinul doi ale puterii sunt slabe dar acționează ca și puterea în sensul creșterii raportului F. Raportul F este crescut de viteză și defocalizare, însă interacțiunea dintre ele are un efect contrar mult mai puternic. Creșterea puterii scade raportul F și astfel conduce la regimul de sudare keyhole. În principiu creșterea vitezei și coborârea punctului focal în interiorul piesei cresc raportul F și astfel strică regimul de keyhole. Aceasta se datorează scăderii timpului de interacțiune și intensității fascicolului laser la suprafața piesei. Faptul că interacțiunea dintre putere și viteză are un efect contrar destul de important arată un fenomen specific keyhole. Creșterea vitezei va înclina

peretele din față al keyhole. Peretele înclinat, baia de sudare largă datorită petei mari pe suprafața piesei și apariția rapidă a keyhole fac posibilă propagarea radiației laser în keyhole și absorbția acesteia în interiorul piesei ceea ce duce la scăderea raportului F.

Pentru raportul F prezintă importanță valorile minime. Cu cât scade F cu atât regimul keyhole este mai evident. Figura 4.16 b arată că pe domeniul experimental valoarea minimă pentru raportul F se obține la defocalizarea minimă și la viteza minimă. Suprafața de răspuns din figura 4.16 c arată că valoarea minimă pentru raportul F se obține la puterea maximă independent de viteză. Figura 4.16 d arată că valoarea minimă pe domeniul experimental se obține pentru puterea maximă independent de defocalizare.

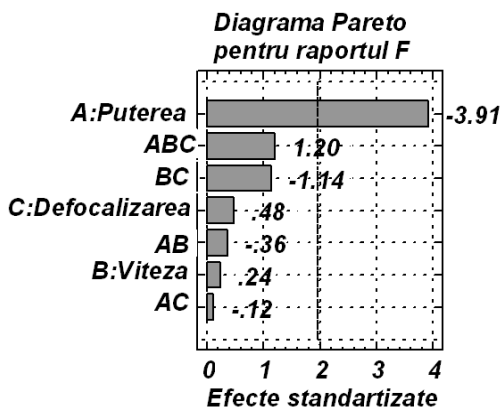


Figura 4.16.a Diagrama pareto pentru raportul F (după analiza A1)

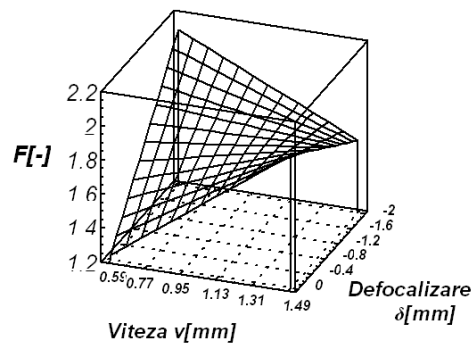


Figura 4.16.b Suprafața de răspuns pentru raportul F, funcție de viteză și defocalizare(după analiza A1)

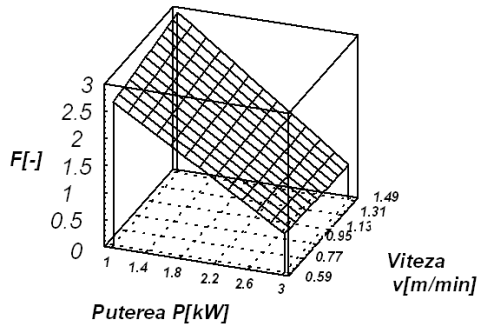


Figura 4.16.c Suprafața de răspuns pentru raportul F, funcție de putere și viteză(după analiza A1)

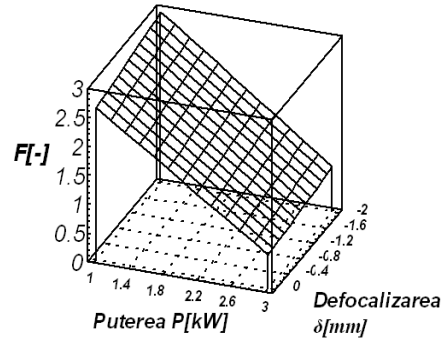


Figura 4.16.d Suprafața de răspuns pentru raportul F, funcție de putere și defocalizare (după analiza A1)

Diagrama pareto 4.17 arată că aria topită crește cu puterea și scade cu viteza de sudare . Puterea are cea mai mare influență urmată de viteză. Acești factori au semnificație statistică. Pe locul trei se află interacțiunea dintre putere și viteză. Ea are un efect de scădere asupra ariei topite. Efectul de scădere a ariei topite datorat vitezei și interacțiunii dintre putere și viteză egalează pe cel de

creștere datorat puterii. Interacțiunea dintre putere viteză și defocalizare se află pe locul următor. Acesta scade aria topită.

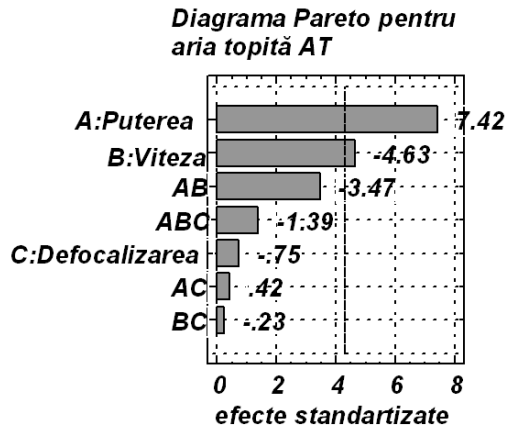


Figura 4.17.a Diagrama pareto pentru aria topită(după analiza A1)

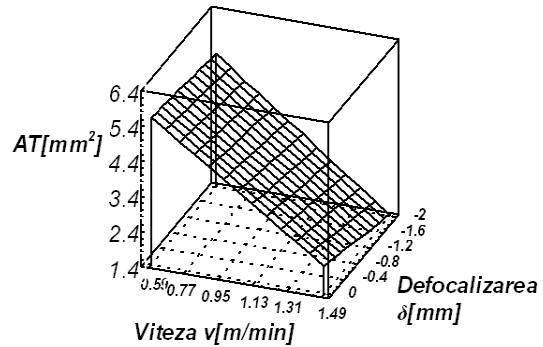


Figura 4.17.b Suprafața de răspuns pentru aria topită ,funcție de viteză și defocalizare(după analiza A1)

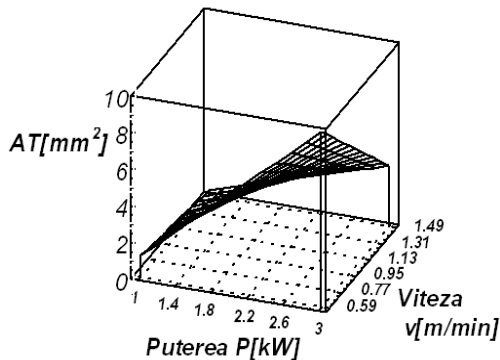


Figura 4.17.c Suprafața de răspuns pentru aria topită funcție de putere și viteză (după analiza A1)

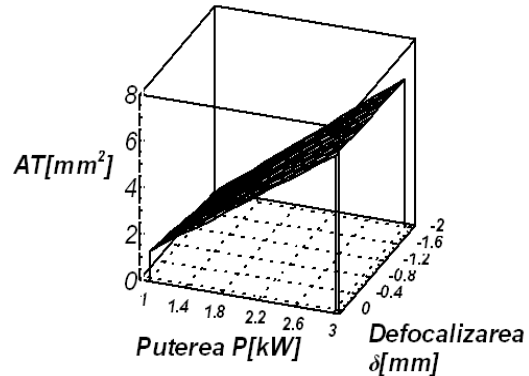


Figura 4.17.d Suprafața de răspuns pentru aria topită funcție de putere și defocalizare (după analiza A1)

Efectul datorat acestei este mai mare decât efectul defocalizării și interacțiunilor ei de ordinul doi. Se arată astfel că defocalizarea are o participare scăzută în ceea ce privește aria topită pe secțiune , atât ca efect propriu cât și prin interacțiunile sale. Se arată astfel că pe ansamblu efectul de scădere al ariei topite datorat vitezei de sudare este mai mare decât cel de creștere datorat puterii. Interacțiunea dintre putere și defocalizare mărește suprafața topită. Această interacțiune surprinde un fenomen specific sudării în regim keyhole. Puterea ridicată și focalizarea în interiorul piesei , mai precis în interiorul keyhole duc la creșterea cuplajului dintre laser și piesă ceea ce are consecințe asupra creșterii ariei topite. Ca obiectiv tehnologic se urmărește ca aria topită a sudurii să fie maximă. Suprafața de răspuns din figura 4.17 b arată că aria topită maximă se obține la viteza minimă

indiferent de defocalizare. Figura 4.17 c arată că aria topită maximă pe domeniul experimental studiat se obține la putere maximă și viteză minimă. Figura 4.17 d arată că aria topită maximă se obține la putere maximă indiferent de focalizare.

Tipul variațiilor anterior prezentate arată că se variațiile funcțiilor obiectiv se încadrează în tipul general dat de variația intensității fascicolului laser la suprafața piesei și de timpul de interacțiune dintre radiație și material. Apar însă și efecte care arată prezența keyhole și efectul de creștere al cuplajului între laser și material datorat acestuia. Domeniul experimental studiat pe baza planului factorial a avut sudurii atât în regimul de conducție cât și în regimul keyhole (vezi tabele Anexa). Diferența principală a fost dată de putere. Pentru nivelul inferior al puterii sudurile au fost în regimul de conducție iar pentru nivelul superior al puterii sudurile au fost în regimul keyhole. În acest context studiul sudurilor din experimentul factorial a arătat forma generală a variațiilor specifice trecerii de la sudarea în regim de conducție la sudarea în regim keyhole.

Analiza A2 (planul factorial A fără interacțiuni)

Analiza funcțiilor obiectiv prin eliminarea interacțiunilor asigură ierarhizarea numai a factorilor de influență. Modelul matematic este mai simplu. Prin acesta efectele datorate interacțiunilor se repartizează la factorii de influență. Suprafețele de răspuns sunt planuri.

Diagrama pareto (figura 4.18) arată că puterea este factorul cu influența cea mai puternică asupra lățimii sudurii. Viteza de sudare și defocalizarea sunt următorii factorii de influență. Puterea și viteza sunt factorii semnificativi din punct de vedere statistic. Puterea crește lățimea sudurii iar viteza și defocalizarea o scad. Efectul cumulat de scădere datorat vitezei și defocalizării se apropie de cel de creștere datorat puterii. Defocalizarea apare ca un factor care scade puterea. Analiza nu pune în evidență efectul propriu al defocalizării.

Suprafața de răspuns din figura 4.18 b arată că lățimea sudurii minimă pe domeniul experimental se obține pentru viteza de sudare maximă și defocalizarea maximă (în profunzimea piesei). Figura 4.18.c arată că lățimea la suprafață minimă pe domeniul experimental se obține la puterea minimă și viteza de sudare maximă. Figura 4.18.d arată că lățimea sudurii minimă pe domeniul experimental se obține pentru puterea minimă și defocalizarea maximă.

Diagrama pareto pentru profunzimea sudurii figura 4.19 a arată că puterea are influența principală asupra profunzimii sudurii. Puterea crește puternic profunzimea în timp ce viteza și defocalizarea o scad. Important este că toți cei trei factori sunt semnificativi statistic. Efectul de scădere datorat defocalizării se explică prin asocierea ei cu scăderea intensității fascicolului laser la suprafața piesei. Efectul de scădere produs de viteză este unul așteptat datorită scăderii timpului de interacțiune.

Pentru profunzimea sudurii s-a definit ca obiectiv tehnologic obținerea unei valori maxime (obținerea maximă a efectului de keyhole). Suprafața de răspuns din figura 4.19 b arată că pe domeniul experimental profunzimea maximă se obține la viteza de sudare minimă și la defocalizarea minimă, adică la focalizarea la suprafață. Suprafața de răspuns din figura 4.19.c arată că profunzimea maximă se obține la puterea maximă aproape indiferent de viteza de sudare. Suprafața de răspuns din figura 4.19 d arată că profunzimea maximă pe domeniul experimental se obține pentru puterea maximă indiferent de defocalizare.

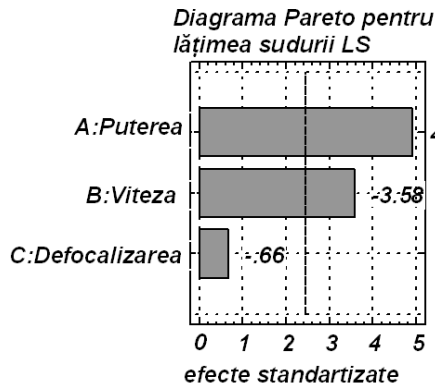


Figura 4.18.a Diagrama pareto pentru lățimea sudurii (după analiza A2)

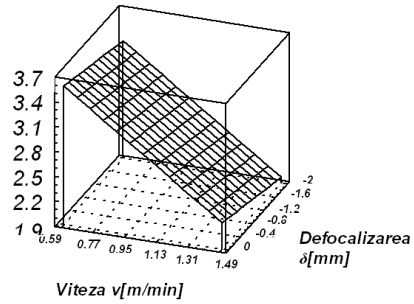


Figura 4.18.b Figura Suprafața de răspuns pentru lățimea sudurii funcție de viteză și defocalizare(după analiza A2)

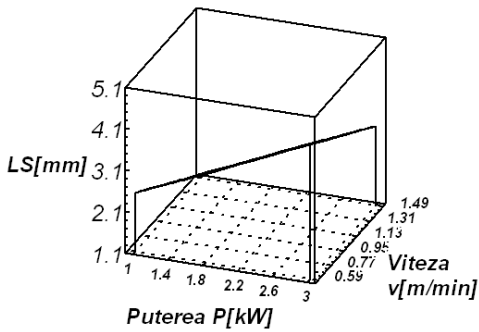


Figura 4.18.c Suprafața de răspuns pentru lățimea sudurii (după analiza A2)

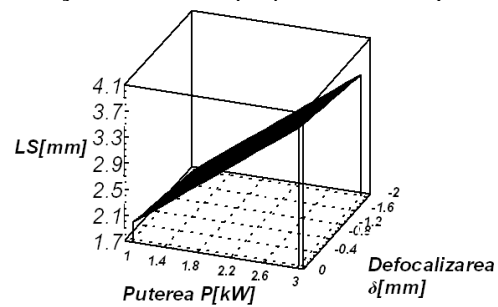


Figura 4.18.d Suprafața de răspuns pentru lățimea sudurii funcție de putere și defocalizare(după analiza A2)

Diagrama pareto (figura 2.40 a) arată că raportul F scade cu puterea. Puterea are semnificație statistică Se observă că defocalizarea și viteza au un efect de creștere a raportului F. Creșterea raportului F datorită defocalizării este dublă comparativ cu cea datorată vitezei. Defocalizarea se manifestă astfel prin scăderea intensității laserului la suprafața piesei. Deși viteza și defocalizarea de a scad și lățimea și profunzimea sudurii ele cresc raportul lor.

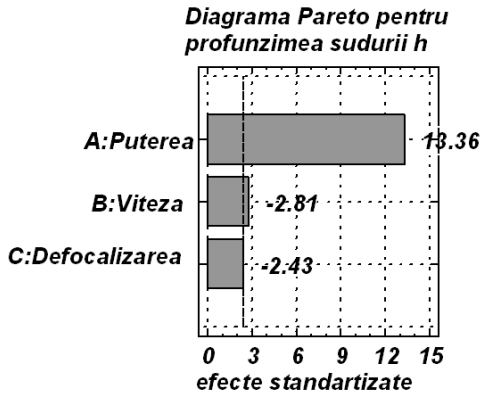


Figura 4.19. a Diagrama pareto pentru profunzimea sudurii (după analiza A2)

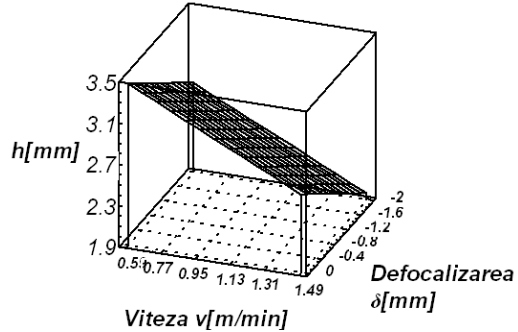


Figura 4.19. b Suprafața de răspuns pentru profunzimea sudurii, funcție de viteză și de defocalizare (după analiza A2)

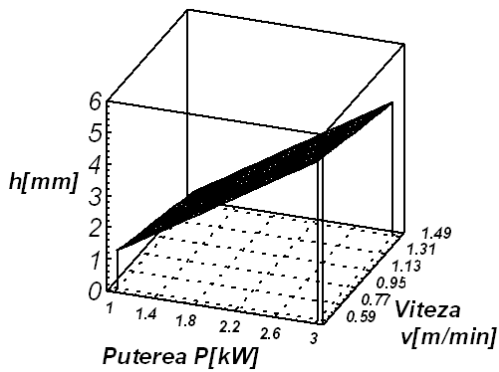


Figura 4.19 c Suprafața de răspuns pentru profunzimea sudurii funcție de putere și de viteză (după analiza A2)

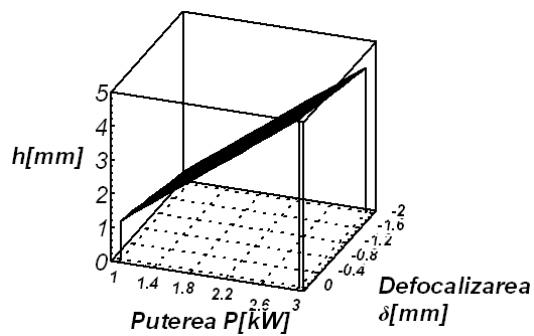


Figura 4.19. d Suprafața de răspuns pentru profunzimea sudurii funcție de putere și defocalizare (după analiza A2)

Pentru raportul F ca obiectiv tehnologic se alege obținerea de valori minime. Se observă că contribuția defocalizării este mai mare decât a vitezei. Suprafața de răspuns din figura 4.20 b arată că pentru raportul F se obține valori minime pe domeniul experimental pentru viteza de sudare minimă și defocalizare minimă. Figura 4.20 c arată că valoarea minimă pentru raportul F se obține pentru puterea maximă aproape independent de viteză. Figura 4.20 d arată că raportul F minim pe domeniul experimental se obține pentru puterea maximă indiferent de defocalizare.

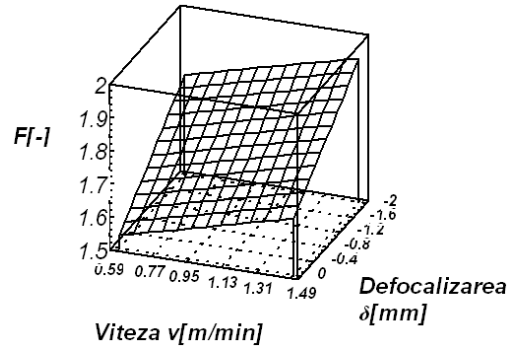
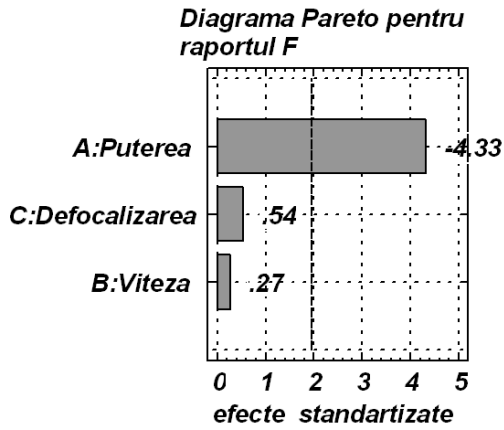


Figura 4.20.a Diagrama pareto pentru raportul F (după analiza A2)

Figura 4.20.b Suprafața de răspuns pentru raportul F, funcție de viteză și defocalizare (după analiza A2)

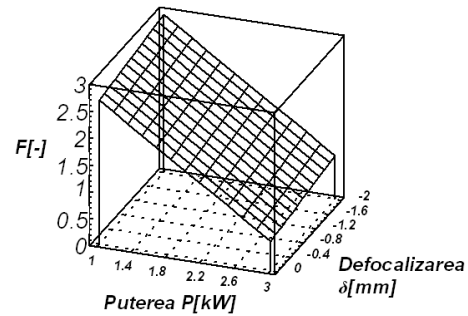
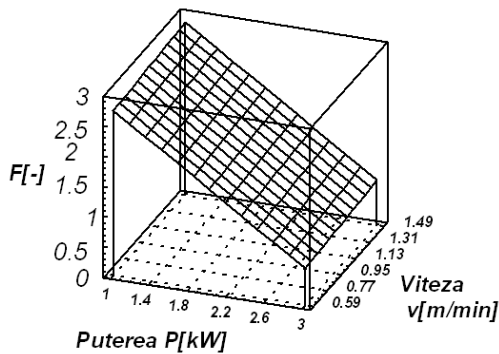


Figura 4.20.c Suprafața de răspuns pentru raportul F, funcție de putere și viteză (după analiza A2)

Figura 4.20.d Suprafața de răspuns pentru raportul F, funcție de putere și defocalizare (după analiza A2)

Diagrama pareto pentru aria topită, figura 4.21a arată că contribuția principală o are puterea laserului aceasta crește aria topită. Puterea și viteza sunt factori de influență statistic semnificativi. Contribuția defocalizării este în sensul scăderii ariei topite și ca valoare este cu un ordin de mărime mai mică decât cea a puterii.

Ca obiectiv tehnologic pentru aria topită se alege obținerea de valori maxime. Suprafața de răspuns din figura 4.21.b arată că pe domeniul experimental se obțin valori maxime pentru aria topită pentru viteza de sudare minimă și defocalizare minimă, adică focalizare la suprafață. Figura 4.21 c arată că aria topită maximă pe domeniul experimental se obține la putere maximă și viteză de sudare minimă. Figura 4.21 d arată că aria maximă se obține la putere maximă aproape indiferent de defocalizare.

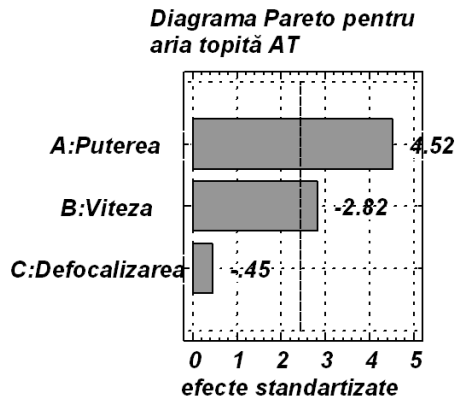


Figura 4.21.a Diagrama pareto pentru aria topită (după analiza A2)

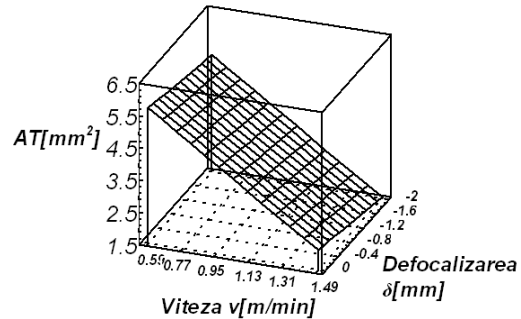


Figura 4.21.b Suprafața de răspuns pentru aria topită, funcție de viteză și defocalizare (după analiza A2)

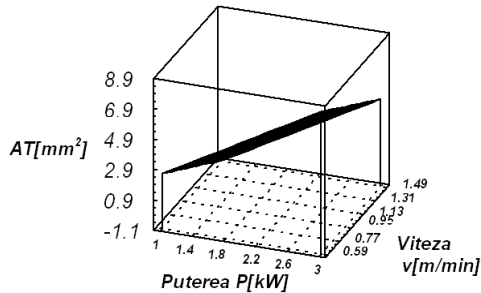


Figura 4.21.c Suprafața de răspuns pentru aria topită funcție de putere și viteză (după analiza A2)

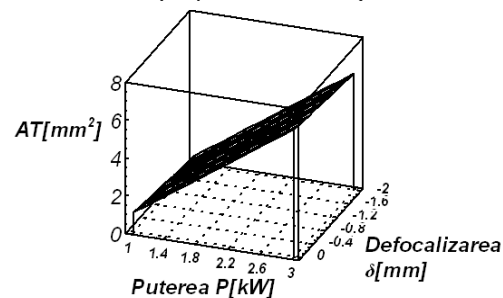


Figura 4.21.d Suprafața de răspuns pentru aria topită funcție de putere și defocalizare (după analiza A2)

Eliminarea interacțiunilor la analiza A2 comparativ cu analiza A1 a menținut ierarhia factorilor de influență putere, viteză, defocalizare pentru cele patru funcții obiectiv studiate. Interpretarea fenomenologie pe care o arată efectele factorilor de influență este mai puțin profundă. În acest caz al eliminării interacțiunilor interpretarea fenomenologică se va axa pe factorii de influență semnificativi puterea și viteza de sudare. Efectul defocalizării se explică prin scăderea intensității laserului la suprafața piesei. Focalizarea în interiorul piesei are un efect similar scăderii puterii.

B Planul factorial divizat cu 2 factori de influență la $\delta = 0$

B1 Studiu cu interacțiuni de ordinul 2 între factorii

Analizele anterioare (A1 și A2) au arătat că defocalizarea este un factor de influență nesemnificativ din punct de vedere statistic. Variația indusă de aceasta fiind una indirectă similară cu scăderea puterii. În acest context a apărut ideea excluderii defocalizării ca factor de influență. Factorii de influență rămași în discuție fiind puterea și viteza de sudare. Efectul indus de unul din acești factorii asupra funcțiilor obiectiv este contrar celui alt. A apărut ideea separării planului factorial 2^3 în două planuri factoriale 2^2 corespunzătoare celor două nivele ale defocalizării.

Planul B consideră defocalizarea $\delta = 0$ (nivelul inferior al defocalizării), iar planul C consideră defocalizarea la $\delta = -2\text{mm}$ (nivelul superior al defocalizării). Principalele rezultate ale acestei analize se referă la modificarea ierarhiei factorilor de influență și la suprafețele de răspuns.

Diagrama pareto, figura 4.22 arată că puterea și viteza au o contribuție egală la stabilirea valorii lățimii sudurii. Ambele au semnificație statistică. Interacțiunea dintre ele este cu un ordin de mărime mai mic, nu este statistic semnificativă, ea contribuie la descreșterea lățimii sudurii. Aceasta înseamnă că per ansamblu efectul de descreștere al lățimii sudurii cu viteza este mai puternic decât cel de creștere cu viteza de sudare. Suprafața de răspuns din figura 4.22 b arată că lățimea minimă a sudurii pe domeniul experimental se obține la viteza cea mai mare și puterea cea mai mică.

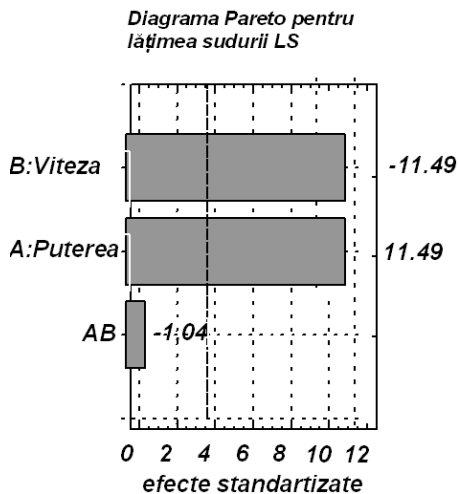


Figura 4.22.a Diagrama pareto standartizată pentru lățimea sudurii (după analiza B1 $\delta = 0$)

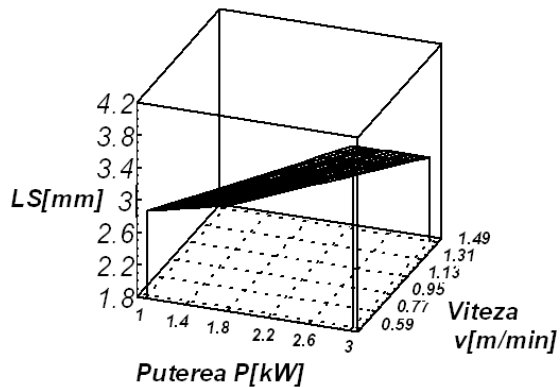


Figura 4.22.b Suprafață de răspuns pentru lățimea sudurii funcție de putere și viteză (după analiza B1 $\delta = 0$)

Diagrama pareto, figura 4.23 a arată că profunzimea sudurii crește puternic cu puterea. Ea scade într-o măsură mult mai mică cu viteza. Interacțiunea dintre putere și viteză este nesemnificativă statistic și are o contribuție mică. Astfel puterea și viteza se comportă ca factori de influență complet independenți în raport cu funcția obiectiv, profunzimea sudurii. Suprafața de răspuns din figura 4.23 b arată că profunzimea sudurii maximă se obține la puterea maximă aproape independent de viteză.

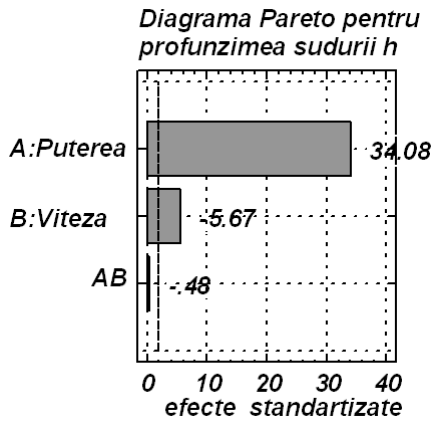


Figura 4.23.a Diagrama pareto pentru profunzimea sudurii (după analiza B1 $\delta = 0$)

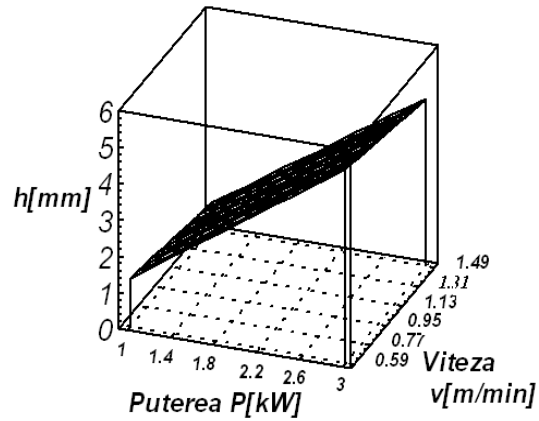


Figura 4.23.b Suprafață de răspuns pentru profunzimea sudurii funcție de putere și viteză (după analiza B1 $\delta = 0$)

Diagrama pareto, figura 4.24 .a arată că raportul F scade cu puterea și într-o mai mică măsură (efect redus la jumătate) crește cu viteza. Interacțiunea dintre putere și viteză are un efect de scădere a raportului F . Puterea viteza și interacțiunea dintre acestea nu sunt semnificative din punct de vedere statistic. Suprafața de răspuns din figura 4.24 b arată că pe domeniul experimental valoarea minimă pentru raportul F se obține la putere maximă și viteză de sudare minimă.

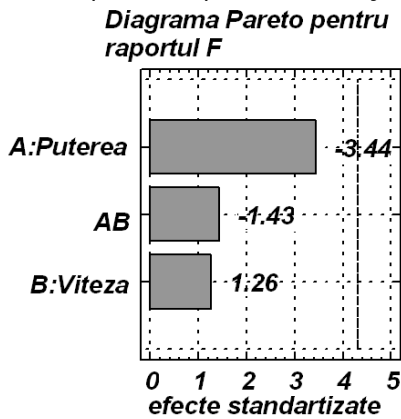


Figura 4.24.a Diagrama pareto pentru raportul F (după analiza B1 $\delta = 0$)

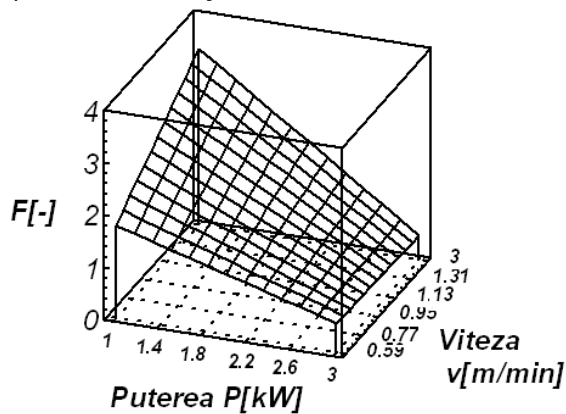


Figura 4.24.b Suprafață de răspuns pentru raportul F funcție de putere și viteză (după analiza B1 $\delta = 0$)

Diagrama pareto pentru aria topită (figura 4.25) arată că aceasta crește cu puterea și scade cu viteza de sudare. Puterea este semnificativă din punct de vedere statistic. Interacțiunea dintre putere și viteză scad aria topită. Suprafața de răspuns din figura 4.25 b arată că aria topită pe domeniul experimental are valoarea maximă pentru puterea maximă și viteza de sudare minimă.

Diagrama Pareto pentru aria topită AT

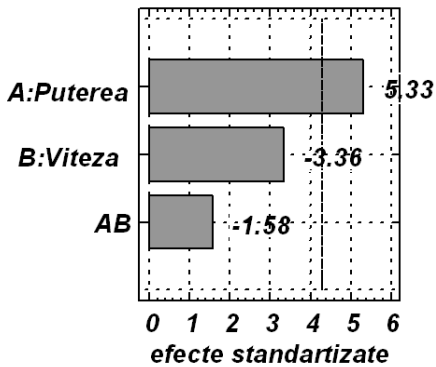


Figura 4.25.a Diagrama pareto pentru aria topită (după analiza B1 $\delta = 0$)

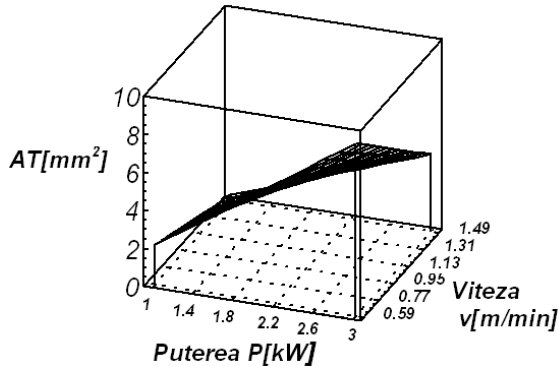


Figura 4.25.b Suprafață de răspuns pentru funcție de putere și viteză (după analiza B1 $\delta = 0$)

**C Planul factorial divizat cu 2 factori de influență la $\delta = -2$
C1 Studiu cu interacțiune de ordinul 2 între factorii**

Diagrama pareto (figura 4.26.a) arată că lățimea sudurii crește cu puterea și scade cu viteza. Creșterea cu puterea este mai puternică decât scăderea cu viteza și cu interacțiunea dintre putere și viteză. Efectul datorat vitezei și puterii sunt semnificative din punct de vedere statistic.

Diagrama Pareto pentru lățimea sudurii LS

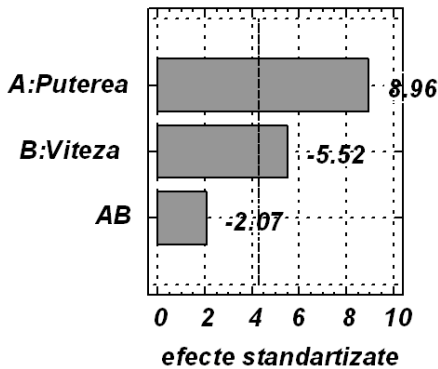


Figura 4.26.a Diagrama pareto pentru lățimea sudurii (după analiza C1 $\delta = -2$)

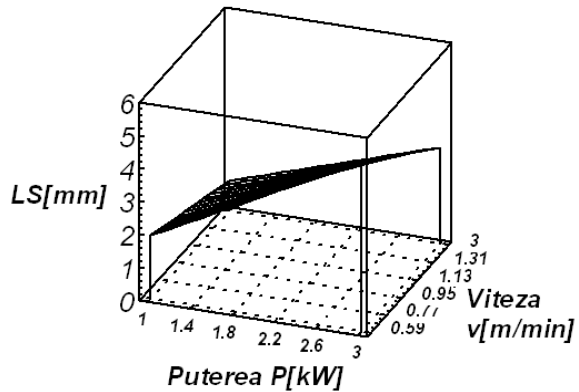


Figura 4.26.b Suprafață de răspuns pentru lățimea sudurii funcție de putere și viteză (după analiza C1 $\delta = -2$)

Interacțiunea dintre viteză și putere este destul de importantă. Scăderea datorată vitezei prin ea și prin interacțiunea dintre ea și putere se apropie de creșterea datorată puterii. Suprafața de răspuns din figura 4.26 b arată că lățimea sudurii va

avea valoarea minimă pe domeniul experimental pentru puterea minimă și viteza de sudare maximă.

Diagrama pareto arată că profunzimea sudurii crește puternic cu puterea. Efectul datorat puterii are semnificație statistică. Viteza și interacțiunea dintre viteză și putere sunt mai mici, au o contribuție aproape egală și scad profunzimea. Ele nu au semnificație statistică. Suprafața de răspuns din figura 4.27 b arată că profunzimea maximă pe domeniul experimental se obține pentru puterea maximă și viteza de sudare minimă.

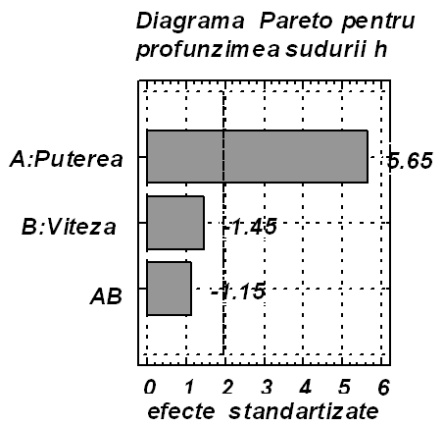


Figura 4.27.a Diagrama pareto pentru profunzimea sudurii (după analiza C1 $\delta = -2$)

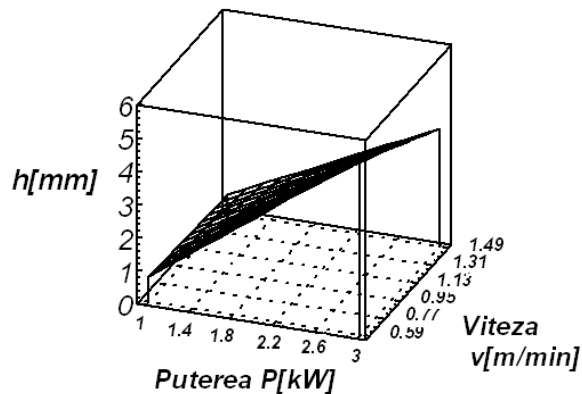


Figura 4.27.b Suprafață de răspuns pentru profunzimea sudurii funcție de putere și viteză (după analiza C1 $\delta = -2$)

Diagrama pareto din figura 4.28 arată că raportul F scade cu puterea și crește cu viteza și cu interacțiunea dintre putere și viteză. Efectele datorate puterii vitezei și interacțiunea dintre viteză și putere se află înafara pragului de semnificație statistică. Suprafața de răspuns din figura 4.28 b arată că pentru raportul de formă F valoarea minimă se obține pe domeniul experimental pentru puterea maximă și viteza de sudare minimă.

Diagrama pareto, figura 4.29, pentru aria topită arată că aceasta crește cu puterea și scade cu viteza și cu interacțiunea dintre putere și viteză. Efectul datorat puterii este statistic semnificativ. Viteza și interacțiunea dintre aceasta și putere scad aria secțiunii topite, ele nu se află în domeniul de semnificație statistică, au o pondere egală ca efecte, efectul sumat al acestora depășește pe cel produs de putere. Figura 4.32 arată că pentru aria secțiunii se obține pe domeniul experimental valoarea maximă pentru puterea maximă și viteza de sudare minimă.

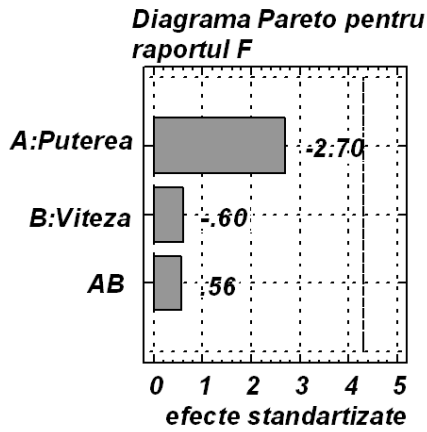


Figura 4.28.a Diagrama pareto pentru raportul F (după analiza C1 $\delta = -2$)

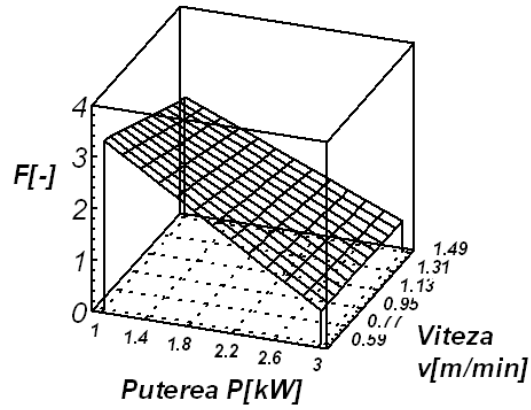


Figura 4.28.b Suprafață de răspuns pentru raportul F funcție de putere și viteză (după analiza C1 $\delta = -2$)

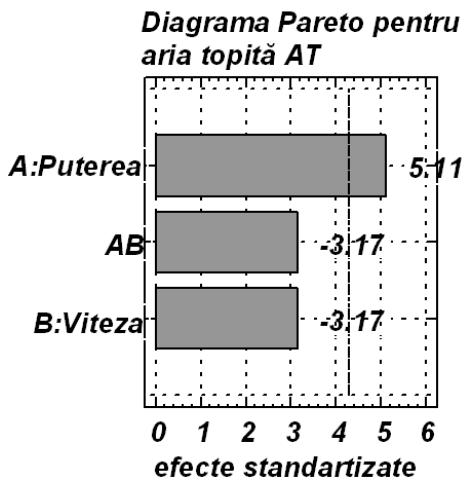


Figura 4.29.a Diagrama pareto pentru aria topită la (după analiza C1 $\delta = -2$)

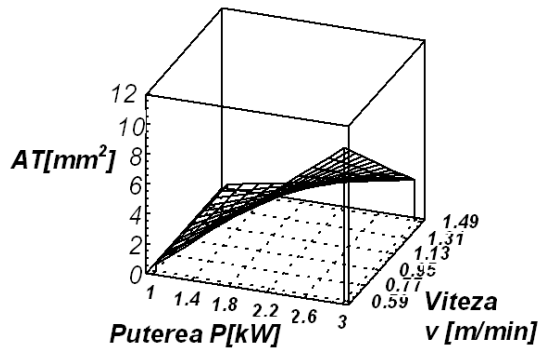


Figura 4.29.b Suprafață de răspuns pentru aria secțiuni topite funcție de putere și viteză (după analiza C1 $\delta = -2$)

Renunțarea la prezența defocalizării ca factor de influență a dus la păstrarea ierarhiei factorilor de influență putere și viteză de sudare. Acestea se păstrează pentru cele două valori ale valorii ale defocalizării. Rezultatul important datorat acestui tip de analiză care exclude defocalizarea este că pentru raportul F se strică predicția dată de model, prin lipsa semnificației statistice a efectelor datorate puterii și vitezei de sudare.

4.4 Analiza modelelor logaritmice

Metoda de modelare logaritmică are ca scop obținerea de formule de corelație în produs. În aceste formule funcția obiectiv este egală cu produsul dintre factorii de influență ridicați la un anumit exponent. Ca model matematic acest tip de formulă este mai util decât cel polinomial deoarece asigură și rezolvarea problemei inverse: predicția valorilor factorilor de influență care urmează a fi reglații pe baza unor valori orientative ale funcțiilor obiectiv. Va trebui ca numărul de factori de influență să coincidă cu cel al funcțiilor obiectiv.

Analiza constă în studiul variației logaritmului funcției obiectiv relativ referitor la logaritmul valorilor factorilor de influență. Modelul matematic este un polinom liniar, de tipul celui folosit la realizarea modelelor folosite la analizele A2, B2, C2. Acest model liniar cu variabile logaritmice se transformă într-o formulă în produs. Această metodă nu ia în considerare interacțiunile dintre factorii de influență. Formulele de corelație logaritmice fiind date în mărimi reale exponenții factorilor care apar în formule nu pot fi direct comparații deoarece sunt relativi la constanta care înmulțește aceste relații. Altfel spus, factorii de influență nu pot fi ierarhizați pe baza acestor formule.

Analiza A ia în considerare efectul efectele celor trei parametrii putere, viteză de sudare și defocalizare. Pentru defocalizare s-a considerat un termen pozitiv care include defocalizarea. Modele matematice logaritmice pentru analiza A sunt prezentate în tabelul 4.7.

Tabel 4.7 Modelele matematice logaritmice pentru analiza A a experimentului factorial

Modelul matematic și coeficienții de corelație	
$LS = 1.882888 \cdot P^{0.699} v^{-0.597} (-\delta + 1)^{-0.234} \delta \leq 0$ [mm]	(4.49)
$R^2 = 0.82 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.74$	
$h = 0.884317 \cdot P^{1.813} v^{-0.462} (-\delta + 1)^{-0.498} \delta \leq 0$ [mm]	(4.50)
$R^2 = 0.90 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.85$	
$F = 2.428224 \cdot P^{-1.119} v^{-0.032} (-\delta + 1)^{-0.171} \delta \leq 0$ [-]	(4.51)
$R^2 = 0.86 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.79$	
$AT = 0.571086 \cdot P^{-2.487} v^{-1.228} (-\delta + 1)^{-0.6} \delta \leq 0$ [mm ²]	(4.52)
$R^2 = 0.83 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.74$	

Se observă însă că formulele rezultate au o corelație foarte bună. Aceasta înseamnă că ele pot fi folosite numai pentru a prezice valori pentru funcțiile obiectiv respective. Interpretarea acestor valori este dependentă de sistemul de unități de măsură. Variația logaritmului funcției obiectiv relativ la sistemul codificat al factorilor de influență, excluzând interacțiunile a fost efectuată prin metoda ANOVA. În urma aplicării acestei metode s-au obținut coeficienții de corelație pentru modelele matematice obținute. În cazul analizat puterea, viteza, defocalizarea sunt exprimate în mărimi de ordinul unităților. Astfel este posibilă o oarecare comparație a valorilor exponenților la care apar factorii de influență. Formulele de mai sus arată că pentru lățimea sudurii este influențată de putere și viteză în contribuții aproape

egale dar de sensuri opuse. Puterea crește lățimea sudurii iar viteza o scade. Scăderea datorată defocalizării este pe jumătate din cea datorată vitezei. Pentru profunzime aceasta crește cu puterea, exponentul acesteia fiind de 4 ori mai mare decât cel al vitezei. Viteza și defocalizarea au un efect de scădere acesta este de același ordin de mărime pentru cei doi factori, fără a fi însă nesemnificative. Raportul F scade puternic cu puterea, contribuția defocalizării și vitezei sunt mici. Aria zonei topite arată că aceasta crește cu pătratul puterii și scade cu viteza de sudare. Această aproximare a exponenților este importantă. Defocalizarea are un efect de scădere aproximativ jumătate din cel al puterii.

Analiza B conține ca parametrii variații numai puterea și viteza, focalizarea fascicolului laser fiind la suprafața piesei. Variația pentru lățimea și profunzimea sudurii urmează același tip ca și la analiza A. Pentru raportul F și aria topită contribuția la scăderea acestor mărimi a vitezei de sudare crește. Modele matematice logaritmice pentru analiza B sunt prezentate în tabelul 4.8.

Tabel 4.8 Modelele matematice logaritmice pentru analiza B a experimentului factorial $\delta = 0$

Modelul matematic și coeficienții de corelație	
$LS = 2.247224 \cdot P^{0.363} v^{-0.436}$ [mm]	(4.53)
$R^2 = 0.97$ $R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.95$	
$h = 1.048943 \cdot P^{1.492} v^{-0.416}$ [mm]	(4.54)
$R^2 = 0.92$ $R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.87$	
$F = 2.460265 \cdot P^{-1.161} v^{-0.247}$ [-]	(4.55)
$R^2 = 0.86$ $R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.76$	
$AT = 0.727746 \cdot P^{2.047} v^{-1.7}$ [mm ²]	(4.56)
$R^2 = 0.85$ $R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.75$	

Analiza C conține ca parametrii variații numai puterea și viteza de sudare, focalizarea fiind în interiorul piesei. Pentru această analiză la toate mărimile analizate se constată că va crește decalajul dintre efectul puterii și cel al vitezei. Astfel deși tendințele se mențin dependența de putere este mult mai prezentă. Analiza C arată o contribuție, pe fondul aceluiași tip de variație, o contribuție mai puternică a vitezei decât cea pentru analiza B. Scăderea intensității fascicolului laser la suprafața piesei prin focalizarea în interior crește rolul vitezei de sudare. Analiza A prezintă evident o mediere a acestor tendințe asupra rolului vitezei de sudare, deoarece cele două analize B și C au fost separate din acesta. Modele matematice logaritmice pentru analiza C sunt prezentate în tabelul 4.9.

Modele logaritmice prezintă coeficienți de corelație relativ ridicați. Pentru lățimea sudurii coeficienții de corelație sunt cei mai ridicați. Acest rezultat se asociază cu funcțiile de regresie obținute pentru seriile experimentale clasice. Tipul de bază a acestor funcții este unul logaritm care în unele situații se reduce la unul liniar. Astfel utilizarea modelelor logaritmice la interpretarea experimentului factorial are un fundament dat de experimentarea clasică.

Fenomenul de keyhole este pus în evidență în sudarea laser prin creșterea profunzimii sudurii și prin scăderea raportului F. Experimentările realizate au pus în

evidență o puternică dependență de putere. Rezultatele obținute au arătat că în acest context efectul defocalizării (coborârea punctului focal sub suprafața materialului) va fi prezent prin influența pe care o are asupra intensității fascicolului lase la suprafața piesei. Tendințele de variație în cazul puterii și vitezei de sudare se mențin la eliminarea defocalizării ca factor de influență.

Tabel 4.9 Modelele matematice logaritmice pentru planul factorial C

$\delta = -2\text{ mm}$

Modelul matematic și coeficienții de corelație	
$LS = 1.287306 \cdot P^{1.034} v^{-0.759}$ [mm]	(4.57)
$R^2 = 0.91761 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.86$	
$h = 0.5087 \cdot P^{2.134} v^{-0.509}$ [mm]	(4.58)
$R^2 = 0.84155 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.73$	
$F = 2.605274 \cdot P^{-1.077} v^{-0.181}$ [-]	(4.59)
$R^2 = 0.803 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.67$	
$AT = 0.301998 \cdot P^{2.928} v^{-0.757}$ [mm ²]	(4.60)
$R^2 = 0.78 \quad R^2(\text{adj, for } d.f) = 0.63$	

Toate funcțiile obiectiv analizate prezintă efectul termic de topire a materialului. Creșterea cantității de topitură conduce separat la creșterea lățimii sudurii, a profunzimii acestei și a ariei topite. Puterea laserului este factorul de influență cu cea mai importantă contribuție în stabilirea cantității de topitură. Ea este urmată de viteza de sudare și de defocalizare. Cantitatea de topitură crește cu puterea și scade cu viteza de sudare și defocalizarea. Prin aceasta dependență generală se pune în evidență legătura fenomenologică dintre funcțiile obiectiv analizate. Eliminarea interacțiunilor între factori nu schimbă în general ierarhia factorilor de influență (lucru care este adevărat mai ales în situațiile în care sunt mai mult de doi factori de influență). Pentru planul A și planul C prin eliminarea interacțiunilor coeficienții de corelație au scăzut. Pentru planul B prin eliminarea interacțiunilor coeficienții de corelație au rămas la același nivel.

Modelarea experimentală pe baza planurilor factoriale a considerat două cazuri distincte, folosind aceleași date experimentale. Primul din acestea a considerat defocalizarea ca factor de influență (planul factorial A) iar al doilea (prin două studii independente planurile factoriale B și C) a exclus acest factor de influență. Se pune problema dacă considerarea defocalizării ca factor de influență este potrivită. Rezultatele obținute au arătat că defocalizarea se comportă ca un factor care se substituie unei scăderi a puterii, mai precis a intensității la suprafața piesei. Astfel se arată că efectul tehnologic principal generat de focalizarea radiației în interiorul piesei îl reprezintă scăderea intensității fascicolului lase la suprafața piesei. Aceasta este echivalentă cu scăderea puterii. Punctul acesta de vedere este confirmat și de experimentările de tip clasic. Eliminarea defocalizării ca factor de influență face ca o putere „mai mică” să fie pusă față în față cu viteza de sudare, provocând efecte contrare asupra caracteristicilor sudurii. În rezultatele pe planul factorial C se observă o creștere a contribuției vitezei în raport cu puterea.

(prin ea și prin interacțiunea cu puterea care are o contribuție în sensul de scădere a valorii funcției obiectiv).

4.5 Analiza variației randamentului de obținere a topiturii la sudare

Sudarea este un proces tehnologic care presupune topirea materialului. Deși procesul de sudare suferă numeroase instabilități se presupune că topirea materialului este un proces continuu, controlabil și reproductibil. Această ipoteză ajută mult studiul procesului de sudare. Valabilitatea ei se datorează aplicării ei pe un domeniu în care stabilitatea procesului de sudare a fost verificată experimental. Stabilitatea procesului topire al materialului concretizează prin considerarea constantă a ariei topite a sudurii AT. Se definește eficiența la topire K ca fiind raportul dintre energia folosită la topirea materialului și energia introdusă în material. Mai precis acesta este raportul dintre energia liniară folosită pentru topirea materialului și energia liniară dată de laser. Procesul de topire se consideră a consta din aducerea materialului de la temperatura ambiantă în stare topită. Aceasta se caracterizează prin conținutul de căldură $L_0=2396$ J/g pentru Fe [Drăgănescu, 1986]. Densitatea materialului a fost considerată cea pentru fierul pur. Valorile calculate pentru raportul K se găsesc în tabelul din Anexa. Rezultatele arată că pentru sudurile clasificate în regimul de conducție raportul K se află sub valoarea de 15%. Valoarea maximă obținută a fost de 78% (sudura 36) iar pentru cel mai evident regim de keyhole (raportul F minim) de 62% (sudura 32)

$$K = \frac{\rho \cdot L_0 \cdot AT}{E_l} [\%] \quad (4.61)$$

În cele ce urmează vor fi prezentate grafic variațiile randamentului K . Se va analiza variația în funcție de putere, viteza de sudare și energia liniară. Reprezentările au fost realizate folosind funcții de regresie.

Figura 4.30 arată că randamentul K crește puternic cu puterea pentru toate cele trei valori ale defocalizării. Aceasta creștere corespunde trecerii de la regimul de conducție la regimul keyhole. Tipul de variație oscilează între tipul pătratic și cel liniar. La defocalizarea $\delta = -4\text{ mm}$ unde intensitatea la suprafață este minimă, tipul creștere este unul pătratic care formează un maxim la puterea de 2kW. La defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$ creșterea este liniară, variație care are un caracter intermediar spre cea de la $\delta = 0$ care este pătratică dar are tendința de a forma un minim la valori mici ale puterii. Dacă se ține cont că domeniul experimental este limitat se poate afirma că intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei va genera un maxim. Se observă că focalizarea în interiorul piesei crește valorile randamentului K . Astfel se arată că focalizarea în interiorul piesei crește cuplajul energetic dintre radiația laser și material. Maximul cu care se termină această creștere arată limitarea creșterii și că regimul keyhole prezintă la un moment dat o limitare a cuplajului energetic relativ la topirea materialului. Astfel se arată că creșterea cuplajului energetic între laser și material presupune creșterea în același timp atât a puterii cât și a defocalizării.

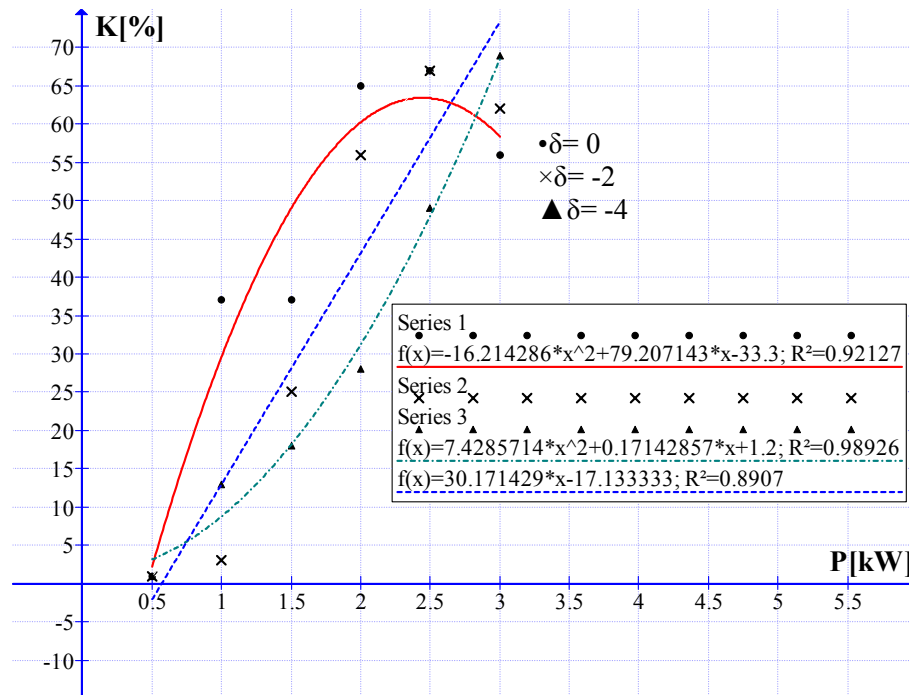


Figura 4.30 Variația randamentului K în funcție de putere, viteza $v=0,6$ m/min

Studiul variației după viteză a randamentului K arată că toate valorile pentru acesta se afla în domeniul caracteristic regimului de sudare keyhole, figura 4.31. Pentru focalizarea la suprafață $\delta = 0$ mm se obține o creștere, un maxim, o ușoară scădere și urmată de un palier constant. Astfel se observă o valoare maximă pentru valoarea vitezei 0,6 m/min. Focalizarea în interiorul piesei la $\delta = -2$ mm artă un maxim puternic apropiat de valoarea de 0,5 m/min după care urmează o scădere bruscă concretizată cu un minim pentru valoarea vitezei de 1,1 m/min, după care urmează o creștere. Pentru focalizare la $\delta = -4$ mm se obține un trend de scădere exponențială spre un palier constant. Astfel pentru defocalizarea care dă cele mai mari valori prezintă o scădere constantă de tip exponențial. Explicația acestui fenomen este că înclinarea peretelui din față al keyhole generează o modificare puternică a regimului de absorție. Există un palier minim al randamentului K care scade cu focalizarea în interiorul piesei. Acesta este dependent de intensitatea la suprafață. Astfel pentru $\delta = 0$ mm acesta are valoarea de 40%, pentru $\delta = -2$ mm acesta are valoare de 38%, iar pentru defocalizarea $\delta = -4$ mm acesta scade la 22%. Se poate presupune că aceste valori arată nivelul intensității fascicolului laser.

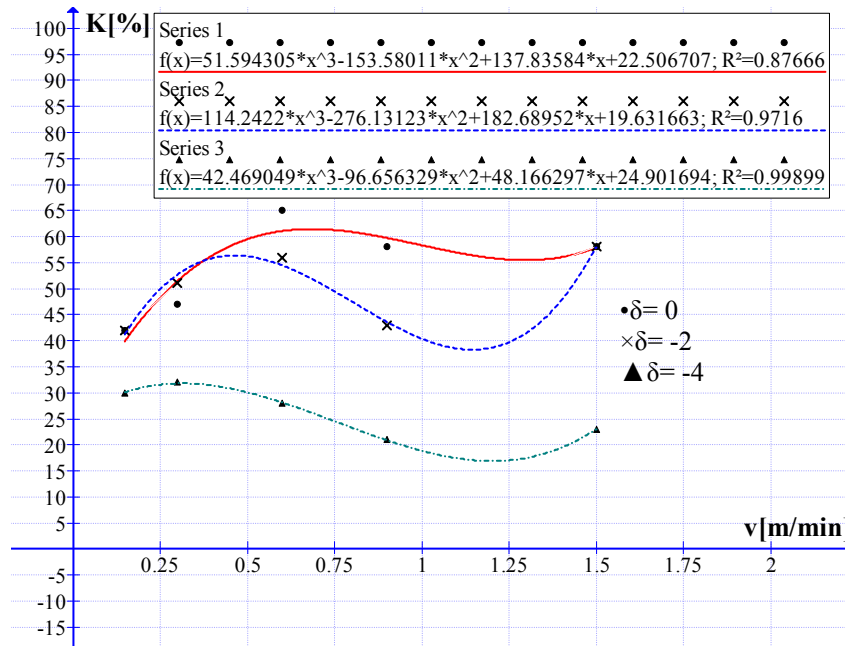


Figura 4.31 Variația randamentului K în funcție de viteză la puterea de 2 kW

Creșterea vitezei de sudare va favoriza încălzirea și topirea materialului înainte astfel că o parte din față a fascicolului topește materialul în timp ce partea din spate vaporizează. Aceasta explică efectuarea creșterii rapide pe un interval îngust al creșterii vitezei. La viteze mici se deschide succesiv pe suprafața întregului spot laser fără a fi profundă. Odată cu creșterea vitezei se crește aportul de material topit. Astfel vaporizarea în materialul topit devine mai eficientă. Scăderea urmată după maxim se datorează înclinării peretelui din față al keyhole care începe să favorizeze reflexia radiației înafara keyhole, și deci pierderea radiației. Focalizarea la $\delta = -4$ mm va prezenta numai această etapă. Astfel combinația între o viteză mare și defocalizarea în interiorul piesei pot genera o situație defavorabilă în care a doua reflexie a radiației este ratată și astfel cuplajul între radiația laser și material scade.

Variația raportului K cu energia liniară este prezentată în figura 4.32. Se observă că pentru cele trei valori ale defocalizării ale randamentului K crește puternic cu energia liniară. Se formează un maxim după care randamentul K scade. La defocalizarea $\delta = 0$ maximul apare la energia liniară de 2 kJ/cm iar la defocalizările $\delta = -4$ mm și $\delta = -3$ mm la valoarea de 3 kJ/cm. Pentru obținerea acestui maxim este necesară o energie liniară mai mare cu cât focalizarea este în interiorul piesei, adică cu scăderea intensității laserului la suprafața piesei.

Studiul variației raportului K arată valoarea acestuia crește în cazul regimului keyhole. Intensitatea la suprafață conduce către o valoare maximă a raportului K . Aceasta arată că efectul de creștere a cuplajului dintre radiație și material datorat keyhole este limitat. Valorile obținute pentru randamentul K (eficiența absolută) în cazul regimului keyhole sunt apropiate de valoarea de 66 % prezentată de [Ream, 2004] citând pe Shift Hook și Glick. În evaluarea randamentului K pe lângă valorile provenite din datele experimentale intervine și

evaluarea conținutului de căldură L_0 S-a arătat că aceste valori depind de variația căldurii specifice a oțelului cu temperatura [Ream, 2004]. Valorile randamentului K diferenciază clar sudurile în regimul keyhole de cele în regimul de conducție.

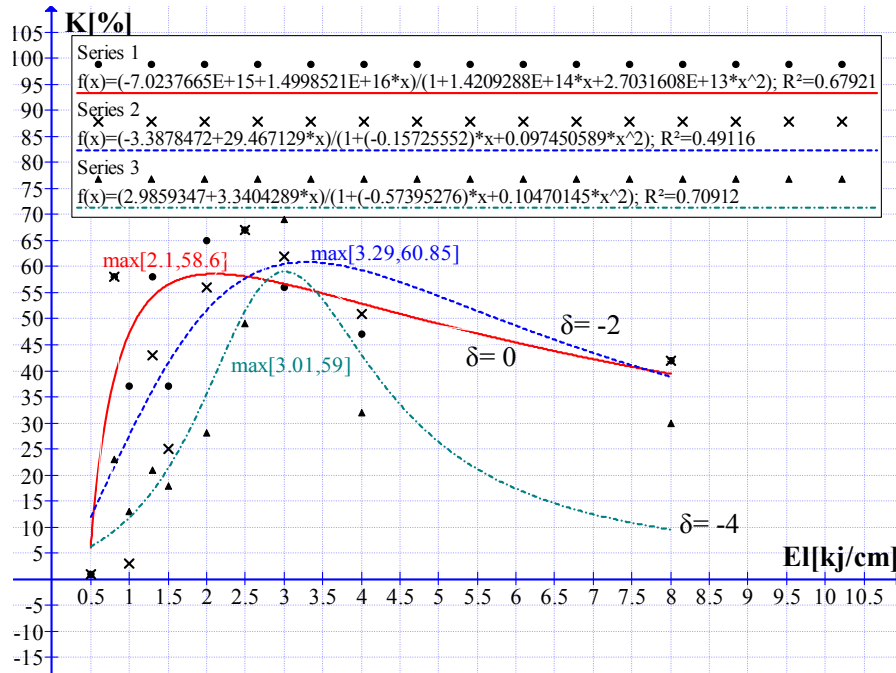


Figura 4.32 Variația randamentului K în funcție de energia liniară

4.6 Concluzii

În Capitolul 4 s-a realizat analiza variațiilor pentru caracteristicile sudurii. Prin secționarea sudurii s-a măsurat lățimea, profunzimea și aria zonei topite. Variațiile analizate au arătat capacitatea laserului de a topi materialul. Variații asemănătoare au fost prezentate și în [Charschan 1993]. Rezultatele prezentate au o formă concretă și explicită pentru materialul studiat. Se pune în evidență variațiile datorate prezenței keyhole. Există o bună corelație între rezultatele date experimentările după seriile clasice și factoriale. Modelele matematice prezentate au tratat "la fel" (relațiile din modele matematice sunt omogene, variabilele se pot interschimba) factorii de influență și interacțiunile dintre aceștia. Mai multe informații despre procesul de sudare vor fi obținute prin analiza suprafeței sudurilor.

Problematika abordată în Capitolul 4 este apropiată de cea abordată în studiile următoare. Astfel ca parametrii variații s-au considerat puterea laserului, viteza de sudare și a defocalizării în studiile [Bathahny, 1997], [Costa, 2003] și [Kluger, 2002]. Interesul particular pentru variațiile produse de defocalizare asupra caracteristicilor sudurii au fost prezentat în lucrările [Akman, 2009], [Kim, 2008], [Liu, 2007]. În acestea s-a utilizat focalizarea fascicolului laser în interiorul piesei. Focalizarea fascicolului laser deasupra piesei a fost utilizată în lucrarea [Borrisutthekul, 2005]. Pentru caracterizarea sudurilor s-a folosit energia liniară ca parametru în lucrările [Han 2001], [Sierra, 2007], [Ancona, 2007]. Ca mărimi măsurate care arată caracteristicile sudurilor lățimea și profunzimea sudurilor

ocupă un loc principal. Se prezintă variații de tip clasic pentru lățimea și profunzimea sudurilor în lucrările [Durr, 2004], [Jones, 2000], [Shannon, 1995]. Raportul dintre lățimea și profunzimea sudurii a fost abordată în lucrarea [Han, 2001]. Aria zonei topite măsurată pe secțiunea sudurilor a fost prezentată în lucrarea [Greses, 2002]. Studii care folosesc planuri experimentale de tip factorial au fost prezentate în lucrarea [Ancona, 2005]. Eficiența obținerii de topitură în procesul sudare a fost analizată în lucrările [Gresses, 2002], [Nath, 2002], [Weston, 2003]. Rezultatele experimentale prezentate în Capitolul 4 au fost prezentate de autor și în alte lucrări. Astfel o descriere a sudurilor realizate a fost prezentată în lucrarea [Boboescu 2009 a]. Analiza caracteristicilor sudurilor prin metoda experimentelor factoriale fost prezentată în lucrările [Boboescu 2009 b] , [Boboescu 2009 f], [Boboescu 2010 b], și [Boboescu 2010 e]. Variația lățimii și profunzimii sudurii după seriile experimentale clasice a fost prezentată în lucrarea [Boboescu 2010 e].

Obținerea topiturii în material este dată de intensitatea laserului la suprafața piesei și timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Domeniul de valori pentru acestea este dat de următoarele valori: intensitatea laserului $0.54 \times 10^5 - 10.61 \times 10^5$ [W/cm²], timpul de interacțiune 24-480 ms

Parametrii variații puterea laserului, viteza de sudare și defocalizarea au următoarele efecte asupra acestora :

-Puterea. Creșterea puterii laserului crește intensitatea laserului la o suprafața piesei..Topirea materialului crește cu intensitatea laserului. De la un anumită valoare, o intensitate prea ridicată nu mai favorizează topirea materialului , favorizează vaporizarea acestuia.

- Viteza de sudare. Creșterea vitezei de sudare scade timpul de interacțiune dintre radiația laser și material. Cu cât timpul de interacțiune este mai mic cu atât dimensiunile zonei topite sunt mai reduse.

-Defocalizarea . Defocalizarea , prin coborârea planului focal în interiorul piesei produce scăderea intensității la suprafața piesei prin mărirea suprafeței petei laserului (vezi tabelul cu valorile defocalizării și dimensiunea petei). Mărirea petei va crește timpul de interacțiune dintre laser și material. Focalizarea în interiorul piesei asociată cu prezența keyhole în baia de sudare va duce la propagarea radiației în keyhole și mărirea cuplajului dintre radiația laser și material. Defocalizarea poate avea astfel efecte diferite asupra topirii materialului. Nu se poate stabili o tendință clară de creștere sau descreștere a zonei topite. Din acest punct de vedere este necesară analiza efectelor produse de defocalizare asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii.

5. Analiza suprafeței superioare a sudurilor

5.1 Analiza generală a suprafețelor sudurilor

La suprafața sudurii apar valuri datorate prinderii undei de propagare a metalului topit în procesul de solidificare. Există două aspecte ale acestui proces și anume supraînălțarea generală a sudurii și valurile care apar pe fondul acestei supraînălțări. Există cazuri când aceste valuri sunt uniforme ca înălțime și frecvență, situație desemnată în cele ce urmează prin termenul de „valuri uniforme sau omogene” și situația în care apar cu regularitate două sau mai multe tipuri de valuri, situație desemnată în cele ce urmează prin termenul de valuri multiple. O formă extremă a valurilor multiple afectează supraînălțarea sudurii, aceasta produce ridicături pe suprafața piesei, fenomen numit și „humping”. Acestea au fost observate pe sudura 5. Acesta este un fenomen nedorit deoarece strică aspectul sudurii și implicit și calitatea sudurii. Supraînălțarea extremă a fost observată pentru sudurile unde s-a folosit puterea maximă 5,15,25. Pentru sudurile 5 și 32 au fost observate împrăștierea de stropi mici pe suprafața piesei. Analiza aspectului regulat al apariției valurilor a arătat că acestea conduce către identificare frecvenței apariției acestora sub formă de unde solide. S-a observat o lungime de apariție a undei solide de $\Lambda \approx 0.01$ mm. Nu s-a reușit însă diferențierea acestei valori în raport cu parametrii variației. Principala cauză este supraînălțarea sudurii care în partea centrală uniformizează valurile, astfel că distanța dintre ele nu poate fi măsurată corect. La marginea sudurii există un fenomen de curgere a topiturii care unește valurile acestea fiind iarăși dificil de diferențiat. Există însă o zonă restrânsă lateral pe care distanța dintre valuri ar putea fi măsurată. Se recomandă o deducere indirectă a acestei mărimi. În acest scop s-a măsurat conturul valului. Această mărime a avut o variație asemănătoare cu cea a lățimii sudurii. În urma analizei parțiale s-a stabilit că apariția valurilor este dată de timpul de solidificare iar consistența acestuia prin lățime și înălțime este dată cantitatea de topitură produsă în baia de sudare, cantitate care variază periodic în timpul procesului. Forma și dimensiunile valurilor depind de cantitatea de topitură din baia de sudare.

O caracteristică importantă a suprafeței sudurii o reprezintă lățimea acesteia. Axa transversală pe direcția de sudare a craterului Y are o valoare apropiată de cea pentru lățimea sudurii. Figurile anterioare arată că lățimea sudurii crește puternic cu puterea și scade cu viteza de sudare. Lățimea sudurii este legată și de formarea valurilor. Interpretarea acestora se recomandă a fi realizată excluzând fenomenul de supraînălțare a sudurii. Se observă că sudurile late arată un singur tip de valuri în timp ce sudurile înguste produc mai multe tipuri de valuri. Acestea se deosebesc între ele prin înălțimi și grosimi diferite. Aceasta arată că explicația pentru apariția mai multor tipuri de valuri constă în variația cantității de topitură din baia de sudare. La sudurile late această variația cantității de topitură din baia de sudare este mică și din această cauză valurile apar omogene. Conturul valurilor urmează deformarea craterului la partea din spate. Aceasta arată că viteza de deplasare a topiturii de la partea din față la partea din spate a băii de sudare este constantă în timpul procesului.

Sudurile realizate au arătat că în general lățimea acestora nu prezintă variații mari de-a lungul sudurii. Totuși există o ușoară creștere a lățimii sudurii după stabilizarea procesului comparativ cu începutul acesteia. Studiul lățimii sudurii într-un mod independent de zona în care s-a realizat secționarea sudurii reprezintă o caracteristică a suprafeței sudurii. Pentru studiul lățimii medii a sudurii se va analiza modificările care intervin în diagramele Pareto între lățimea medie LM și lățimea sudurii LS măsurată la secțiunea prin sudură. Lățimea medie LM [mm] a fost măsurată pe suprafața piesei în trei zone distincte în partea stabilă a sudurii: în zona de început a sudurii, în zona de mijloc, în apropiere de finalul sudurii. S-a efectuat o medie a celor trei măsurători în urma căreia a rezultat valoarea LM. Lățimea sudurii a fost măsurată în planul secțiunii în apropierea suprafeței. Lățimea medie este prin urmare o caracteristică a suprafeței sudurii.

Lățimea la medie a fost obținută prin medierea a trei valori a lățimii sudurii în zona stabilă a procesului de sudare. Rezultatele analizei după planul de experimentare factorial au arătat că în general este mai dificil în a obține coeficienți de corelație ridică și semnificația statistică a factorilor de influență pentru lățimea medie. Analiza statistică prin metoda ANOVA a arătat că referitor la lățimea medie numai puterea atinge semnificația statistică. Defocalizarea are un efect asupra LM care este compensat de variațiile din cadrul procesului, astfel că nu poate fi pus în evidență. Lățimea crește cu puterea și scade cu viteza, de o manieră asemănătoare, rolul de prim factor important îl revine puterii. Focalizarea la suprafață reprezintă o sursă de instabilitate care poate afecta ierarhia factorilor. Nu este recomandat un studiu asupra lățimii mediate în care se elimină interacțiunea dintre viteză și putere.

În cele ce urmează se va analiza comparativ ierarhizarea factorilor de influență și interacțiunilor dintre aceștia pentru LM și LS așa cum rezultă din diagramele Pareto realizate pe baza planului experimental factorial.

Diagrama pareto pentru lățimea LM, figura 5.1, arată că aceasta crește cu puterea și scade cu viteza de sudare. Acești factori au cea mai mare contribuție.

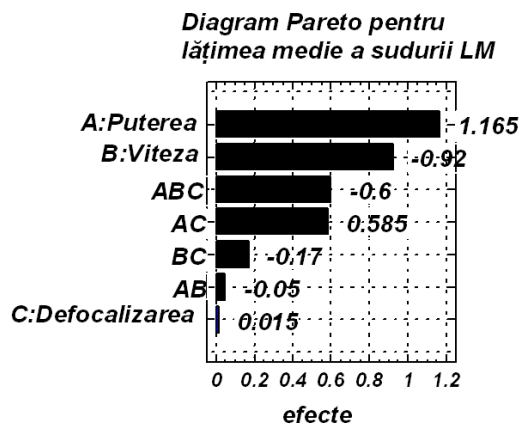


Figura 5.1 Diagrama pareto pentru lățimea medie a sudurii (după analiza A1)

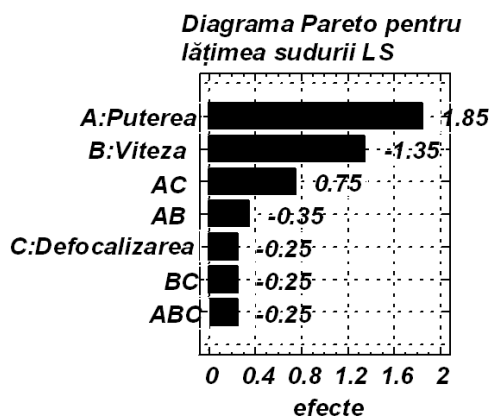


Figura 5.2 Diagrama pareto pentru lățimea a sudurii (după analiza A1)

Se observă că interacțiunea dintre cei trei factori de influență acoperă efectul defocalizării și toate interacțiunile între factorii de influență luați câte doi. Defocalizarea are un efect redus. Comparând efectele factorilor de influență pentru

LM cu cele pentru LS, figura 5.2 se observă că influența puterii și vitezei este similară pentru ambele mărimi. Se observă că pentru LS defocalizarea are o contribuție în sensul scăderii lățimii sudurii iar pentru LM aceasta are o contribuție în sensul creșterii lățimii sudurii. Figurile 5.3 și 5.4 prezintă diagramele Pareto pentru LM și LS unde s-au eliminat interacțiunile dintre factorii de influență. Ierarhia factorilor de influență este aceeași. Se observă că LM are o dependență redusă de defocalizare. Aceasta înseamnă că efectul datorat defocalizării este comparabil cu cel produs de variațiile din proces în cazul când acesta ar fi controlat numai prin variația puterii și vitezei.

Diagramele Pareto după planul A2 confirmă scăderea contribuției defocalizării pentru lățimea sudurii pentru lățimea LM sunt prezentate în figurile 5.3 și 5.4.

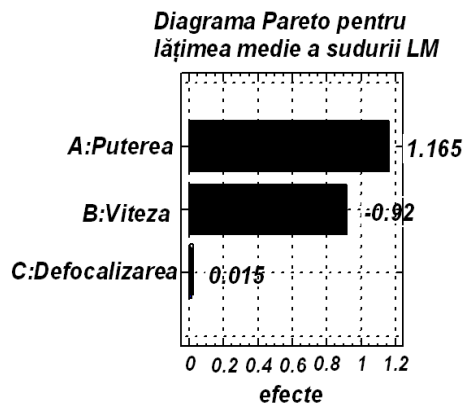


Figura 5.3 Diagrama pareto pentru lățimea medie a sudurii(după analiza A2)

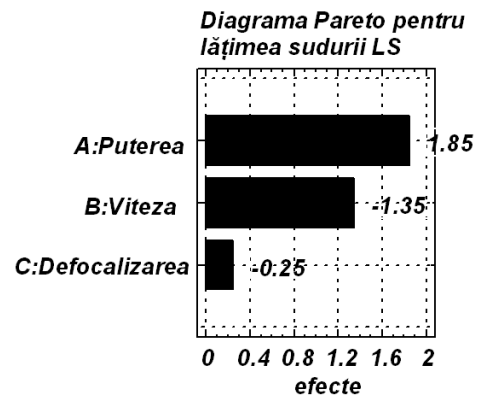


Figura 5.4 Diagrama pareto pentru lățimea a sudurii (după analiza A2)

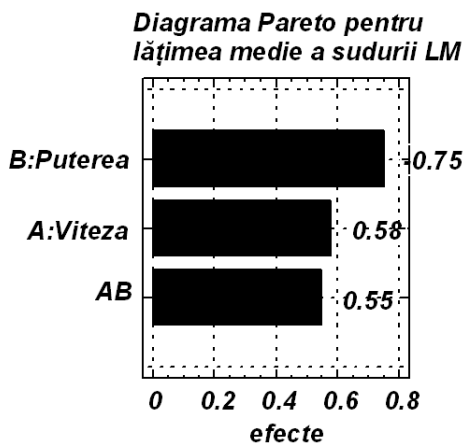


Figura 5.5 Diagrama pareto pentru lățimea medie a sudurii (după analiza B1 $\delta = 0$)

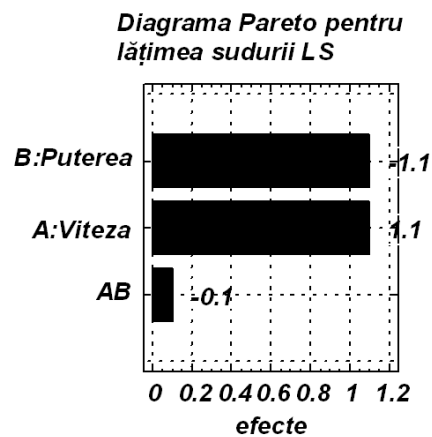


Figura 5.6 Diagrama pareto pentru lățimea a sudurii (după analiza B1 $\delta = 0$)

Din diagramele pareto după planul factorial, figurile 5.5 și 5.6 B pentru LM și LS se observă că pentru lățimea LM crește semnificativ efectul datorat interacțiunii dintre putere și viteză.

Se schimbă și sensul de acțiune al acestui efect. Interacțiunea dintre putere și viteză pentru LM produce creșterea lățimii sudurii la fel ca puterea. Pentru LS acesta se comportă la fel ca și viteza acționând în sensul scăderii lățimii sudurii. Pentru LM efectul cumulat cel mai important este cel de creștere dat de putere care prin efectul ei și prin efectul datorat interacțiunii ei cu viteza depășește pe cel de scădere dat de viteză. Aceasta arată că controlul puterii este mai important decât cel al vitezei pentru ansamblul procesului de sudare. Pentru LS efectul puterii și vitezei sunt egale cu o ușoară înclinare a rolului vitezei datorită interacțiunii între putere și viteză. Se observă că viteza de sudare apare cu primul efect în ierarhizarea factorilor de influență, chiar dacă pe ansamblu efectul de scădere datorat acesteia depășit sau egalat de putere. Acest lucru se datorează focalizării laserului la suprafața piesei. Intensitatea ridicată crește sensibilitatea relativă la timpul de interacțiune pentru topirea materialului.

Diagramele pareto pentru LM și LS după planul factorial C figurile 5.7 și 5.8 arată pentru ambele mărimi aceeași ierarhie a factorilor de influență, puterea cu efect crescător urmată de viteza cu efect descrescător urmată de interacțiunea dintre putere și viteză cu efect descrescător. Pentru LM se observă o apropiere a efectelor datorate puterii și defocalizării. Dependența puternică și explicită de putere se datorează focalizării fascicolului laser în interiorul piesei.

Diagrama Pareto pentru lățimea medie a sudurii LM

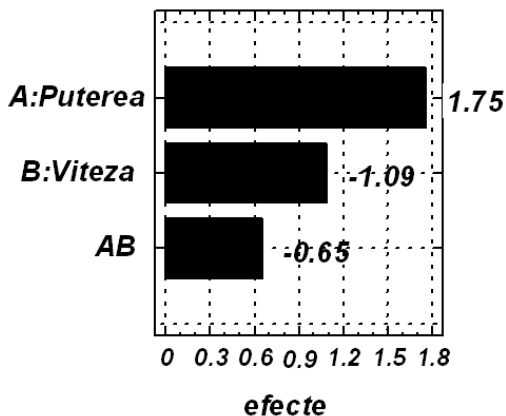


Figura 5.7 Diagrama pareto pentru lățimea medie a sudurii (după analiza C1 $\delta = -2 \text{ mm}$)

Diagrama Pareto pentru lățimea sudurii LS

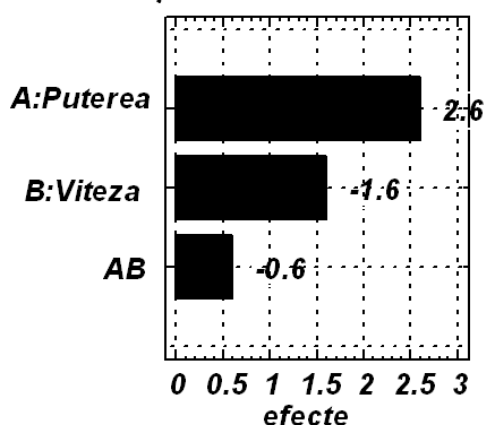


Figura 5.8 Diagrama pareto pentru lățimea a sudurii (după analiza C1 $\delta = -2 \text{ mm}$)

În urma analizei comparative a diagramelor Pareto pentru cele două lățimi măsurate s-a pus în evidență faptul că efectul defocalizării scade fiind pentru lățimea medie, devenind aleator și fiind mascat de interacțiunea între toți factorii de influență. De asemenea efectul interacțiunii între putere și viteză. Focalizarea la suprafață (planul factorial B) arată că pentru LM factorul cu contribuția cea mai importantă este puterea iar pentru LS contribuția puterii și

vitezei sunt aproape egale. Focalizarea în interiorul piesei (planul factorial C) restabilește ierarhia factorilor în favoarea puterii. Astfel se arată că în predicția lățimii sudurii atunci când valorile sunt mediate pe ansamblul procesului considerarea defocalizării ca factor de influență nu este potrivită și de asemenea are loc o creștere a interacțiunilor care poate uneori induce în eroare asupra ierarhiei reale a factorilor de influență.

5.2 Analiza craterului obținut la întreruperea procesului de sudare

La sfârșitul procesului de sudare prin întreruperea bruscă a radiației laser se formează un crater care reprezintă ce a rămas din baia de sudare după solidificare. Caracteristicile acestuia dau date despre procesul de sudare. Schema craterului obținut la sfârșitul procesului de sudare este prezentat în figura 5.9.

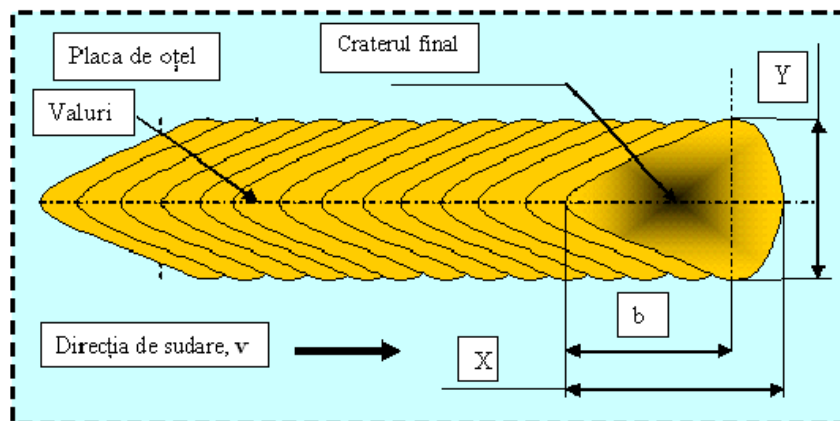


Figura 5.9 Schema craterului obținut la sfârșitul procesului de sudare

Interesul pentru studiul craterului apărut la întreruperea iradierii a apărut deoarece acesta reprezintă o gaură macroscopică obținută în urma procesului de sudare. Studiul diferitelor caracteristici ale acestuia oferă informații despre proces. Astfel suprafața craterului este identică cu cea a băii de sudare. Ea arată limitele dintre zona solidă care delimitează zona topită. Craterul este alungit în direcția opusă celei de sudare. Aceasta arată că există mișcarea topiturii către partea posterioară a băii de sudare. Aceasta va produce alături de alungirea băii prin încălzire datorată încălzirea prin convecție la partea posterioară și supraînălțarea sudurii.

Modificarea formei craterului este prezentată la variația puterii este prezentată în figura 5.10. Se observă că la puteri mici acest crater este circular. Pe măsura creșterii puterii craterul devine alungit și deformat sub formă de „lacrimă”. Efectul deformării craterului este cel mai puternic pentru focalizarea fascicolului laser la suprafață comparativ cu focalizările în interiorul piesei. Odată cu creșterea puterii crește și aria craterului.

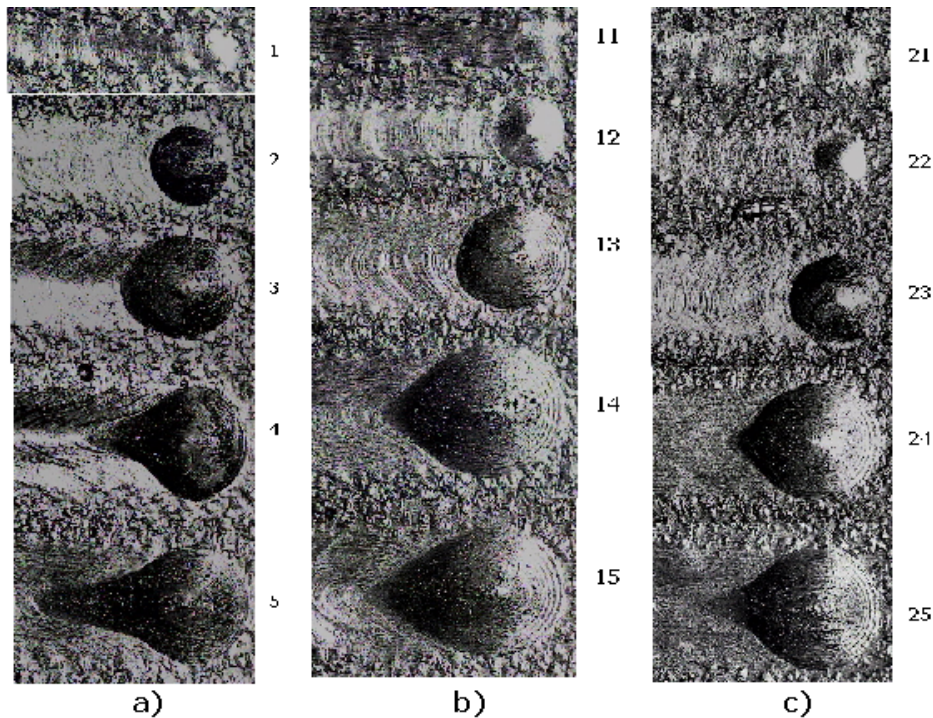


Figura 5.2 Forma craterului final al sudurii în funcție de puterea fascicolului laser (puterea crește de sus în jos) pentru defocalizările a) $\delta = 0$, b) $\delta = -2\text{ mm}$, c) $\delta = -4\text{ mm}$

Modificarea formei craterului este prezentată la variația puteri este prezentată în figura 5.11. La viteze mici craterul final este circular, apoi odată cu creșterea vitezei se obține un crater oval „ovoid”. Alungirea craterului este caracteristică focalizării la suprafață. Se observă că în toate cazurile prezentate deformarea craterului crește cu viteza de sudare. Aria craterului are însă o evoluție contrară , ea scade creșterea vitezei de sudare.

Adâncitura craterului este obținută pe de o parte datorită materialului evaporat iar pe de altă parte datorită deplasării topiturii. Nu se poate din analiza volumului de material lipsă să se stabilească cu exactitate care este contribuția celor două fenomene în parte. Craterul inițial apărut în timpul procesului de sudare are o adâncime apropiată de cea a profunzimii sudurii. Oprirea iradierii face ca topitura aflată în mișcare să se depună și să se solidifice la fundul craterului. Dacă topitura se mișcă rapid cantitatea de topitură scade și astfel se obține un crater care are o adâncitură profundă și subțire care coincide cu centrul fascicolului laser.

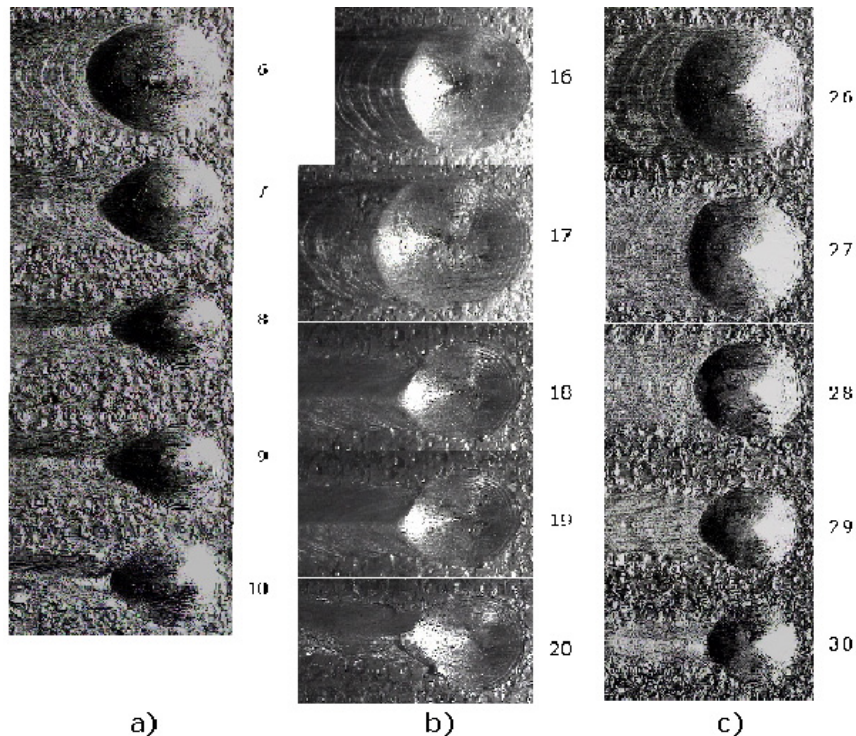


Figura 5.11 Forma craterului final al sudurii în funcție de viteza de sudare (viteza crește de sus în jos) pentru defocalizările a) $\delta = 0$, b) $\delta = -2 \text{ mm}$, c) $\delta = -4 \text{ mm}$

Acesta a fost cazul sudurilor 4 și 5. Această adâncitură este similară cu keyhole observată în timpul procesului. Pentru majoritatea sudurilor supraînălțarea obținută a fost mică. Astfel că există se poate considera că topitura în mișcare a fost reținută în crater iar volumul liber al craterului ar reprezenta volumul de material evaporat. Acesta nu a fost măsurat direct însă a fost calculat folosind aproximarea craterului sub forma de con cu vârful în punctul cu adâncimea cea mai mare. Această aproximare subvaluează volumul craterului, însă se apropie mai bine de evaluarea volumului de material vaporizat. Aria craterului a fost măsurată direct. În afară de utilizarea ei la aproximația anterioară ea este o mărime caracteristică zonei topite la fel ca și aria secțiunii. Ambele caracterizează topirea și sunt mărimi bidimensionale. Este astfel interesant în a compara cele două tipuri de variații

5.2.1 Abaterea de la circularitate a craterului

Craterul obținut la sfârșitul procesului de iradiere are o formă ovoidă. Această formă a fost caracterizată prin trei lungimi: axa mare al craterului X [mm] măsurată pe direcția de sudare, axa mică a craterului Y [mm] măsurată perpendicular pe direcția de sudare și alungirea craterului b [mm] măsurată de la partea din spate a craterului până la punctul de intersecție al celor două axe , figura 5.9. Craterul obținut a fost simetric față de axa sudurii. Cele două axe au fost măsurate între extremele craterului iar practic s-a dovedit că ele sunt

perpendicularare. Punctul de intersecție a celor două diametre poate fi numit centrul craterului. El corespunde și punctului cu adâncime maximă.

Pe baza acestor măsurători s-a urmărit obținerea unei mărimi adimensionale care să caracterizeze alungirea craterului. S-a definit raza medie ca fiind media dintre jumătățile din valoarea axei mici $Y/2$ și distanța de la centrul craterului la partea din față $X-b$. Această rază definește un ipotetic crater circular.

$$r_{med} = \frac{1}{2} \left(\frac{Y}{2} + X - b \right) [\text{mm}] \quad (5.1)$$

Abaterile de la circularitate au fost definite prin studiul alungirii craterului b relativ la raza medie. Ea este dată de următoarea relație :

$$abc = \frac{b - r_{med}}{r_{med}} [\%] \quad (5.2)$$

Abaterile de la circularitate pot avea valori pozitive și valori negative. Valorile pozitive arată un crater alungit în direcția de sudare. Valorile negative arată un crater turtit și nu alungit. În reprezentări aceste valori au fost considerate în modul.

Abaterile de la circularitate ca mărime calculată este o măsură indirectă a vitezei de mișcare a topiturii în baia de sudare. Această se explică prin faptul că numai transferul de căldură prin convecție poate modifica puternic simetria craterului în condițiile în care sursa termică (fascicolul laser) este simetrică. Variația abaterii de la circularitate cu puterea și cu viteza de sudare este prezentată în graficele care urmează.

Figura 5.12 arată creșterea puternică a alungirii craterului cu puterea. Focalizarea în interiorul materialului menține această creștere dar îi micșorează amplitudinea. Focalizarea la $\delta = -4$ mm, la puteri mici contribuie puternic la mișcarea topiturii, mai mult decât cea la suprafață sau la defocalizarea $\delta = -2$. Această comportare este urmată de o tendință de minim, după care apare comportarea de creștere observată și în celelalte cazuri. Valorile marcate cu ceruleu au fost negative din calcule. Ele au fost considerate în modul. În aceste cazuri forma craterului a fost modificată prin mărirea ei în lateral. Graficul arată că există o creștere exponențială a abaterii de la circularitate în funcție de putere. Viteza topiturii în baia de sudare urmează aceeași tendință. Din punct de vedere practic acest tip de variație înseamnă că pentru un anumit interval de puteri (care este mare pentru focalizările în interiorul materialului) viteza de mișcare a topiturii se menține în limite aproximativ constante (cu o ușoară creștere, și eventuale variații), după aceasta apare o creștere bruscă și puternică. Aceasta certifică cuplarea fenomenului de mișcare a topiturii. Acesta va acționa în detrimentul topirii și vaporizării

Abaterile de la circularitate prezintă o tendință evidentă de creștere cu viteza, figura 5.13. Această creștere prezintă un maxim. Comportarea este similară pentru cele trei cazuri de focalizare. Valorile cele mai ridicate sunt obținute pentru focalizarea la suprafață. Creșterea vitezei înseamnă mutarea principalelor efecte termice către suprafață datorită micșorării timpului de interacțiune. În acest context are loc creșterea vitezei de mișcare a topiturii. La viteza cea mai mare folosită în experiment, timpul de interacțiune fiind foarte mic se produce puțină topitură, astfel viteza de mișcare a topiturii scade.

Figura 5.12 arată că abaterea de la circularitate depinde puternic de putere. Abaterea de la circularitate crește cu puterea. Efectele imediat următoare sunt cele datorate defocalizării și vitezei de sudare. Aceste efecte scad abaterea de la circularitate. Se arată astfel că intensitatea la suprafața piesei scăzută dă focalizarea în interiorul piesei și timpul interacțiune redus crește posibilitatea de obținere a unui crater circular. Interacțiunea dintre defocalizare și viteză are un efect contrar important. Aceasta arată deformarea craterului la creșterea vitezei. Efectele produse de interacțiunile între factori sunt aproape egale. Se observă că defocalizarea ocupă a doua poziție în ierarhia factorilor. Se arată astfel că defocalizarea ocupă un rol important în ceea ce privește forma băii de sudare. Defocalizarea scade abaterea de la circularitate. Se arată că focalizarea în profunzimea piesei favorizează fenomene care au loc la partea inferioară a băii de sudare, micșorând mișcarea topiturii.

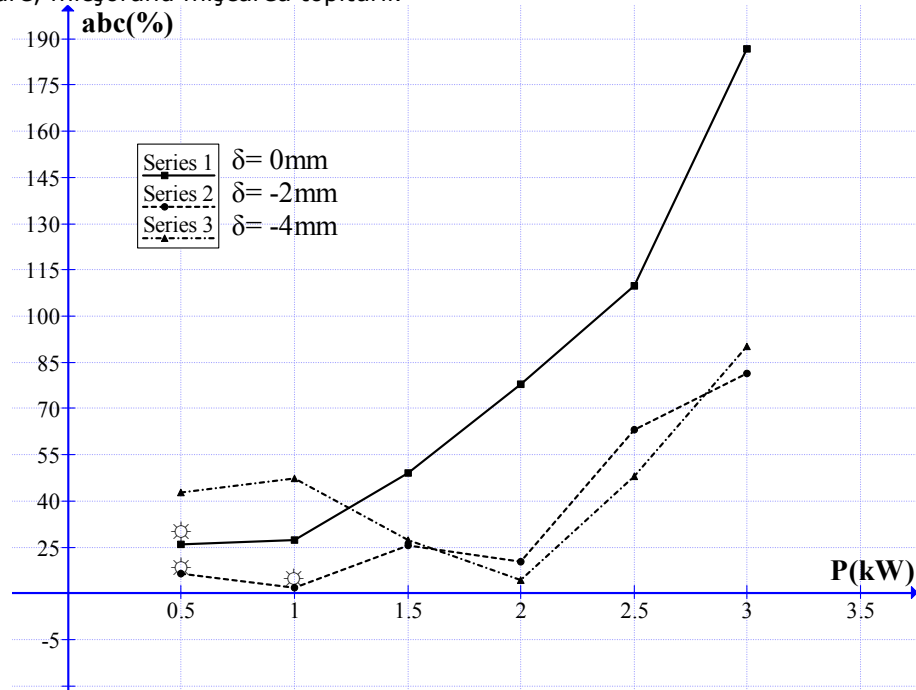


Figura 5.12 Variația parametrului calculat Abaterea de la circularitate în funcție de putere la viteza de 0.6 m/min

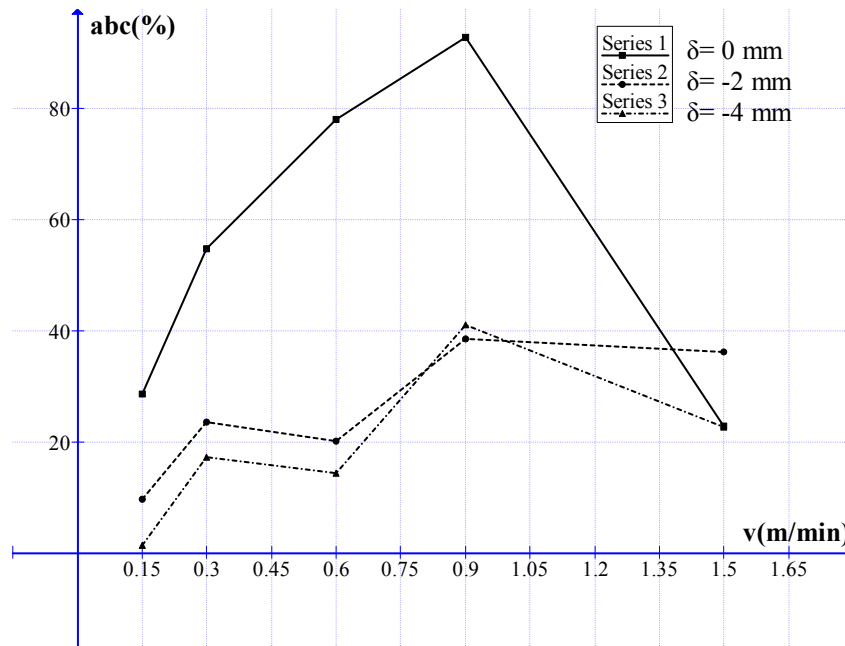


Figura 5.13 Variația parametrului calculat Abaterea de la circularitate în funcție de viteză la P=2kW

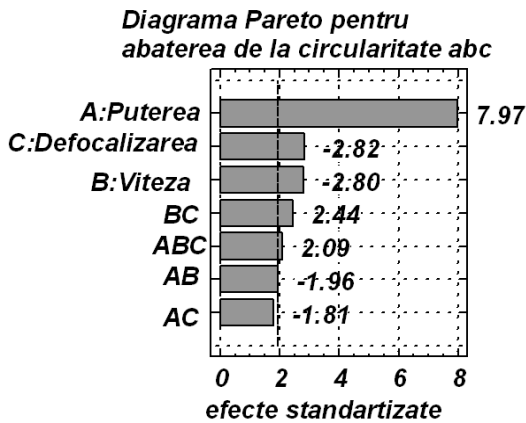


Figura 5.14 diagrama Pareto standartizată pentru abaterea de la circularitate cu interacțiuni

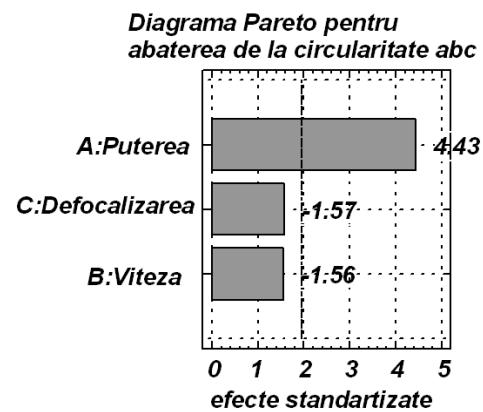


Figura 5.15 diagrama Pareto standartizată pentru abaterea de la circularitate fără interacțiuni

Viteza are un efect de scădere asupra abaterii de la circularitate datorat în principal scăderii energiei liniare și prin aceasta și a curgerii topiturii. Interesantă este interacțiunea dintre viteză și defocalizare, ceasta are un efect contrar de creștere a abaterii de la circularitate. Creșterea simultană a vitezei și a focalizării înseamnă schimbarea înclinării peretelui din față al keyhole. O anumită înclinare (care se obține la creșterea vitezei) corelată cu focalizarea în profunzime va conduce

la creșterea cuplajului energetic . Această creștere va fi folosită la și la creșterea mișcării topiturii. Efectele factorilor și interacțiunilor sunt apropiate de pragul de semnificație statistică. Se arată că predicția modelului matematic pe baza căruia a fost realizată diagrama Pareto este bună. Figura 5.13 prezintă efectele în situația în care se renunță la considerarea interacțiunilor între factori. Se păstrează ierarhia factorilor de influență cu efectul pronunțat al puterii. Se pierde semnificația statistică pentru defocalizare și viteza de sudare.

5.2.2 Aria craterului

Craterul care s-a obținut la sfârșitul procesului de sudare are o formă ovoidă în cele mai multe cazuri . Aria craterului $acr [mm^2]$ a fost măsurată folosind o metodă indirectă care a folosit fotografii mărite ale craterului. În cele ce urmează sunt redate variațiile pentru aria craterului în funcție de putere și de viteza de sudare.

Figura 5.16 arată că aria craterului crește cu creșterea puterii. Această creștere este liniară pentru focalizările în interior. Focalizarea la suprafață prezintă o un maxim pentru puterea de 2kW, urmată de un minim. Aceasta arată că în acest caz în care intensitatea la suprafață a crescut puternic există o puternică cuplare a energie în interiorul piesei. Variația pentru focalizarea în interiorul piesei pentru aria craterului este similară cu cea ariei secțiunii topiturii.

Figura 5.17 arată că suprafața craterului scade cu viteza. Scăderea are o formă exponențială. Ea se desfășoară similar pentru cele trei focalizări. Valorile cele mai mari sunt pentru focalizarea la suprafața piesei.. La viteze mari efectul focalizării la suprafață este depășit de valorile focalizării la $\delta = -2$ mm. Aceasta este o dovadă că în cazul în care timpul de interacțiune devine mic focalizarea în interiorul piesei, compensează parțial efectul scăderii timpului de interacțiune favorizând topirea materialului. Se observă comparând figurile că tipul de variație pentru suprafața craterului este același cu cel pentru aria secțiunii topite.

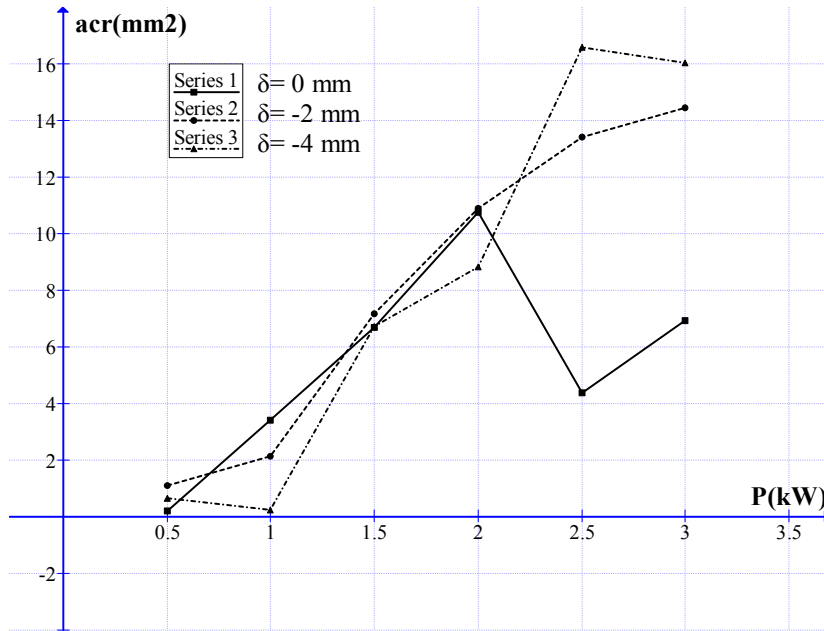


Figura 5.16 Variația ariei măsurate a suprafeței craterului în funcție de putere la viteza de 0.6 m/min

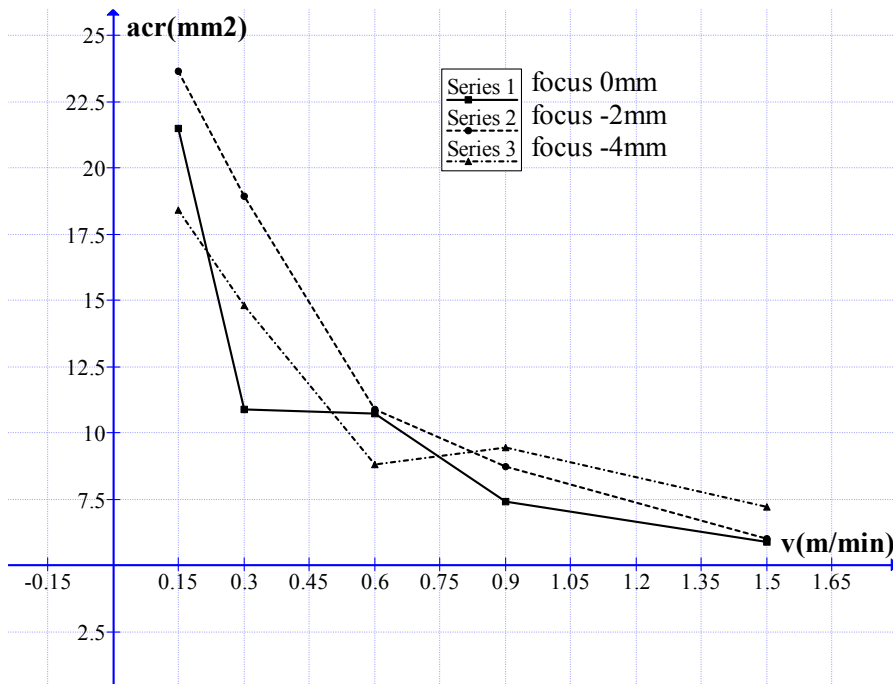


Figura 5.17 Variația ariei măsurate a suprafeței craterului în funcție de viteză la P=2kW

Figura 5.16 arată că aria craterului crește puternic cu puterea. Pentru cazul în care se elimină interacțiunile, figura 5.17 se obține și pragul de semnificație statistică pentru putere. După aceasta urmează interacțiunea dintre putere și viteză, care va crește aria craterului, Influența defocalizării nu este statistic semnificativă ea fiind acoperită de interacțiunea dintre cei trei factori de influență. Interesant este că ea are o contribuție crescătoare în ceea ce privește aria craterului. Numai termenii care conțin interacțiunea dintre viteză și defocalizare duc scăderea ariei craterului. Aceasta confirmă cele arătate anterior potrivit căreia creșterea vitezei și coborârea punctului focal în interiorul piesei favorizează fenomenele care au loc în interiorul materialului în detrimentul celor care au loc la suprafață.

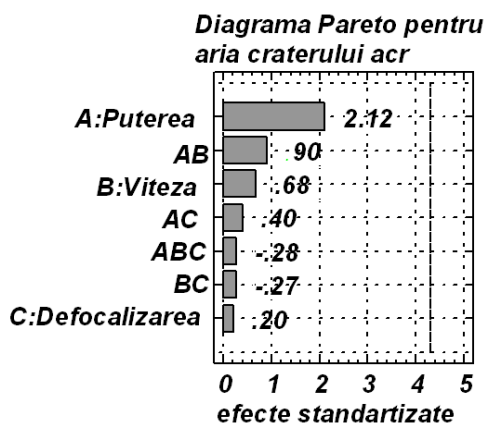


Figura 5.18 Diagrama pareto standartizată pentru aria craterului, cu toate interacțiunile

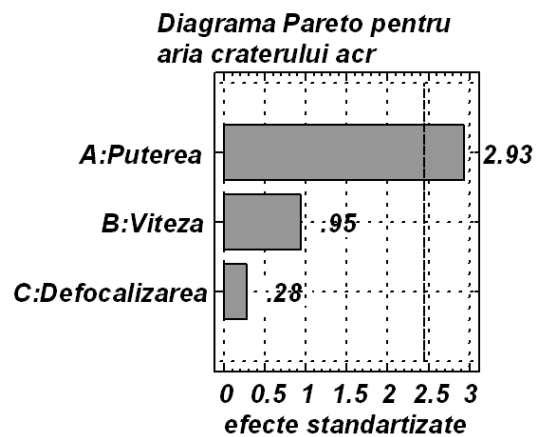


Figura 5.19 Diagrama pareto standartizată pentru aria craterului, fără interacțiuni.

5.2.3 Adâncimea craterului

Adâncimea craterului i [mm] este o mărime care arată evoluția în profunzimea materialului a procesului de sudare. Ea arată în materialul lipsă datorat vaporizării și mișcării topiturii. Scopul măsurării adâncimii craterului a fost evaluarea raportului dintre adâncimea craterului și profunzimea sudurii. Variația separată a adâncimii craterului este similară cu cea profunzimii sudurii. Variația adâncimii craterului cu puterea și cu viteza de sudare este prezentată în graficele următoare.

Figura 5.20 arată că adâncimea craterului crește cu puterea liniar, pentru toate cele trei valori ale defocalizării. Această creștere este mai puternică pentru focalizarea la suprafață comparativ cu focalizarea în interiorul piesei. Se observă astfel că adâncimea craterului urmează fidel evoluția intensității fascicolului laser la suprafața piesei.

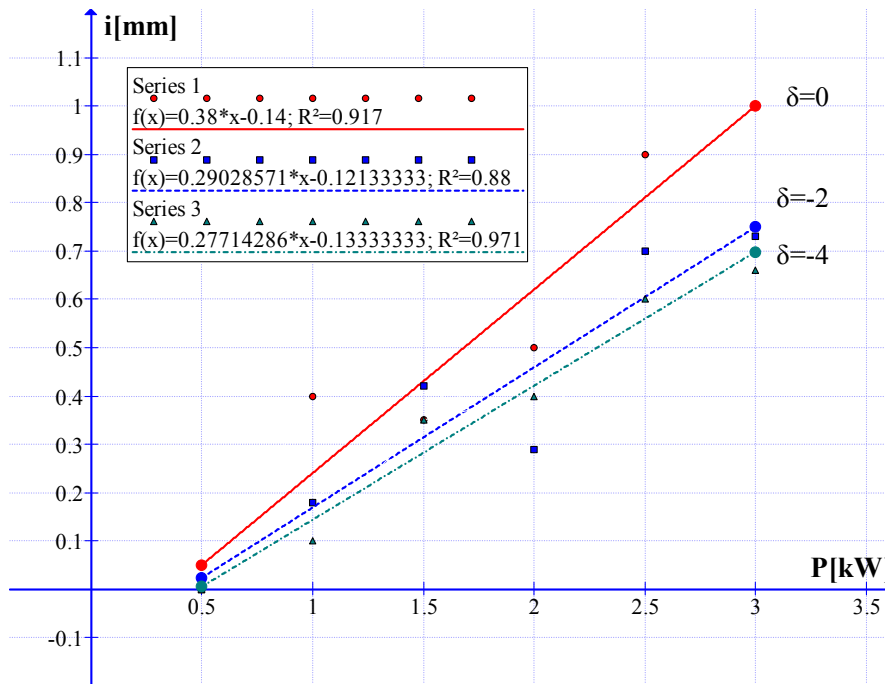


Figura 5.20 Variația adâncimii craterului în funcție de putere la viteza de 0.6 m/min

Figura 5.21 arată că există o scădere exponențială a adâncimii craterului în funcție de viteză. Această scădere are loc la fel pentru toate cele trei valori ale defocalizării. Scăderea este de tip logaritmic și oarecum moderată. Ca formă este comparabilă cu variația cu viteza de sudare a lățimii și a profunzimii sudurii. Umplerea craterului cu topitură provenită de la topirea la suprafața piesei cât și de la topirea în profunzime face ca profunzimea craterului să fie mult mai puțin sensibilă la variația vitezei de sudare.

Figura 5.22 arată că puterea crește adâncimea craterului în timp ce viteza o scade. Fiecare din cei doi factori are o contribuție aproape egală. Există o bună semnificație statistică pentru factorii și interacțiunile până la interacțiunea dintre cei trei factori. Figura 5.23 arată că puterea și viteza au contribuții egale însă contrare, aceștia au semnificație statistică. Interacțiunea dintre putere și defocalizare are un efect de scădere adâncimii craterului. Acesta poate fi asociat cu creșterea cantității de topitură. Creșterea simultană a puterii și a vitezei defavorizează vaporizarea materialului și astfel se crește cantitatea de topitură. Mai multă topitură înseamnă un crater mai puțin adânc. Interacțiunea dintre viteză și defocalizare crește adâncimea craterului. Ca și în cazurile anterioare creșterea vitezei și coborârea punctului focal crește cuplajul energetic. Consecința este creșterea vaporizării în detrimentul topirii și deci favorizarea apariției unui crater adânc.

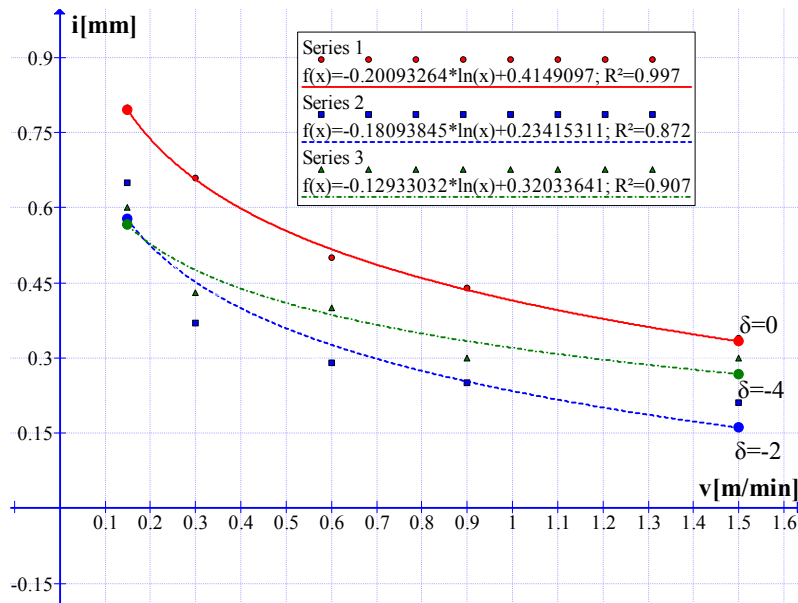


Figura 5.21 Variația adâncimii craterului funcție de viteză la puterea de $P=2kW$

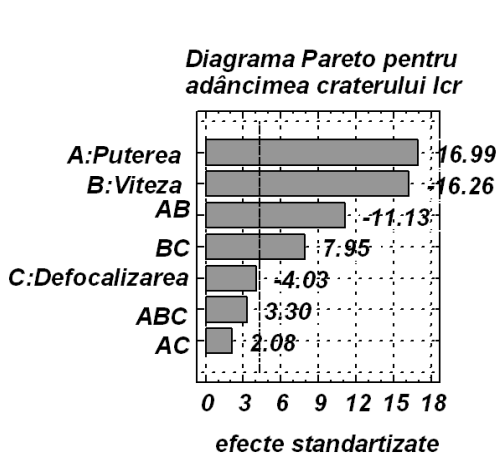


Figura 5.22 Diagrama pareto pentru adâncimea craterului cu considerarea interacțiunilor

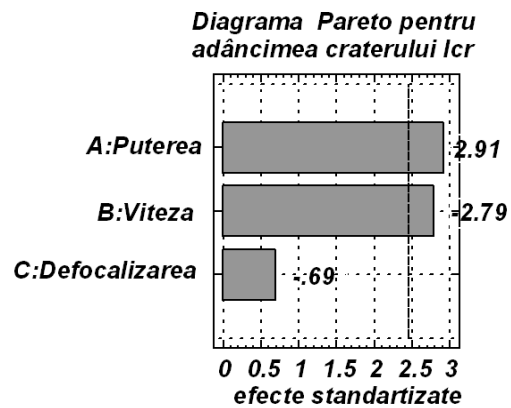


Figura 5.23 Diagrama pareto pentru adâncimea craterului fără considerarea interacțiunilor

5.2.4 Raportului G între adâncimea craterului și profunzimea sudurii

Raportul G (i/h) [-] între adâncimea craterului i și profunzimea sudurii h este un raport care arată efectul vaporizării și al deplasării topiturii relativ la zona topită. Prin extrapolarea informațiilor oferite de acesta la situația la zona topită

respectiv cea vaporizată, în timpul procesului se pot obține informații utile. Raportul G poate fi considerat într-o anumită interpretare ca un raport de asemănare între profunzimea zonei vaporizate și profunzimea zonei topite. Privită în mod direct această interpretare este eronată deoarece profunzimea keyhole se apropie de cea zonei topite, raportul celor două fiind apropiat de unitate, cu valori mult mai mari decât ale raportului G.

Pe de altă parte se poate ca prin medierea în timp și pe ansamblul băii de sudare să considerăm o ipotetică zonă vaporizată și respectiv o ipotetică zonă topită. Raportul profunzimilor acestora ar fi reprezentat de G. Pe baza acestei considerării se obține că raportul arilor secțiunilor prin cele forme este dat de G^2 iar raportul volumelor este dat de G^3 . Acestea pot fi legate de date experimentale în cazul în care se efectuează măsurători cantitative asupra porozităților din suduri. De asemenea ele au importanță în modelarea keyhole și în stabilirea unei forme teoretice pentru aceasta cât mai apropiată de cea observată experimental.

Valorile pentru raportul G obținute sunt în general mici ceea ce arată că obținerea de topitură este predominantă în cazul procesului de sudare. În graficele următoare sunt prezentate variațiile raportului G cu puterea și cu viteza de sudare. Figura 5.24 arată că la puteri mici raportul G crește puternic pentru puteri mici la defocalizarea $\delta = -2$ mm. Astfel valoarea defocalizării $\delta = -2$ mm produce valori ridicate în ceea ce privește vaporizarea și deplasarea topiturii. Același tip de variație se prezintă și pentru defocalizarea $\delta = -4$ cu un maxim evident.. Pentru toate cele trei valori ale defocalizării variația dată de putere pentru raportul G este sub forma unei creșterii urmate de prezența unui maxim și o descreștere la puteri mari,.Creșterea puterii înseamnă creșterea cantității de material topit. Astfel se observă că valorile raportului G scad. Valorile cele mai mari se obțin pentru focalizarea în interiorul piesei. Puterea de 1kW determină apariția unui maxim la defocalizarea $\delta = -4$ mm. Un al doilea maxim mult mai mic apare pentru acestea la puterea de 2.5 kW după care urmează o tendință de stabilizare sau de descreștere. Această comportare este similară pentru cele trei defocalizări, aici sunt puse în evidență tendința de creștere până la maxim și mai puțin scăderea ce urmează acestuia.

Figura 5.25 arată că raportul G este relativ constant la variația vitezei. Aceasta arată că factorul principal care influențează atât adâncimea craterului cât și profunzimea sudurii este puterea. Valorile pentru raportul G sunt mici deoarece la puterea de 2kW se află un minim (vezi figura anterioară). Diferențele pentru cele trei focalizări nu sunt semnificative însă se observă că valori mai ridicate se obțin pentru focalizarea la $\delta = -4$. Aceasta arată că focalizarea în interiorul piesei favorizează mișcarea topiturii.

Diagrama Pareto, figura 5.26, pentru raportul G arată că acesta influențat ca prim efect de putere. Raportul scade cu puterea și crește cu defocalizarea. Scăderea raportului G cu puterea semnifică că principalul cuplaj energetic are loc în formarea de topitură în detrimentul vaporizării și mișcării topiturii. Viteza are contribuție nesemnificativă. Creșterea raportului G cu defocalizare arată că focalizarea în interiorul piesei, mai precis în keyhole crește contribuția vaporizării Studiul tuturor interacțiunilor arată că efectul vitezei este mai mic decât interacțiunea între cei trei factori. Eliminarea interacțiunilor figura 5.27 arată că principalul efect asupra raportului G se datorează puterii, acesta dobândește semnificația statistică.

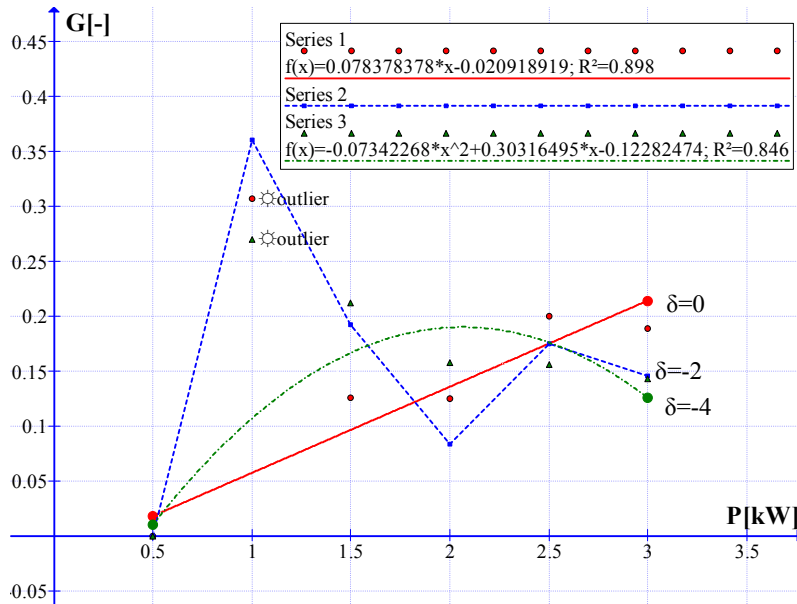


Figura 5.24 Variația raportului dintre adâncimea craterului și penetrarea sudurii de putere la viteza de 0.6 m/min

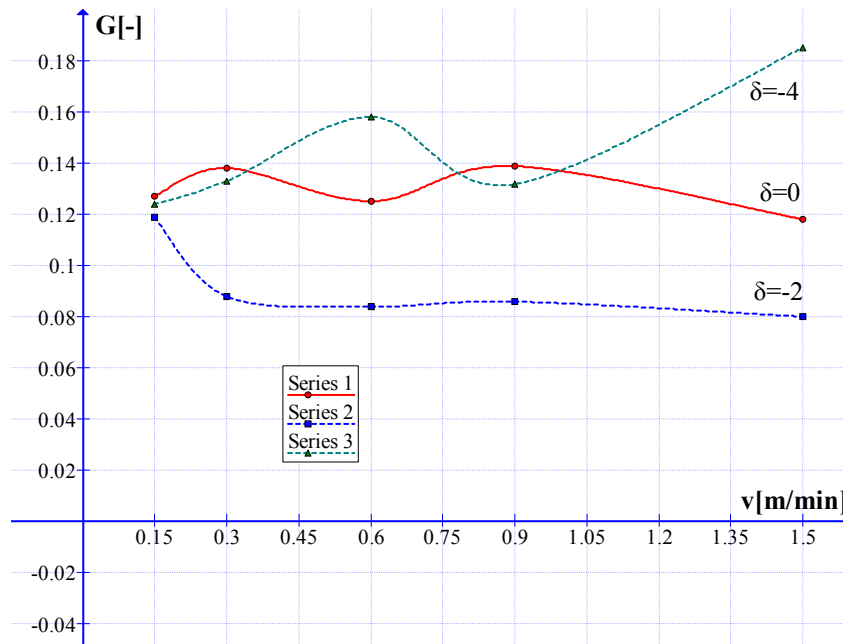


Figura 5.25 Variația raportului dintre adâncimea craterului și penetrarea sudurii funcție de viteză la puterea de 2kW

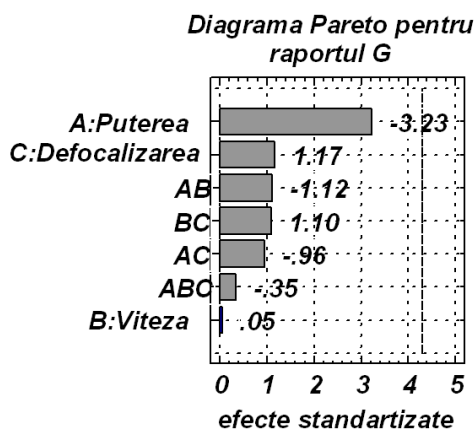


Figura 5.26 Diagrama pareto pentru raportul G cu considerarea interacțiunilor

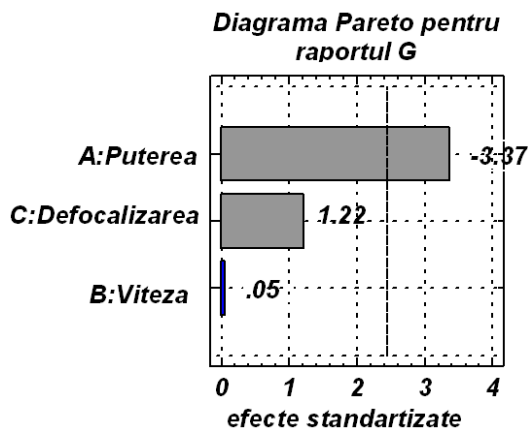


Figura 5.27 Diagrama pareto pentru raportul G fără considerarea interacțiunilor

5.3 Supraînălțarea sudurii

Supraînălțarea sudurii su [mm] are ca și cauze mișcarea topiturii și schimbarea structurii cristaline a materialului solidificat după topire. Supraînălțarea sudurii este o mărime care variază în timpul procesului. Aceasta debutează cu o supraînălțare mare, întreaga topitură în mișcării fiind deplasată la suprafață. Pe parcursul procesului supraînălțarea scade. Acest lucru se datorează preîncălzirii materialului înainte de a fi iradiat de fasciculul laser. Această preîncălzire favorizează vaporizarea. Aceasta va scădea datorită scăderii cantității de topitură. În cazul experimentelor noastre această scădere a fost foarte lentă ajungând la stabilitate după o lungime a sudurii de 70 mm de la începutul iradierii. Acest lucru se datorează în principal grosimii piesei care a făcut ca încălzirea înainte să se stabilizeze cu greu. În cazul unui proces de sudare complet penetrată în care piesele sudate sunt mult mai subțiri încălzirea înainte se va stabili mai repede. Se va observa însă o creștere a zonei afectate termic comparativ cu începutul procesului, acesta se va stabili și ea. Altfel spus supraînălțarea și zona afectată termic sunt dependente de încălzirea înainte, stabilirea acesteia la o valoare constantă depinde de grosimea piesei.

Valorile supraînălțării au fost măsurate în zona stabilă în apropierea locului în care piesa a fost secționată. Valorile pentru acestea au fost foarte mici, în unele cazuri sub suprafața piesei. Supraînălțarea este neglijabilă în raport cu profunzimea piesei. Variația supraînălțării sudurii în zona secționată cu puterea și cu viteza de sudare este prezentată în graficele următoare.

Figura 5.28 arată în general o creștere a supraînălțării sudurii în funcție de putere. Se arată de fapt creșterea cantității de topitură deplasată. Se observă că scăderea intensității fasciculului laser la suprafața piesei datorită atât unei puteri mici cât și unei focalizări excesive în interiorul piesei $\delta = -4$ produce o supraînălțare negativă. Aceasta înseamnă că suprafața sudurii se află sub cea a piesei. Aceasta arată că în aceste situații predomină vaporizarea materialului.

Figura 5.29 arată că supraînălțarea sudurii este relativ constantă funcție de variația vitezei. Supraînălțarea scade semnificativ odată cu focalizarea în interiorul

piesei. Focalizarea în interiorul piesei $\delta = -4$ mm va produce sudurii coborâte sub suprafața piesei.

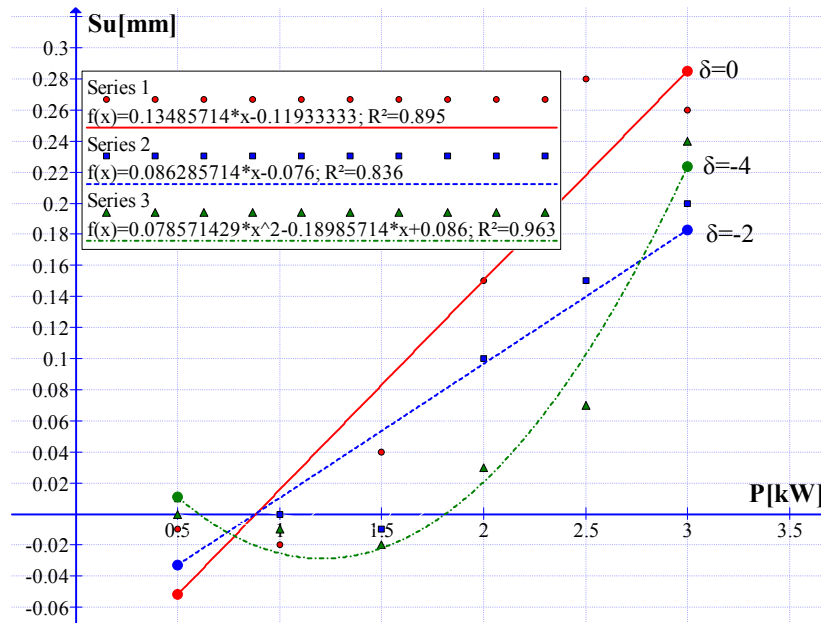


Figura 5.28 Supraînălțarea sudurii funcție de putere la viteza de 0.6 m/min
 Diagrama pareto pentru supraînălțare arată, figura 5.30 că supraînălțarea sudurii depinde puternic de putere. Supraînălțarea crește cu puterea fascicolului laser.

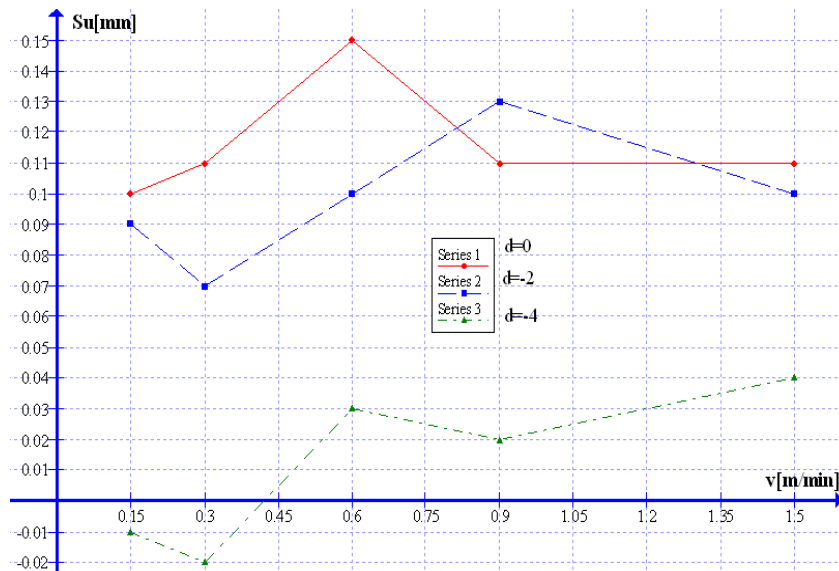


Figura 5.29 Supraînălțarea sudurii funcție de viteză la puterea P=2 kW

Restul factorilor au o contribuție foarte mică, mai mică decât interacțiunea dintre cei trei factori. Se confirmă astfel dependența slabă de viteză observată în experimentările anterioare pentru mărimile care caracterizează suprafața sudurii. Eliminarea interacțiunilor, figura 5.31 arată același tip de dependență

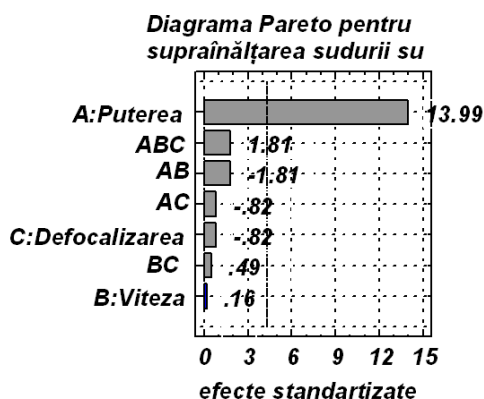


Figura 5.30 Diagrama pareto standartizată pentru supraînălțarea sudurii cu considerarea interacțiunilor

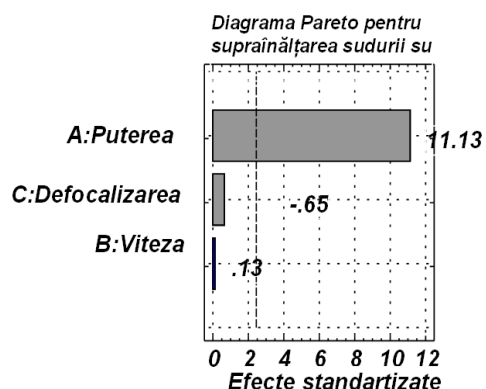


Figura 5.31 Diagrama pareto standartizată pentru supraînălțarea sudurii fără considerarea interacțiunilor

5.4 Analiza variației timpului de existență a băii de sudare

Craterul care se obține la sfârșitul procesului de sudare reproduce într-o anumită măsură baia de sudare. Axa mare a craterului X va da lungimea pe care se menține baia de sudare. Raportul dintre acesta și viteza de sudare va da un care va fi numit timp de existență a băii de sudare. Acesta arată cu aproximație timpul în care este menținută baia de sudare. Analiza acestei mărimi în funcție de parametrii de proces prezintă importanță.

$$t = \frac{X}{v} \text{ [ms]} \quad (5.3)$$

Variația timpului de existență a băii de sudare cu puterea și cu viteza de sudare este prezentată în figurile următoare.

Figura 5.32 arată variația timpului de existență a băii de sudare în funcție de putere. Se observă o creștere aproape liniară cu puterea a timpului de existență a băii de sudare. Aceasta se termină printr-un maxim. Acesta a fost pus în evidență numai pentru focalizarea la suprafața piesei. Se observă faptul că la puteri mici și la puteri mari focalizarea în interiorul piesei menține mai mult timp baia de sudare în comparație cu focalizarea la suprafața piesei.

Figura 5.33 arată că timpul de existență a băii de sudare scade exponențial cu viteza. Această scădere este puternică. Valorile obținute sunt apropiate pentru cele trei defocalizări. Pentru viteze mici și focalizarea la $\delta = -4$ s-au obținut valori puțin coborâte ale timpului de existență a băii de sudare. Timpul de

existență a băii de sudare are astfel o dependență puternică de viteză de tipul descreștere logaritmică.

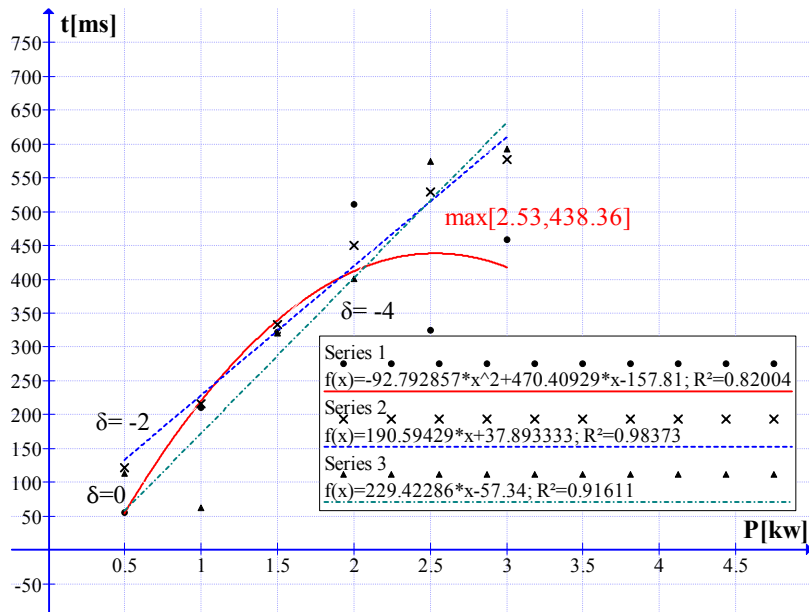


Figura 5.32 : Variația timpului existență a băii de sudare în funcție de putere la viteza de 0.6 m/min

Din figura 5.31 se observă că timpul de existență a băii de sudare crește aproape liniar cu energia liniară. Creșterea are loc pentru toate valorile defocalizării. Focalizarea în interiorul piesei la $\delta = -2 \text{ mm}$ arată valorile cele mai ridicate ale timpului de existență a băii de sudare (până la energia liniară de 6 kJ/cm). Acest lucru se datorează îmbinării între creșterea petei laserului la suprafața piesei datorită focalizării în interiorul acesteia și menținerea unui nivel ridicat al intensității laserului. Focalizarea la suprafață la energii liniare mici va da timpul de existență al băii de sudare cel mai mic comparativ cu celelalte valori ale defocalizării. Aceste valori vor crește treptat ajungând să fie cele mai mari.

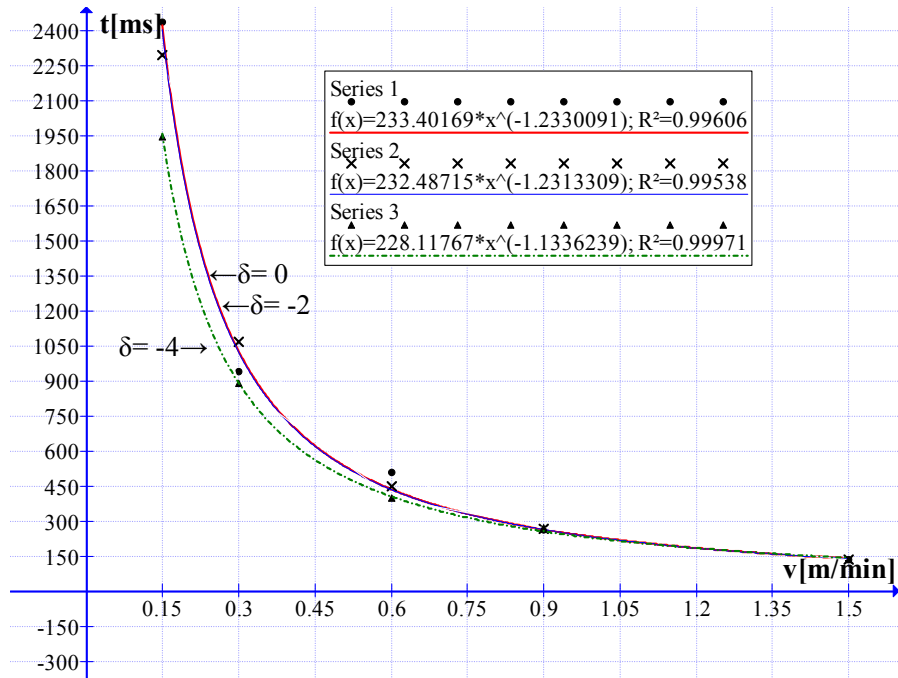


Figura 5.33 Variația timpului de existență a băii de sudare în funcție de viteză la puterea de 2 kW

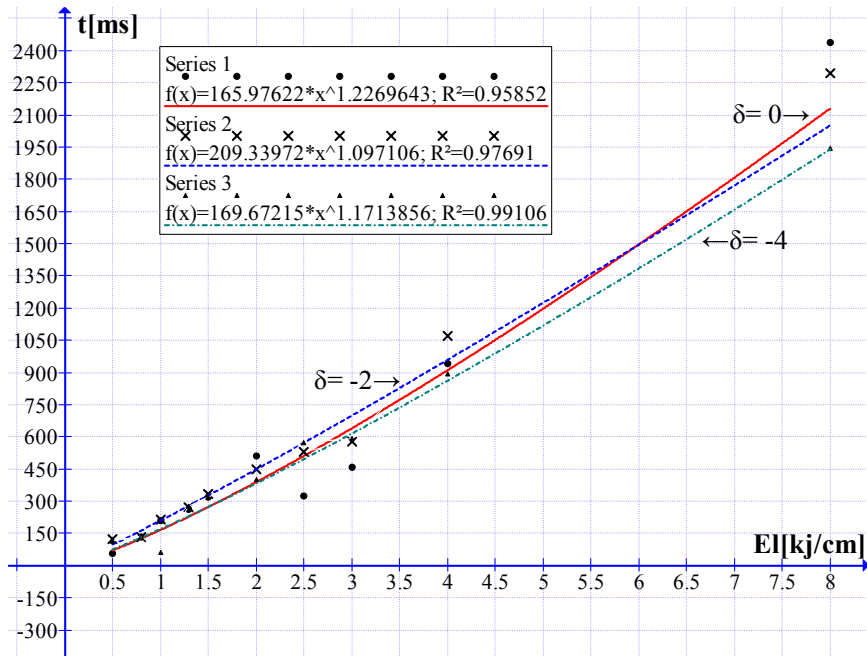


Figura 5.31 Variația timpului de existență a băii de sudare în funcție de energia liniară

5.5 Determinarea experimentală a condițiilor de topire și vaporizare

În Capitolul 2 au fost prezentate unele considerații teoretice privind condițiile în care se produc fenomenele de topire și vaporizare. Pe baza rezultatelor experimentale obținute, printr-o interpretare particulară, se poate prezice raportul dintre viteza de propagare a frontului de topire u_m și viteza de propagare a frontului de vaporizare u_v . Acest raport arată pe secțiunea sudurii, pornind de la suprafață pe ce distanță este prezent efectul vaporizării caracteristic regimului de keyhole.

Ca bază pentru acest studiu se formulează următoarele ipoteze:

- Se consideră că în material este absorbită 10% din intensitatea fascicolului laser. Aceasta se regăsește sub forma unei densități de flux termic constant în material folosită exclusiv în realizarea transformărilor de fază.
- Se consideră că volumul de material vaporizat este dat o aproximare a volumului craterului. Această aproximare constă în considerarea unei forme conice a craterului. Suprafața acestuia și adâncimea acestuia fiind mărimi măsurate direct. Forma conică subvaluează volumul craterului însă această subevaluare exclude partea din volumul craterului datorată mișcării topiturii.
- Se consideră că topirea și vaporizarea au loc continuu în timpul procesului de sudare. Acestea permite calculul unei viteze de vaporizare volumică v_v (rată de vaporizare) [mm^3/s] și evident a unei viteze de topire volumică v_m [mm^3/s].
- Se consideră topirea și vaporizarea sunt fenomene fizice care au loc simultan. Se consideră că viteza de topire volumică și viteza de vaporizare volumică se aplică simultan unei unități de suprafață considerată arbitrar la suprafața piesei. Astfel se consideră că are sens definirea raportului dintre viteza volumică de topire și cea de vaporizare.

Viteza de topire volumică se definește ca produsul dintre aria secțiunii topite și viteza de sudare.

$$v_m = AT \cdot v \quad [\text{mm}^3/\text{s}] \quad (5.4)$$

Viteza de vaporizare volumică se definește ca raportul dintre volumul craterului (cu aproximație volumul evaporat) și timpul de existență a băii de sudare calculat anterior.

$$v_v = \frac{V_{cr}}{t} \quad [\text{mm}^3/\text{s}] \quad (5.5)$$

Unde:

V_{cr} – volumul craterului

$$V_{cr} = \frac{i}{3} \times acr \quad [\text{mm}^3] \quad (5.6)$$

t - timpul de existență a băii de sudare

Prin aceste relații au fost evaluate vitezele de vaporizare și topire volumică. În continuare se va evalua raportul dintre viteza de topire volumică și viteza de vaporizare volumică. O nouă ipoteză se referă la forma în care se formează faza de vapori respectiv faza topită. Nu se va preciza tipul de formă care se obține (conică, cilindrică, semisferică) se va preciza că faza topită și faza de vapori se

dezvoltă în forme geometrie asemenea. În unitatea de timp viteza v_v va produce un volum iar viteza v_m va produce altul (mai mare). Raportul celor două volume este egal cu cubul raportului de asemănare, care la rândul său este egal cu raportul dintre vitezele liniare de propagare a fronturilor de topire u_m respectiv viteza de propagare a frontului de vaporizare în material. Se obține următoarea relație:

$$\frac{u_m}{u_v} = \sqrt[3]{\frac{v_m}{v_v}} \quad [-] \quad (5.7)$$

Se consideră că în material o sursă termică caracterizată de densitatea de flux termic q întreține simultan topirea și vaporizarea. Aceste fenomene sunt caracterizate de caldura latentă integrală L_{I-M} pentru topire, respectiv L_{I-V} pentru vaporizare. Se consideră că topirea și vaporizarea observată experimental prin zonele considerate reprezintă un cumul de transformări termice particulare și nu poate fi redusă la transformările de stare de agregare respective. Pe baza relațiilor din Capitolul 2 se obțin relațiile:

$$q = \rho L_{I-M} u_m \quad [\text{W/cm}^2] \quad (5.8)$$

$$q = \rho L_{I-V} u_v \quad [\text{W/cm}^2] \quad (5.9)$$

Pe baza acestor relații se obține raportul căldurilor latente integrale:

$$\frac{L_{I-M}}{L_{I-V}} = \frac{u_v}{u_m} \quad [-] \quad (5.10)$$

Raportul dintre cele două călduri latente integrale arată modul în care topirea și vaporizarea au loc relativ în aceleași condiții. Estimarea uneia din căldurile latente integrale de topire sau vaporizare conduce la evaluarea celeilalte. Se cunoaște astfel din date experimentale raportul celor două mărimi pentru condițiile de sudare, intensitate și timp de interacțiune.

Folosirea rezultatelor experimentale a permis identificarea fazei topite, respectiv vaporizate independent de căldurile latente corespunzătoare acestora. Se presupune că cele două faze sunt formate de aceeași densitate de flux termic. În aceste condiții raportul căldurilor latente (călduri latente integrale) care susțin formarea celor două faze este egal cu inversul raportului dintre vitezele de propagare a fronturilor de transformare de fază. Aceste călduri latente integrale nu pot fi cunoscute. Se poate afla însă cât de costitoare energetic este formarea fazei de vapori în raport cu formarea topiturii.

Tabelul următor 5.1 prezintă calcule rapoartelor anterioare pentru sudurile realizate. Au fost excluse sudurile realizate în regimul de conducție pentru care nu putut fi măsurată cu precizie adâncimea craterului. Se prezintă pentru comparație condițiile de sudare, intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei, timpul de interacțiune și energia liniară.

Tabel 5.1 Estimarea vitezei de propagare a frontului de vaporizare și de topire în material respectiv de topire în material și efectul relativ al acestora.

Sudura	Energia liniară E_l [kJ/cm]	Timpul t_{is} [ms]	Intensitatea I [10^5 W/cm 2]	Viteza de vaporizare volumică vv [mm 3 /s]	Viteza de topire Volumică vm [mm 3 /s]	Raportul $\frac{vm}{vv}$	Raportul $\frac{u_m}{u_v}$	Raportul $\frac{L_{I-M}}{L_{I-V}}$
2	1	60	3.52	2.17	20	9.2	2.09	0.47
3	1,5	60	5.29	2.42	30	12.3	2.3	0.43
4	2,5	60	8.81	4.04	90	22.2	2.8	0.35
5	3	60	10.58	5.02	90	17.9	2.61	0.38
6	8	240	7.05	2.34	45	19.2	2.67	0.37
7	4	120	7.05	2.54	50	19.6	2.69	0.37
8	2	60	7.05	3.5	70	20	2.71	0.36
9	1,3	40	7.05	4.15	60	14.4	2.43	0.41
10	0,8	24	7.05	4.96	62.5	12.6	2.32	0.43
12	1	84	1.79	0.58	2	3.4	1.5	0.66
13	1,5	84	2.69	3	20	6.6	1.87	0.53
14	2,5	84	4.49	5.91	90	15.2	2.47	0.4
15	3	84	5.39	6.08	100	16.4	2.53	0.39
16	8	336	3.59	2.23	45	20.1	2.71	0.36
17	4	168	3.59	2.18	55	25.2	2.92	0.34
18	2	84	3.59	2.33	60	25.7	2.94	0.33
19	1,3	56	3.59	2.69	45	16.7	2.55	0.39
20	0,8	33.6	3.59	3.12	62.5	20	2.71	0.36
23	1,5	108	1.63	2.44	15	6.1	1.82	0.54
24	2,5	108	2.72	5.76	65	11.2	2.23	0.44
25	3	108	3.27	5.94	110	18.5	2.64	0.37
26	8	432	2.18	1.89	32.5	17.1	2.57	0.38
27	4	216	2.18	2.38	35	14.7	2.44	0.4
28	2	108	2.18	2.93	30	10.2	2.16	0.46
29	1,3	72	2.18	3.43	22.5	6.5	1.86	0.53
30	0,8	43.2	2.18	5.21	25	4.7	1.67	0.59
31	0,4	24	3.53	1.94	5	2.5	1.35	0.73
32	1,2	24	10.61	5.22	100	19.1	2.67	0.37
33	0,4	33.6	1.8	0.87	5	5.7	1.78	0.56
34	1,2	33.6	5.41	10	62.5	6.2	1.83	0.54
35	1,2	43.2	4.91	4.04	50	12.3	2.3	0.43
36	1,2	43.2	4.91	6.61	83.3	12.6	2.32	0.43

5.6 Iradieri statice ale piesei

S-a efectuat suplimentar un program experimental care a constatat din efectuarea unor iradieri pe același tip de material. S-a folosit o putere de 3kW și doi timpi de expunere de 50 și respectiv 100 ms. Defocalizarea a fost reglată la suprafață și în interiorul materialului având în total patru poziții (la 0, -1, -2 -4 mm). Pentru fiecare caz s-au realizat trei replici (a,b,c). Diametrul fascicolului laser în pata focală a fost același ca și la sudurile realizate și anume de 0.6 mm. În urma acestui tip de experiment s-a obținut zone topite și cavități pe suprafața plăcii.

Pentru iradierea statică realizată dintre mărimile anterior prezentate s-au calculat intensitatea și diametrul petei fascicolului laser la suprafața piesei. Acestea sunt reproduse în tabelul de mai jos. În acest caz apare o nouă mărime și anume energia pe puls. Aceasta este egală cu produsul dintre putere și timpul pulsului.

$$E_p = P \cdot t_p \text{ [J]} \quad (5.11)$$

Mărimile reglate în experiment sunt prezentate în tabelul 5.2.

Iradierea statică efectuată la suprafața au arătat craterele mai mici obținute la timpul de expunere de 50 ms decât cele obținute pentru timpul de expunere de 100 ms în aceleași condiții de defocalizare. Craterele obținute prin focalizarea la suprafață sunt alungite (ovale), există diferență între cele trei replici efectuate în aceleași condiții de expunere și defocalizare în ceea ce privește forma și orientarea craterului. Prin coborârea punctului focal se obțin crateres cu dimensiuni din ce în ce mai mici. Cele trei replici efectuate pentru fiecare condiție experimentală în parte au devenit din ce în ce mai asemănătoare, ca formă și dimensiuni. Astfel odată cu coborârea punctului focal se asigură o bună reproductibilitate a procesului. Piesa cu crateresle obținute este prezentată în figura 5.32. Imagini detaliate ale crateresle sunt prezentate în figura 5.33.

Tabel 5.2 Mărimi reglate și calculate care caracterizează iradierea pentru iradierea statică

Nr Crt.	Puterea P [kW]	timpul de iradiere t_p [ms]	Defocalizarea δ [mm]	Energia pe puls E_p [J]	Diametrul Petei focale	Intensitatea I [W/cm^2] $\times 10^5$
1	3	50	0	150	0.6	10.6
2	3	50	-1	150	0.72	7.36
3	3	50	-2	150	0.84	5.41
4	3	50	-4	150	1.04	3.53
5	3	100	0	300	0.6	10.6
6	3	100	-1	300	0.72	7.36
7	3	100	-2	300	0.84	5.41
8	3	100	-4	300	1.04	3.53



Figura 5.32 Imaginea plăcii pe care au fost realizate iradierile statice

Craterele obținute pe suprafața piesei au arată valuri „unde solide” obținute către marginile craterului. Aceste valuri se află numai la extremități și sunt din ce în ce mai apropiate. Ele lipsesc în centru craterului. Se confirmă astfel punctele de vedere arătate în [Rykalin 1978] care arată că formarea valurilor are loc prin prinderea undei de material topit în procesul de solidificare. La centrul craterului viteza de propagare a undei de metal topit este mai mare decât solidificare, astfel că solidificarea surprinde un efect mediu. La extremități viteza de solidificare devine mai mare decât cea de propagare a undei de metal topit astfel că unda de metal topit este solidificată sub forma unui val numit și „undă solidă”

Pentru iradierile statice efectuate pe același material ca și probele s-a măsurat diametrul zonei topite. Acesta a fost obținut ca rezultat al două măsurători una pentru diametrul maxim iar cealaltă pentru diametrul minim iar valoarea medie a fost considerată ca fiind diametrul zonei topite (tabelul 5.3). Pentru fiecare iradiere au fost realizate experimental trei replici. S-a calculat media diametrelor corespunzătoare celor trei replici.

Tabel 5.3 Valori ale diametrului zonei topite pentru iradierile statice

Defocalizarea δ [mm]	iradierea							
	P=3kW , t_p = 50ms				P=3kW , t_p = 100ms			
	Diametrul mediu [mm]				Diametrul mediu [mm]			
	a	b	c	media	a	b	c	media
0	2.5	2.25	2	2.25	3.5	3	3.25	3.25
-1	2.25	2.5	2.5	2.41	3.75	3.5	3.5	3.58
-2	2.5	2	2	2.16	3.25	3	3	3.08
-4	2	2	2	2	3	3	3	3

Valorile pentru diametrele zonelor topite au fost comparate cu lățimea medie a sudurilor. Din cauza variației timpului de interacțiune s-a considerat importantă comparația diametrelor obținute la t_p = 50ms cu valoarea pentru lățimea medie de 2.33 mm obținută la sudura 5 și cea dintre diametru pentru sudurile obținute la t_p = 100ms și lățimea medie pentru lățimea 25 de 4.15 mm. Acestea conduc la concluzia că zona topită la suprafața piesei are dimensiuni mai mari în cazul sudurilor decât în cazul iradierilor statice.

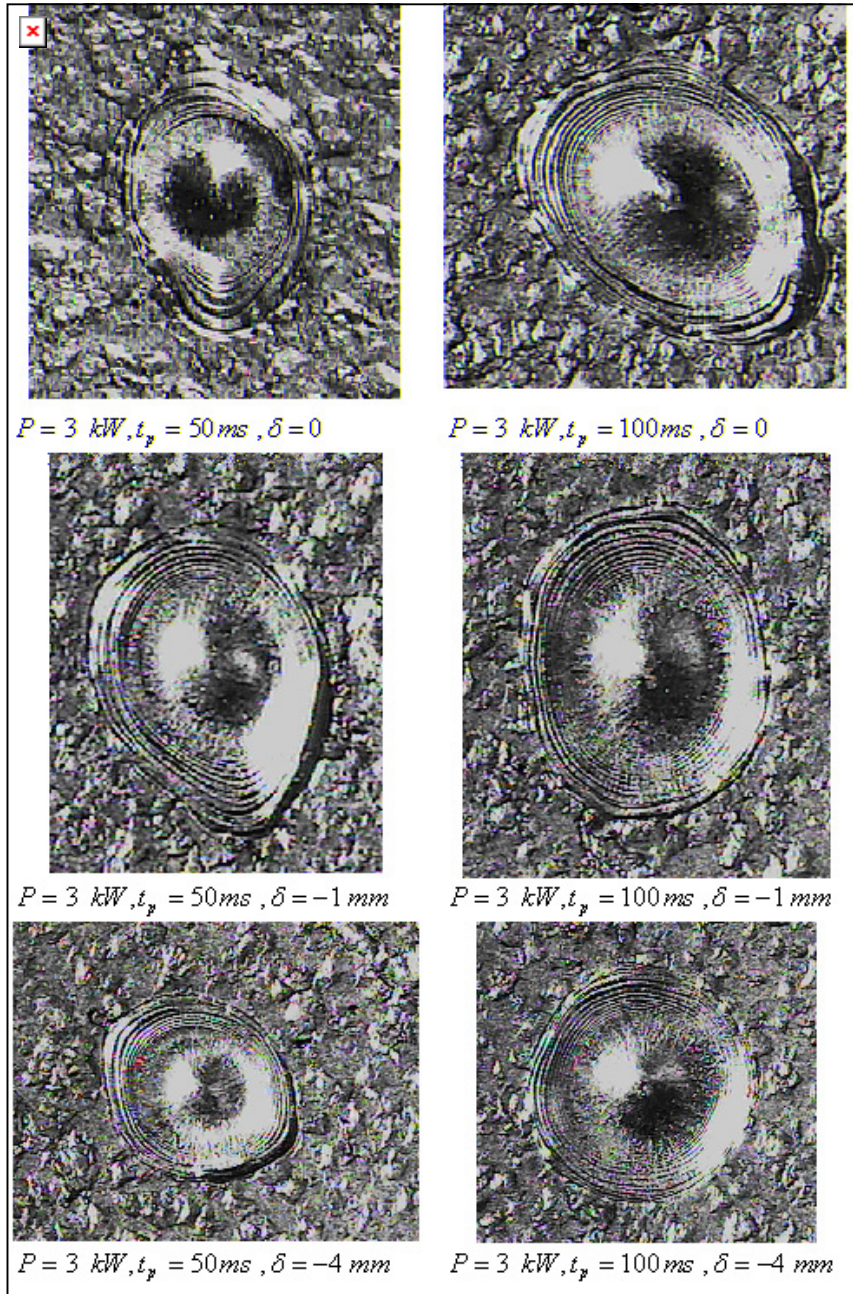


Figura 5.33 Imagini ale craterelor obținute în urma iradierilor statice

În cazul fiecărui regim de iradiere există o scădere a diametrului petei topite în funcție de focalizare începând cu focalizările în interiorul piesei. Diametrele cele mai mari se obțin la focalizarea -1. Variațiile înregistrate nu sunt semnificative ceea ce arată că dimensiunile (relative) ale zonei topite depind în principal de regimul de iradiere (putere și timp) și nu de poziția punctului focal (defocalizarea). Se observă

că creșterea timpului de interacțiune conduce la obținerea unor zone topite semnificativ mai mari, independent de defocalizare. Se observă că între replici există o mai bună reproductivitate odată cu focalizarea în profunzime. Acest lucru a fost observat și la cordoanele de sudare 5,15,25. Dacă primele două prezentau forme fizice neregulate (ridicături), la ultimul, la aceiași supraînălțare acestea au dispărut.

5.7 Concluzii

Analiza suprafeței sudurilor realizată în Capitolul 5 a realizat o selecție a mărimilor care pot fi măsurate pe suprafața sudurilor și care aduc un plus de informații despre procesul de sudare. Se pot astfel pune în evidență aspecte legate de vaporizarea care are loc în timpul sudării laser în regim keyhole și de mișcarea topiturii. S-a arătat că principalul efect asupra mărimilor care caracterizează secțiunea sudurilor este dat de putere. S-a arătat că există o comportare similară (dată de corelații liniare) între mărimi care reprezintă suprafețe, produse simultan de fenomenele de topire și vaporizare. S-a arătat astfel că sub forma unor mărimi bidimensionale (aria craterului și aria topită pe secțiune) se poate pune în evidență efectul simultan al topirii și vaporizării. Mărimile măsurate pe suprafață se pot folosi în moduri multiple pentru a obține descrieri cantitative ale fenomenelor fizice.

Suprafața sudurilor realizate cu laser a fost analizată în lucrările [Kim, 2008] și [Tzeng, 1998]. Modificarea compoziției materialului în zona sudurii a fost analizată în lucrările [Leong 2002], [Sierra, 2007], [Sun, 1999]. Analiza suprafeței sudurilor a fost prezentată de autor și în alte lucrări. Astfel analiza valurilor care apar la suprafața sudurilor a fost prezentată în lucrările [Boboescu, 2008 a] și [Boboescu, 2010 a]. În lucrarea [Boboescu, 2009j] au fost prezentate formule de corelație între suprafața craterului și aria topită măsurată pe secțiunea sudurii.

Analiza suprafeței sudurilor a avut ca scop punerea în evidență a unor caracteristici ale procesului de sudare. Analiza suprafeței este din punct de vedere practic este mai la îndemână decât cea a secțiunii sudurii. Suprafața sudurii aduce în discuție probleme legate de lățimea sudurii. Aceasta a fost măsurată pe suprafața sudurii la începutul, partea de mijloc și la sfârșitul sudurii, s-a efectuat medierea celor trei măsurători s-a obținut lățimea sudurii LM. Variația acesteia a fost comparată cu cea a lățimii sudurii măsurată pe secțiune LS.

Craterului care apare la întreruperea procesului de sudare aproximează prin dimensiunile sale baia de sudare și keyhole. S-au măsurat trei dimensiuni liniare ale suprafeței acestuia aria și profunzimea craterului. Volumul craterului a fost aproximat. S-a efectuat o analiză directă a acestor mărimi. Pe baza acestor mărimi s-au investigat timpul de menținere a băii de sudare, condițiile de topire și vaporizare ale materialului și comparația între realizarea topirii în secțiune sudurii (aria topită) și aria craterului.

Sudurile realizate au prezentat supraînălțare. Aceasta a fost mare la începutul sudurii și a scăzut treptat către zona stabilă. În această zonă supraînălțarea a fost minimă. Supraînălțarea sudurii poate fi legată de mișcarea topiturii baia de sudare.

Analiza suprafeței sudurilor a considerat un număr ridicat de funcții obiectiv. Analiza acestora s-a concentrat pe variațiile directe datorate parametrilor variații, putere viteză defocalizare și pe ierarhizarea factorilor de influență.

6. Investigații asupra calității sudurilor

La modul general prin defect se înțelege orice abatere de la prescripțiile de calitate ale documentației de execuție a unui produs, putându-se referi atât la continuitate, cât și la formă dimensiuni, aspect și chiar structură. După modul de localizare defectele îmbinărilor sudate prin topire se clasifică în defecte interne și în defecte de formă și suprafață. Defectele interne sunt cele cuprinse integral sau parțial de secțiunea îmbinării. În funcție de formă pot fi grupate în categoriile defecte volumice respectiv defecte plane. Defectele interne volumice se formează în cursul procesului de solidificare a băii de sudare. Din categoria defectelor volumice fac parte incluziunea de gaz sau suflura (por sau porozitate), incluziunea solidă și mai rar retasura interdendritică [Safta, 1984].

Porii reprezintă incluziuni de gaz în materialul topit și resolidificat. După formă și distribuție în lungimea sudurii porii pot fi de mai multe feluri. Astfel din punct de vedere al formei se deosebesc porii sferici la care lungimea axei mari nu depășește 50% pe cea a celorlalte axe și pori tubulari care au un aspect alungit și nu respectă criteriul anterior. Din punct de vedere al distribuției porilor în sudură se observă: pori izolați, pori uniform repartizați, pori aliniați, pori grupați și pori de suprafață. Parametrii care caracterizează porii sunt diametrul și/sau distanța minimă care caracterizează zona dintre doi pori., respectiv volumul care delimitează zona în care porii sunt aliniați sau grupați. Fisura este considerată cel mai periculos defect al îmbinării sudate [Safta, 1984].

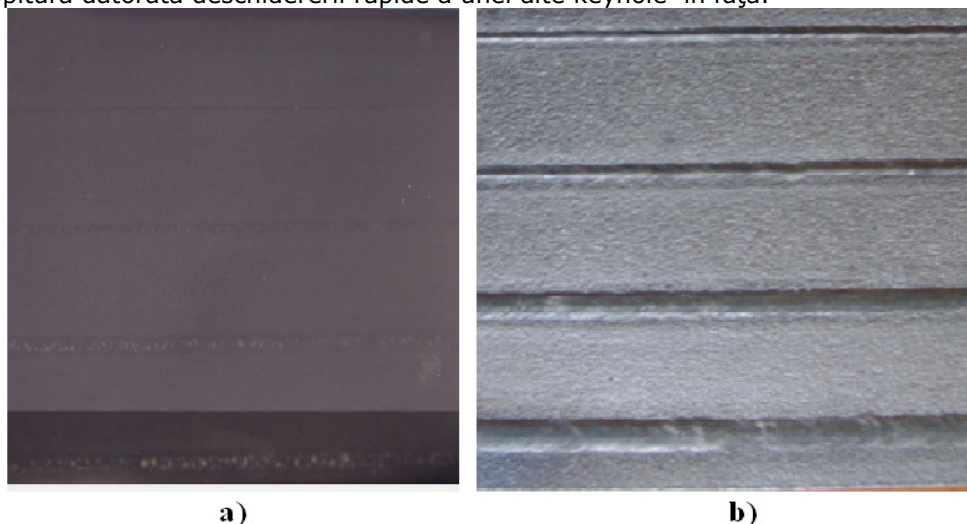
Fisura se produce fie în timpul solidificării (fisură la cald) fie după răcire (fisură la rece) datorită pierderii locale a plasticității ca urmare a fragilizării materialului. Fisurile pot fi clasificate după direcția de propagare în raport cu axa îmbinării sudare. De asemenea este importantă localizarea fisurilor. Astfel fisura poate fi în materialul de adaos, în zona topită și resolidificată respectiv în materialul de bază [Safta, 1984].

6.1. Analiza folosind Raze X a sudurilor

Plăcile cu sudurile au fost fotografiate folosind raze X. S-au obținut astfel un film pentru fiecare placă. Filmele obținute au fost transformate în imagini cu scara 1:1 pe hârtie fotografică. S-a apelat la această metodă deoarece filmele au avut un contrast slab. Acest lucru s-a datorat faptului că oțelul a fost gros. Sudurile fiind la suprafață diferențele de grosime datorate porozităților au fost mici. Porozitățile au fost observabile pe film numai în lumină foarte puternică la un negatoscop, însă nu au putut fi scanate. În acest context s-a apelat la transformarea informației de pe film pe hârtie fotografică. Folosirea unui timp de expunere relativ mic (10 minute) a condus la punerea în evidență a porozităților. Rezultatele acestei analize au permis realizarea unor observații în general de ordin calitativ și mai puțin cantitativ. În figura 6.1 se prezintă imagini ale sudurilor în Raze X și la suprafața plăcii pentru partea centrală a sudurii.

Analiza în raze X a sudurilor arată prezența porozităților în suduri și nu arată profunzimea la care se află porozitățile. De asemenea dimensiunea porilor nu poate

fi direct apreciată pe filme deoarece aceștia apar suprapuși mai ales atunci când sudura este îngustă. Ca rezultat general sudurile realizate au fost pline de pori. Acest lucru se datorează regimului de iradiere continuu. Timpul de interacțiune este prea mare se deschid mai multe keyhole adânci care se închid prin umplerea cu topitură datorată deschiderii rapide a unei alte keyhole în față.



a) **b)**
 Figura 6.1. Imagine a sudurilor a) radiografie b) imagine a suprafeței plăcii pentru aceleași suduri

Faptul că regimul de iradiere continuu cu laser este producător de pori în raport cu cel pulsant este cunoscut [Tsukamoto, 2004]. Porii au fost observați și la secționarea materialului. S-au observat pori mari suprapuși cu diametru estimat la 0,1 mm. Sudurile care pot fi considerate bune au fost realizate la viteza maximă sau aparțin regimului intermediar între conducție și keyhole. Un regim keyhole puternic, prin porozitățile pe care le creează poate afecta rezistența mecanică a îmbinării sudate. Tabelul 6.1 prezintă caracterizarea sudurilor. Regimul intermediar între conducție și keyhole a fost considerat ca și regim keyhole în acest tabel.

Se observă pe figura 6.1 că porozitățile sunt vizibile mai bine pentru sudurile mai late. Scăderea în grosimea a metalului este pusă în evidență prin nuanța deschisă. Se observă ca zone deschise porozitățile și craterul care se obține la sfârșitul procesului de sudare. Acestea sunt vizibile în special pentru sudurile late. Ca zone de culoare închisă se observă înălțarea la începutul sudurii și supraînălțarea sudurilor. Pentru sudurile late se observă existența a două rânduri de porozități. Pentru sudurile înguste se observă concentrații ale porozităților. Contrastul slab al fotografiilor s-a datorat grosimii oțelului. Se apreciază că, cantitatea de porozități depinde în principiu de putere și de cât de puternic este regimul de sudare keyhole pentru sudura respectivă. Așezarea porozităților în sudură depinde de forma băii de sudare. La sudurile înguste porozitățile sunt concentrate la centrul sudurii.

Lățimea și profunzimea sudurii au scăzut datorită creșterii vitezei de sudare. Aceasta a dus la scăderea timpului de interacțiune dintre radiația laser și materialul. Focalizarea laserului a fost realizată la suprafața piesei. Se observă că porozitățile mai multe apar la pentru sudurile mai late și mai profunde. Focalizarea fascicolului laser a fost realizată în interiorul piesei. Prin aceasta s-a crescut dimensiunea petei focale la suprafața piesei, dar s-a scăzut intensitatea la suprafața piesei. Ca și consecință a crescut lățimea sudurilor. Se observă prezența

porozităților în toate sudurile prezentate. Există tendința ca porozitățile să se dispună pe două rânduri către marginile sudurii. O apreciere a asupra diametrului porozităților a condus la valoarea de 0.1 mm a diametrului acestora. Această valoare este mai mică decât cea a diametrului petei focale care a fost de 0.6 mm și diametrul petei laserului pe suprafața piesei care a variat între 0.6 mm și 1.08 mm.

Tabel 6.1 Observații asupra porozităților din suduri

Sudura	Aprecierea	Regimul de sudare	r [-] calculat	Sudura	Aprecierea	Regimul de sudare	r[-] calculat
1	Nu este vizibilă sudura	Conducție	0.09	21	Nu este vizibilă sudura	Conducție	0.05
2	Nu este vizibilă sudura	Conducție	0.18	22	Pori	Conducție	0.1
3	pori	keyhole	0.28	23	Nu este vizibilă sudura	keyhole	0.15
4	pori	keyhole	0.47	24	Pori	keyhole	0.26
5	pori	keyhole	0.56	25	Pori	keyhole	0.31
6	pori	keyhole	1.51	26	Pori +sudura subnivel	keyhole	0.84
7	pori	keyhole	0.75	27	Pori	keyhole	0.42
8	pori	keyhole	0.37	28	Pori	keyhole	0.21
9	pori	keyhole	0.25	29	Sudura bună	keyhole	0.14
10	pori	keyhole	0.15	30	Sudura bună	keyhole	0.08
11	Nu este vizibilă sudura	Conducție	0.06	31	Nu este vizibilă sudura	Conducție	0.07
12	Sub nivel	Conducție	0.13	32	Pori	keyhole	0.22
13	Sudură bună	keyhole	0.2	33	Nu este vizibilă sudura	Conducție	0.05
14	pori	keyhole	0.33	34	pori	keyhole	0.16
15	pori	keyhole	0.4	35	pori	keyhole	0.18
16	pori	keyhole	1.07	36	pori	keyhole	0.18
17	pori	keyhole	0.53	37	Nu este vizibilă sudura	Conducție	0.09
18	pori	keyhole	0.26				
19	pori	keyhole	0.17				
20	pori	keyhole	0.1				

Se remarcă prezența porozităților suprapuse , aglomerării porozităților și supraînălțării sudurii , care maschează o parte din porozități nu a putut fi realizată o evaluare a dimensiunilor porozităților și a numărului acestora care să poată fi legată de parametrii variației. Au fost apreciate calitativ sudurile obținute alături regimul de sudare. Sudurile au fost clasificate după forma secțiunii pri sudură în suduri în regim de conducție, în suduri în regim keyhole. S-a remarcat un regim intermediar între regimul de conducție și regimul keyhole . Rezultatele sunt expuse în tabelul 6.1. Prin secționarea sudurilor s-au confirmat prezența porozităților la centrul sudurii pentru sudurile înguste și prezența laterală pentru sudurile late.

Tabelul 6.1 arată că trecerea de la regimul de sudare prin conducție la regimul de sudare și creșterea penetrării sudurii se realizează datorită creșterii intensității fascicolului laser. Prezența porilor se asociază direct cu regimul de sudare keyhole. Creșterea numărului porozităților se asociază directă cu creșterea intensității fascicolului laser. Imaginile au arătat că apar foarte multe porozități. Regimul de sudare keyhole nu pune probleme legate numai de prezența porozităților ci și de numărul acestora foarte mare relativ la lățimea sudurii. La intensități ridicate pentru regimul keyhole se vor produce suduri fragile cu defecte. Creșterea timpului de interacțiune crește lățimea sudurilor și porozitățile din acestea devin mai evidente. Pentru timpi de interacțiune mari sudura a coborât puțin sub suprafața piesei datorită vaporizării. Sudurile efectuate la intensități scăzute ale laserului au avut penetrare mică și nu au fost vizibile pe fotografiile în raze X. Sudurile bune care nu pun probleme legate de porozități au fost obținute pentru intensități ale fascicolului laseri mai mici decât $3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$. Aceste sunt asociate cu valori moderate ale regimului de keyhole. Un rol important îl are menținerea unui timp de interacțiune moderat.

În cele ce urmează se va propune o modalitate de apreciere a numărului de porozități care se produc. Modelul consideră numai partea de formare a keyhole ca și cauză a porozităților. Nu se ia în considerare închiderea keyhole și dinamica vaporilor în baia de sudare. Pentru aceasta se va compara timpul de interacțiune cu timpul necesar ca frontul de vaporizare să pătrundă în material pe o profunzime dată h . Aceasta va fi considerată de 2 mm. Se consideră că dacă în material există o keyhole cu această profunzime închiderea ei va conduce la prezența unei porozități. Se va considera că 10% din intensitatea laserului este absorbită în material. Fascicolul laser formează o sursă termică la suprafața materialului cu densitatea de flux termic q . Viteza de propagare a frontului de vaporizare în material u este dată de următoarea relație [Rykalın, 1978]:

$$u = \frac{q}{\rho L_v} [\text{m/s}] \quad (6.1)$$

Unde ρ - densitatea materialului, L_v căldura latentă pentru vaporizare.

Frontul de vaporizare parcurge distanța h în timpul:

$$t = \frac{h}{u} [\text{s}] \quad (6.2)$$

Raportul r dintre timpul de interacțiune t_i și timpul t va arăta câte keyhole se pot deschide în zona iradiată care să atingă cel puțin profunzimea h . Rezultatele calculului sunt prezentate în tabelul 2. S-au considerat constantele de material pentru Fe. $\rho = 7.87 \text{ g/cm}^3$ $L_v = 7106 \text{ J/g}$.

$$r = \frac{t_i}{t} [-] \quad (6.3)$$

Raportul r are o interpretare probabilistică. El arată probabilitatea ca o interacțiunea între radiația laser și material să producă o porozitate. Prezența porozităților este proporțională cu valorile raportului r . Cu cât valorile raportului r sunt mai mari cu atâta crește numărul de porozități produse. Consistența acestei estimări are la bază alegerea unei valori corecte pentru profunzimea h . O valoare

prea mică arată deschiderea a mai multor keyhole (valori supraunitare ale raportului r). Majoritatea acestora keyhole se închid fără a produce porozități, fiind puțin adânci. O profunzime prea mare va da valori prea mici și va arăta că se deschid prea puține keyhole. Profunzimea h trebuie adaptată și la profunzimea medie a sudurilor. Profunzimea de 2mm depășește penetrarea sudurilor în regim de conducție.

Calculule efectuate arată că la formarea porozităților se datorează efectului cumulat al creșterii intensității fascicolului laser și timpului de interacțiune dintre radiație și material. Analiza calitativă a sudurilor arată o bună corelație cu rezultatele teoretice obținute prin calculul raportului r .

În urma analizei și interpretării radiografiilor sudurilor se obțin următoarele concluzii:

- Folosirea regimului de iradiere continuu CW produce o cantitate considerabilă de pori în sudură. Aceasta poate fi redusă prin folosirea unor valori moderate pentru intensitatea fascicolului laser și timpul de interacțiune dintre radiație și material;
- Sudurile realizate în regimul keyhole prezintă mai mulți pori în raport cu cele în regimul de conducție sau în regimul intermediar conducție /keyhole, la valori relativ scăzute ale intensității fascicolului laser la suprafața piesei duce la scăderea cantității de pori, se recomandă folosirea unui regim keyhole moderat la sudare;
- Deși s-a obținut multe porozități în sudurii se remarcă absența cavitațiilor și a unor viduri largi în suduri.

6.2 Analiza microstructurilor

Secțiunile în suduri au fost fotografiate la microscop. S-au folosit mărimi de la 50X la 200X. Studiul a fost selectiv în sensul că s-a urmărit studiul unor aspecte metalografice considerate importante fără a se urmări o anumită succesiune a variației unuia sau mai multor parametri ai procesului. Se observă însă că aspectele metalografice sunt semnificative acolo unde intensitatea fascicolului laser la suprafață a fost semnificativă. Pentru zona topită s-a dorit punerea în evidență a porozităților și incluziunilor gazoase S-a dorit punerea în evidență a zonei afectate termic pe secțiunea prin sudurii. La analiza sudurilor s-au urmărit punerea în evidență a unor detalii semnificative prin fotografii. S-a descoperit că detaliile cele mai interesante se află pe sudurile aflate în condiții extreme utilizate în experimente: putere maximă (sudurile 5, 15, 25) , respectiv viteză de sudare minimă (sudurile 6, 16, 26)

Studiul fotografiilor microstructurilor s-a desfășurat pe mai multe direcții. Astfel s-a efectuat selectarea sudurilor care au surprins în secțiune detalii deosebite , cu privire la prezența porozităților, structurilor materialului topit și resolidificat și a zonei afectate termic. Dintre acestea prezența porozităților în secțiunea efectuată a reprezentat o șansă, astfel că aceste detalii au fost fotografiate cu prioritate. Zona topită a prezentat diverse extinderi în funcție de regim. S-au realizat fotografii ale sudurilor care au prezentat zone afectate termic extinse. Zona topită are un aspect asemănător pentru toate sudurile. S-au efectuat mai multe fotografii la aceiași mărime cu scopul de a arăta zonele care conțin aspecte semnificative ale macrografiei sudurii. Un alt aspect îl constituie mărirea la care au fost realizate aceste fotografii. Astfel s-a realizat mărimi între 50X și 200X. Acestea au arătat aspectele esențiale ale transformărilor care au loc în material. La mărirea de 500X forma microstructurilor nu a mai fost pusă în evidență, detaliile acestor fotografii fiind dificil de interpretat.

Porozitățile, zona topită și cea afectată termic au fost studiate pe fotografiile microstructurilor. Despre detaliile urmărite în investigații se arată următoarele :

Porozitățile. Au apărut porozități suprapuse pentru sudurile puternic penetrate (sudura 5). Acestea au în general formă sferică însă există și un număr de cazuri în care acestea au o formă turtită sau neregulată (ex sudurile 34, 9, 16). Cele sferice s-au format prin închiderea keyhole înainte de solidificare și au avut o mișcare în topitură înainte de solidificare. Cele neregulate s-au format în timpul solidificării prin apariția simultană a două curenți de material topit. Aceasta explică și fisura observată la centrul sudurii 5. Ca și poziție generală porozitățile au fost așezate atât la centrul cordonului cât și la marginea acestuia. Porozitățile care apar suprapuse pe macrografia cordonului 5 sunt de fapt foarte apropiate și pot fi asociate cu deschiderea succesivă a keyhole. Porozitățile aflate mai la adâncime sunt mai mici datorită comprimării mai puternice a gazelor care le conțin.

Zona topită Aceasta conține o parte omogenă cu grăunți grosieri, mult mai mari decât cei ai materialului de bază. Se observă prezența de formațiuni columnare la interfața cu zona afectată termic.

Zona afectată termic Zona afectată termic se distinge prin colorația specifică. Ea păstrează structura materialului de bază.

6.2.1 Analiza microstructurilor la diferite mărimi și zone ale sudurii

Sadura 5 a arătat o particularitate deosebită și anume prezența de porozități suprapuse. Acesta a fost motivul analizei acesteia sudurii prin fotografierea la diferite mărimi. Acestea au fost 50X, 150X și 250X. Fotografiile sunt prezentate în figurile următoare 6.2 , 6.3 , 6.4.

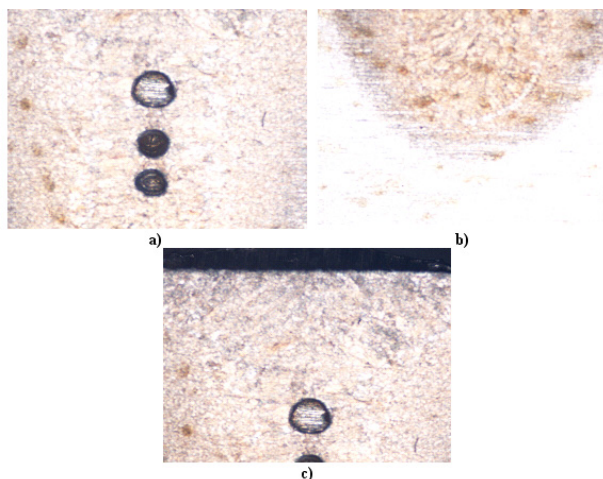


Figura 6.2 Micrografie pe secțiune pentru sudura 5 a) zona topită centru, mărirea 50X b) zona topită jos, mărirea 50X c) Sudura 5 , zona topită suprafață, mărirea 50X

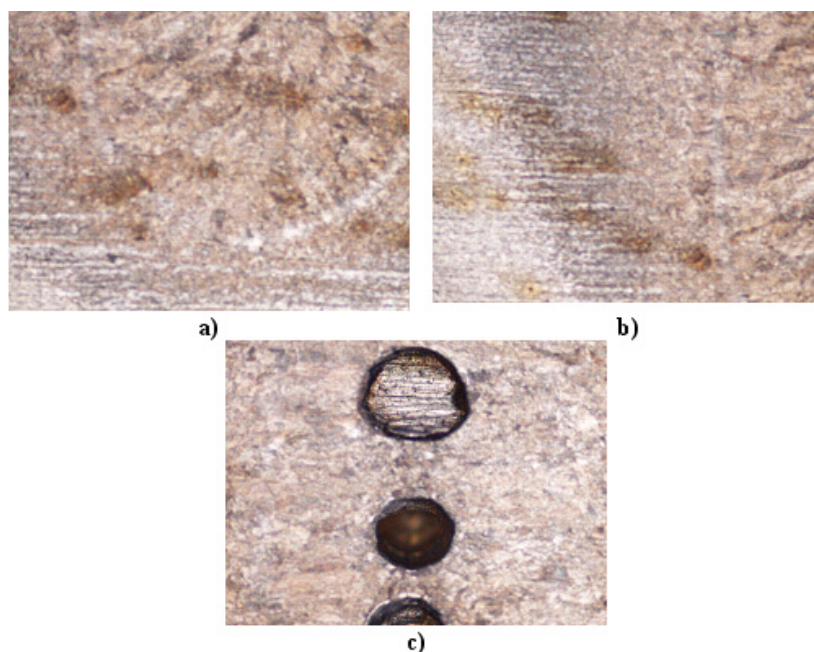


Figura 6.3 Studiul sudurii 5 la mărirea de 150X a) zona topită partea de jos ,mărirea 150X b) zona afectată termic-zona topită suprafață ,mărirea 150X c) , zona topită partea din centru ,mărirea 150X

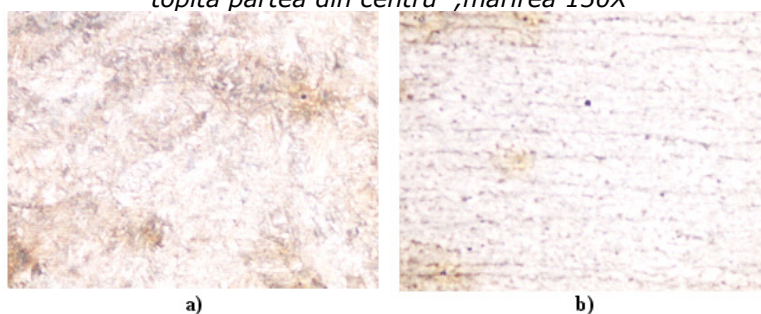


Figura 6.4 Sudura 5 zona topită și materialul bază , mărirea 200X, pentru sudura 5 a) , zona topită ,mărirea 200X b) materialul de bază,mărirea 200X

Prezentarea acestei suduri 5 este completă. Se observă porozitățile, zona topită, zona afectată termic și materialul de bază. Se observă că folosirea măririi de 150X este recomandată pentru evidențierea microstructurilor inclusiv a unor detalii ale porozităților. Se observă izoterma care desparte zona topită de materialul netopit. Se observă schimbarea structurii materialului în zona topită comparativ cu materialul de bază. Se observă că structura materialului de bază este una deosebit de omogenă. Structurile obținute arată că solidificarea pornește se la marginea zonei topite către centrul acesteia. Zona topită are o structură grosieră în raport cu materialul de bază. În imediata apropiere a zonei topite, se observă o îngroșare a grăunților materialului de bază, apoi o colorație specifică a zonei afectate termic.

6.2.2 Analiza microstructurilor pentru sudurile realizate la putere maximă

Alături de sudura 5 prezentată anterior se va prezenta și sudurile 15 și 25. Acestea au avut focalizarea în interiorul piesei. Imagini a acestor suduri sunt prezentate în figurile 6.5 și 6.6.

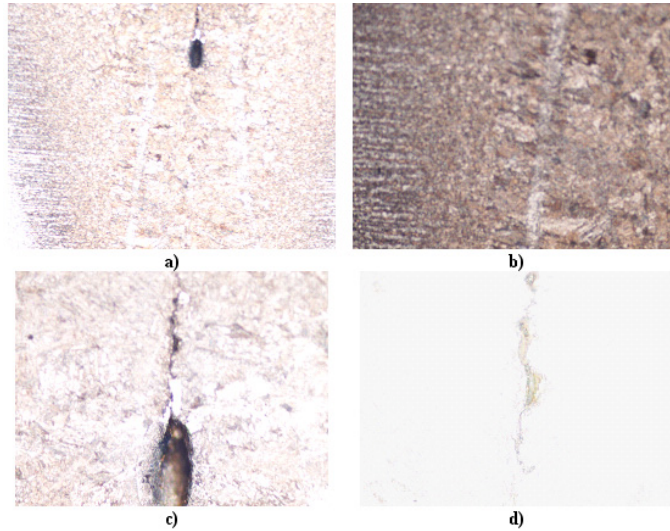


Figura 6.5 Sudura 15 a) Zona topită mărire 50 X b) zona afectată termic-zona topită mărire 100 X c) Zona topită mărire 200X d) Zona topită mărire 500X

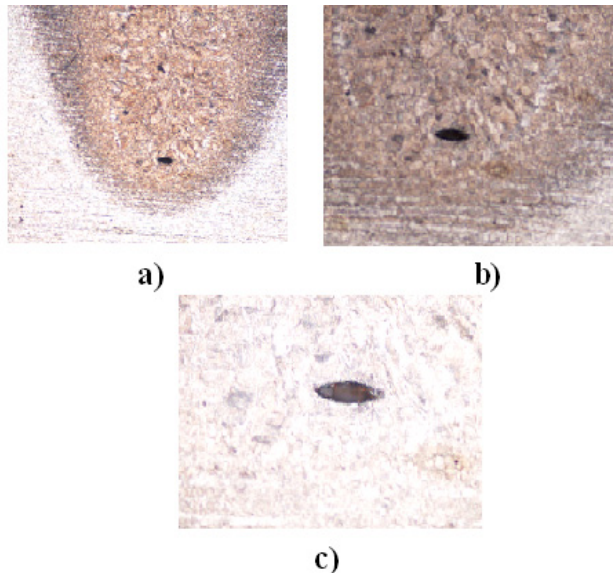


Figura 6.6 Sudura 25 a) Vedere generală, mărire 50X b) Zona topită, mărire 100X c) Zona topită, mărire 200X

Principala observație constă în faptul că se schimbă tipul de defecte care se observă. Focalizarea în profunzime a modificat tipul de defecte din suduri. Astfel de la porozități circulare la sudura 5 și situate central s-a trecut la linii de fisură la sudura 15 (situate central) și la porozități deformate și excentrice la sudura 25. Fisura apare pe fondul trecerii de la un aspect columnar al grăunților în zona topită la un aspect granular. Deși modificările datorate focalizării în interior observate pot fi doar conjuncturale este utilă menționarea lor.

6.2.3 Analiza microstructurilor pentru sudurile realizate la viteza de sudare minimă

Pentru sudurile realizate la viteza de sudare minimă se observă că zona afectată termic este extinsă. Ea are două părți distincte care acum ies mai bine în evidență. Aproape de topitură numai se îngroașă grăunții iar mai departe apare o colorație specifică. Se observă din figurile 6.7, 6.8 și 6.9 că porozitățile obținute sunt excentrice și ca la focalizarea în profunzime apar deformate.

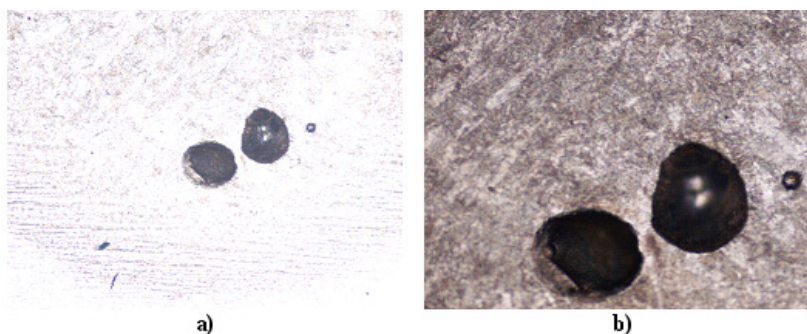


Figura 6.7 Studiul sudurii 6 a) Vedere generală mărire 50X b) Zona topită, mărire 100X

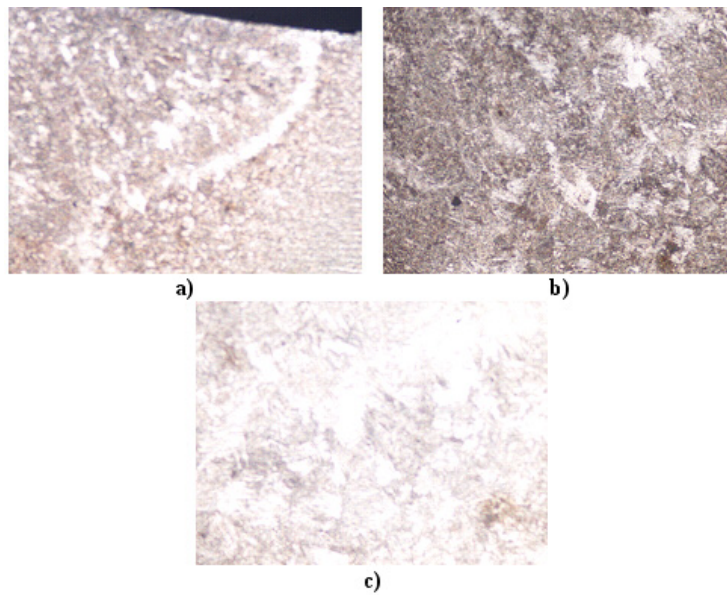


Figura 6.8 Sudura 16 a) Vedere generală, mărire 50X b) Zona topită, mărire 100X c) Zona topită, mărire 200X

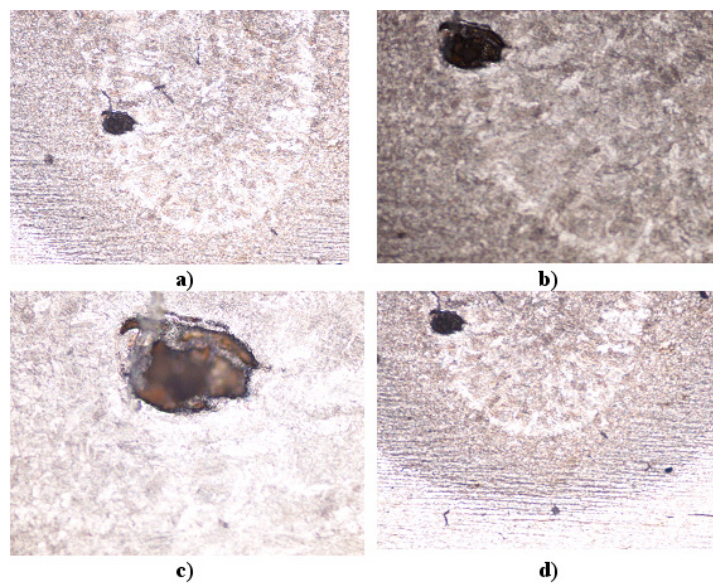


Figura 6.9 Sudura 26 Imagine a unei porozități a) Vedere generală, mărire 50X b) Zona Topită, mărire 100X c) Zona Topită, mărire 100X d) Zona afectată termic mărire 50X

În concluzie se formulează următoarele: Dimensiunile maxime ale porozităților au fost estimate la 0.1 mm. Există astfel o corelație între diametrul

maxim al porozităților, diametrul keyhole și diametrul petei focale a fascicolului laser. Pentru toate sudurile analizate transformările de microstructură sunt omoloage. Ele se asociază cu tipul sursei termice. Nu se pot face însă diferențieri care să implice parametrii de proces.

6.2.4 Analiza comparativă a microstructurilor sudurilor

În cele ce urmează se vor analiza microstructurile în ceea ce privește modificările între regimul keyhole și cel de conducție. De asemenea se va analiza suduri în regim keyhole moderat, cu diferențe mici între parametrii. Se va urmări aspectul reproductibilității microstructurilor și fenomenelor legate de acestea. Se va prezenta separat microstructuri ale zonei afectate termic comparate cu cele ale materialului de bază.

Sudura 34 prezintă un regim keyhole puternic. Sudura 34 este prezentată în figura 6.10 se observă că acest regim de sudare este asociat cu o zonă afectată termic restrânsă. Acest lucru se explică prin faptul că o mare parte din energia primită este consumată pentru vaporizare și mișcarea topiturii în detrimentul conducției în material. Se observă de asemenea obținerea unei porozități excentrice în zona topită. Aceasta seamănă foarte mult cu o cavitate. Sudura fiind îngustă structurile columnare sunt mici și la partea inferioară devin aproape paralele cu suprafața sudurii. Folosirea unui regim de iradiere moderat a dus la evitarea fisurilor la centrul sudurii.

Sudura 2 este o sudură realizată în regim de conducție, figura 6.11. Aceasta arată o zonă afectată termic importantă în raport cu zona topită a sudurii. Structurile columnare sunt late și orientate perpendicular pe suprafața sudurii, în comparație cu cele orientate paralel cu suprafața la sudarea în regim keyhole. De asemenea se observă o tendință de omogenizare a acestor structuri. Nu se observă fisuri însă orientare microstructurilor este similară cu cea fisurilor prezentate în Capitolul 1.

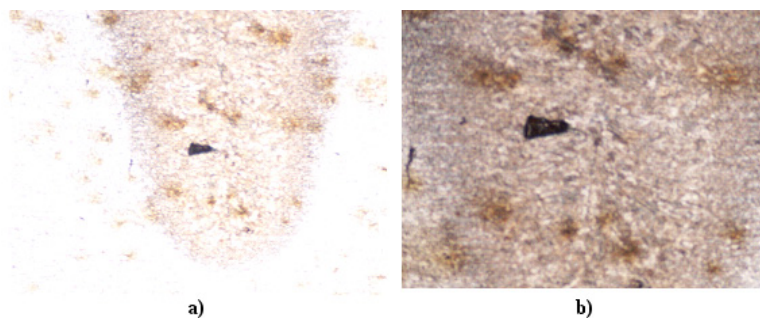


Figura 6.10 Sudura 34 a) Imagine generală, mărire 50X b) Zona topită, mărire 150X

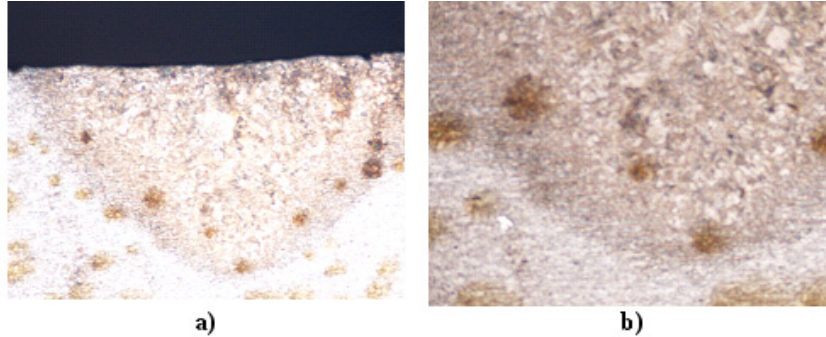


Figura 6.11 Sudura 2 a) Imagine generală, mărire 50X b) Zona topită, mărire 100X

Sudura 9 este o sudură în regim keyhole, figura 6.12 . Regimul de iradiere este moderat datorită vitezei de sudare ridicate. Se observă reducerea porozităților însă afectată termic este semnificativă arătând două tipuri de transformări structurale. Porozitățile sunt situate excentric în zona topită. Se observă că trecerea de la zona topită la materialul de bază este bruscă. Afectarea materialului este însă progresivă.

Sudura 19 este efectuată la aceleași valori ale puterii și vitezei de sudare ca și sudura 9 , excepția fiind defocalizarea. Secțiunea prin sudura 19 este prezentată în figura 6.13. Planul focal a fost coborât în interiorul piesei. Pentru aceasta a scăzut zona afectată termic dar se observă porozități mai mari.

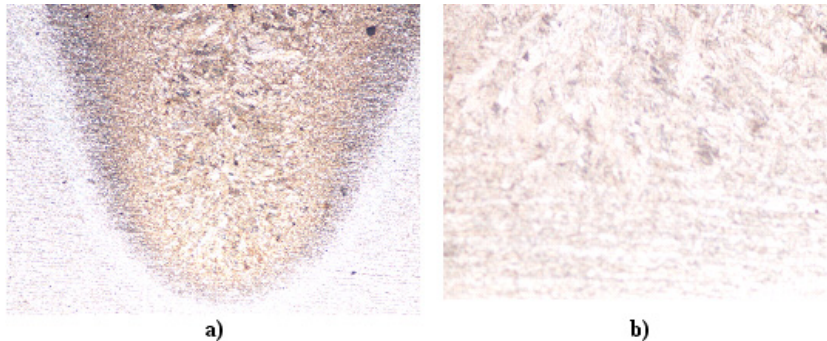


Figura 6.12 Sudura 9 a) Vedere generală mărire 50X b) Vedere generală mărire 100X c) Zona topită și zona afectată termic mărire 200X

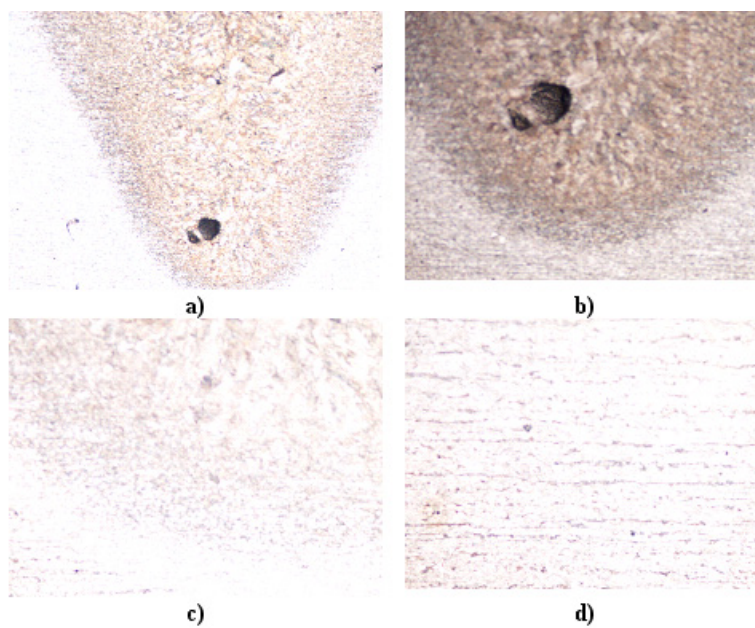


Figura 6.13 Sudura 19 a) Vedere generală, mărire 50X b) Vedere generală, mărire 100X c) Zona afectată termic, mărire 100X d) materialul de bază, mărire 100X

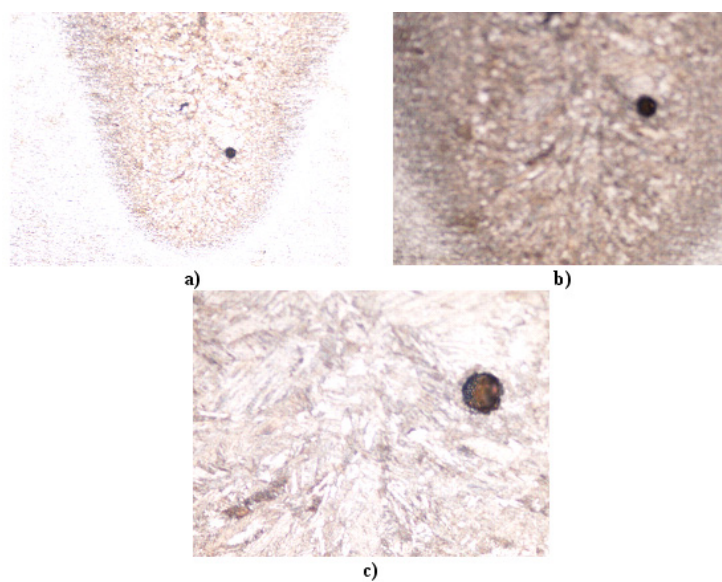


Figura 6.14 Sudura 36 a) Vedere generală, mărire 50X b) Zona topită, mărire 100X c) Zona topită, mărire 200X

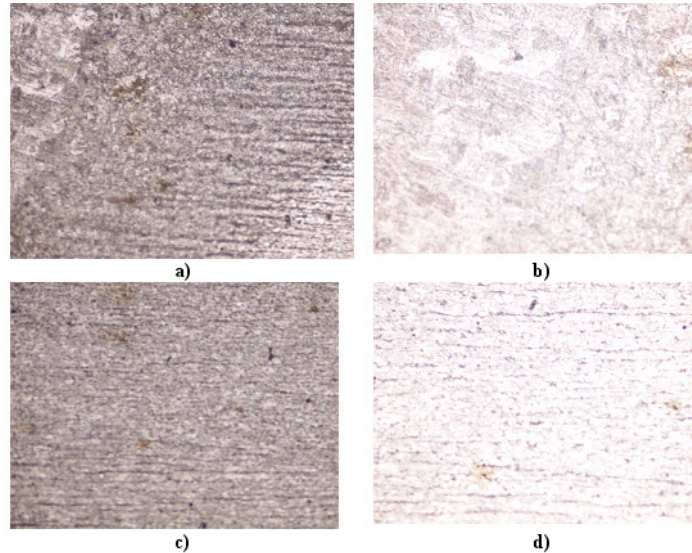


Figura 6.15 Sudura 26 Imagine a zonei afectate termic și a materialului de bază a) Zona afectată termic mărire 100X b) Zona afectată termic mărire 200X c) Material de baza mărire 100X d) Material de baza mărire 200X

Sudura 36 este o sudură în regim keyhole care are defocalizarea la 1mm sub suprafața piesei figura 6.14. Regimul de iradiere prezentat este moderat. Acesta prezintă o zonă afectată termic importantă, porozități excentrice și fiind o sudură lată o tendință de omogenizare a structurilor la centrul sudurii.

Pentru sudura 26, care este cea mai lată sudură, au fost puse în evidență schimbarea structurii în zona afectată termic și materialul de bază, figura 6.15. Se observă alături că după zona columnară din zona topită urmează o zonă cu grăunți fini, după care se păstrează structura materialului de bază cu schimbarea culorii.

Analiza efectuată arată că există o diferență mare între structura materialului în zona topită a materialului între regimul de conducție și regimul keyhole. Sudurile înguste în regimul keyhole conduc la zone afectate termic reduse. Sudurile în regim keyhole late produse de iradiere moderate au zone afectate termic consistente cu modificări structurale corespunzătoare temperaturii. Faza topită se întrerupe brusc. Există porozități excentrice dar materialul este omogen la centrul sudurii.

Se observă că structura materialului de bază este una deosebit de omogenă. Structurile obținute arată că solidificarea pornește se la marginea zonei topite către centrul acesteia. Zona topită are o structură grosieră în raport cu materialul de bază. În imediata apropiere a zonei topite, se observă o îngroșare a grăunților materialului de bază, apoi o colorație specifică a zonei afectate termic. Structurile columnare ale zonei topite sunt orientate normal la interfața dintre zona topită și materialul de bază. Această orientare conduce la următoarele situații. Pentru sudurile realizate la putere maximă structurile columnare au fost paralele cu suprafața piesei. Pentru sudurile realizate la viteză de sudare minimă structurile columnare au fost orientate perpendicular pe suprafața sudurii.

6.3 Măsurători de duritate

Măsurătorile de duritate s-au efectuat numai pe probele care au prezentat regimuri de iradiere extreme: cea mai mare putere 3 kW (sudurile 5,15,25) cea mai mică viteză de sudare 0.15 m/min (sudurile 6,16,26). S-au ales aceste suduri deoarece pe acestea deoarece efectele termice au fost puternice iar suprafața mare a sudurii permite efectuarea mai multor măsurători. Pe secțiunea sudurii s-a măsurat transversal și în profunzime duritatea folosind metoda Vickers. Aceasta folosește amprenta lăsată pe suprafața piesei de către un vârf de piramidă. Încercarea de duritate Vickers constă în impregnarea în material a unui vârf ascuțit în formă de piramidă patrulater regulată. Rezultatul primar al măsurătorii îl constituie diagonala amprentei. Aceasta este transformată în unități de duritate. Duritatea s-a măsurat în unități HV5. Măsurătorile transversale s-au efectuat pentru toate sudurile studiate pe o linie situată la 2mm sub suprafața piesei. S-a efectuat o măsurătoare în materialul de bază MB, o măsurătoare în zona afectată termic ZIT, o măsurătoare în zona topită la marginea sudurii CM, trei măsurători cu un pas de 0.2 mm între ele la centrul sudurii, al căror rezultat a fost mediat CC urmate de o repetare a măsurătorilor în ordine inversă, adică o măsurătoare la marginea zonei topite, o măsurătoare în marginea zonei topite, una în zona afectată termic și ultima în materialul de bază. Astfel măsurătorile efectuate au fost poziționate simetric față de centrul sudurii. Schema cu valorile durității măsurate și diagonala amprentei sunt prezentate în figura 6.16

Măsurarea durității în profunzime a fost efectuată la centrul sudurii începând de la suprafață. S-au efectuat trei măsurători la o distanță de 0.2 mm. Variația durității a fost analizată în următoarele reprezentări grafice. Măsurătorile realizate transversal la centrul secțiunii prin sudură pot fi considerate replici. Astfel s-a calculat dispersia pentru aceste valori. Valorile durităților sudurilor pe baza datelor din tabele au fost analizate pentru fiecare sudură în parte fiind abordată mai întâi variația transversală durității și apoi variația în profunzime. Discuțiile sunt prezentate în cele ce urmează. Valorile măsurate pentru duritate și pentru diagonala amprentei vârfului piramidei sunt prezentate în tabelul din anexă și pe scheme alăturate acestuia.

Figurile 6.17 și 6.18 prezintă grafic prin reprezentare cu funcții spline variațiile durității transversale respectiv în profunzime pentru sudurile 5, 15, 25. Acestea suduri sunt realizate la aceiași putere și viteză de sudare (3 kW, 0.6m/min), parametrul care diferă este defocalizarea. Se va analiza variația durității pentru fiecare din sudurile anterior menționate în parte.

Sudura 5. Pentru sudura 5 se observă vă că materialul s-a durificat în zona sudurii. Duritatea s-a dublat la centrul sudurii în raport cu duritatea materialului de bază. Se respectă o simetrie a valorilor pentru zonele omoloage ale sudurii relativ la centrul sudurii. Duritatea pe adâncime respectă în general pe cea obținută la centrul sudurii. Variația relativă a celor trei măsurători efectuate la centrul sudurii arată apropierea de zone care conțin porozități. Apropierea de porozități a este asociată cu o scădere a durității. Se observă o scădere relativă a durității cu profunzimea în raport cu suprafața. Acest lucru se datorează modului de solidificare a materialului în profunzime care are loc prin umplerea simetrică din două părți a keyhole. La suprafață acest lucru are loc prin curgerea în spate a topiturii. Altfel spus la suprafață se solidifică un curent de topitură pe când în interior la centrul sudurii se prind doi curenți diferiți.

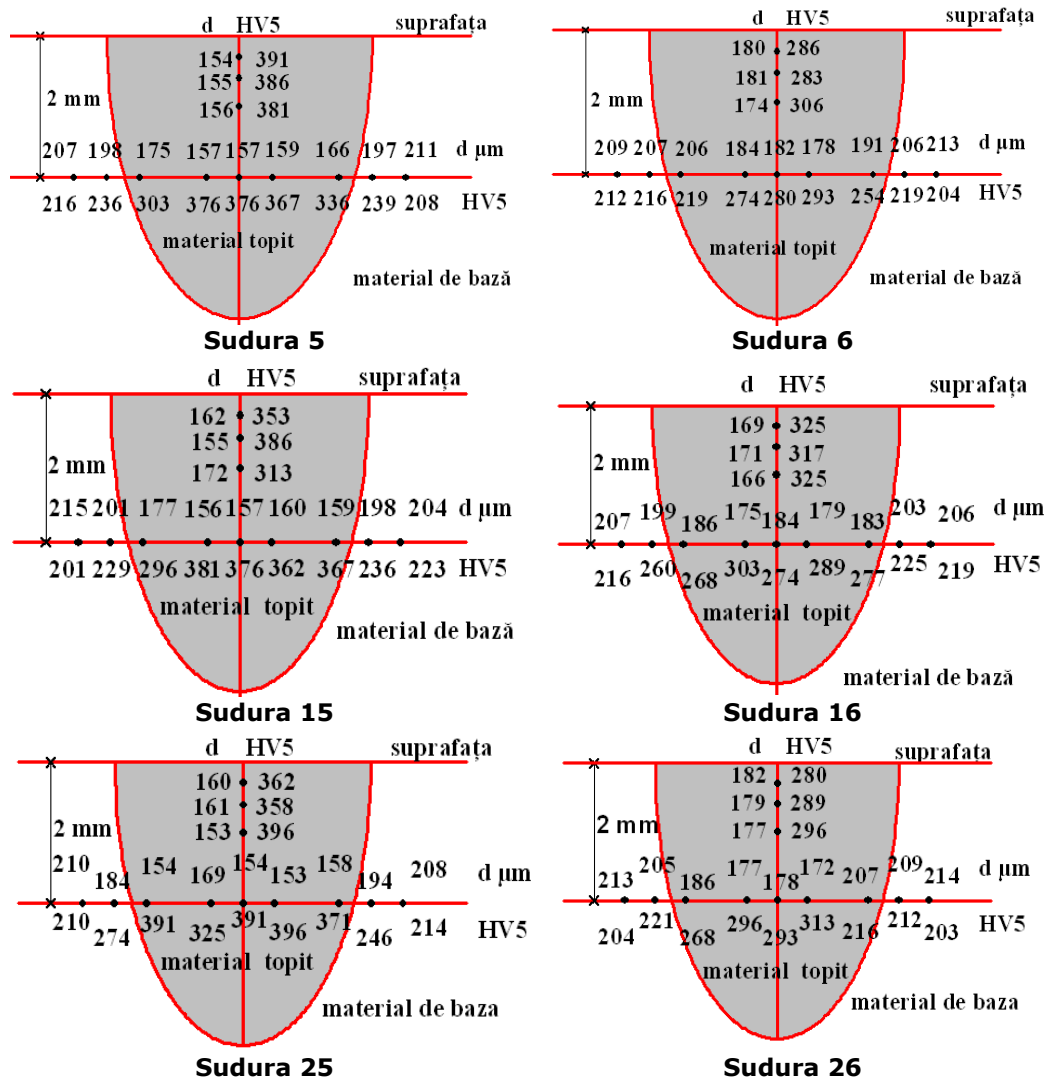


Figura 6.16 Poziția măsurătorilor de duritate pe secțiunea sudurii. D [μm]diagonala amprentei sudurii, HV5 duritatea

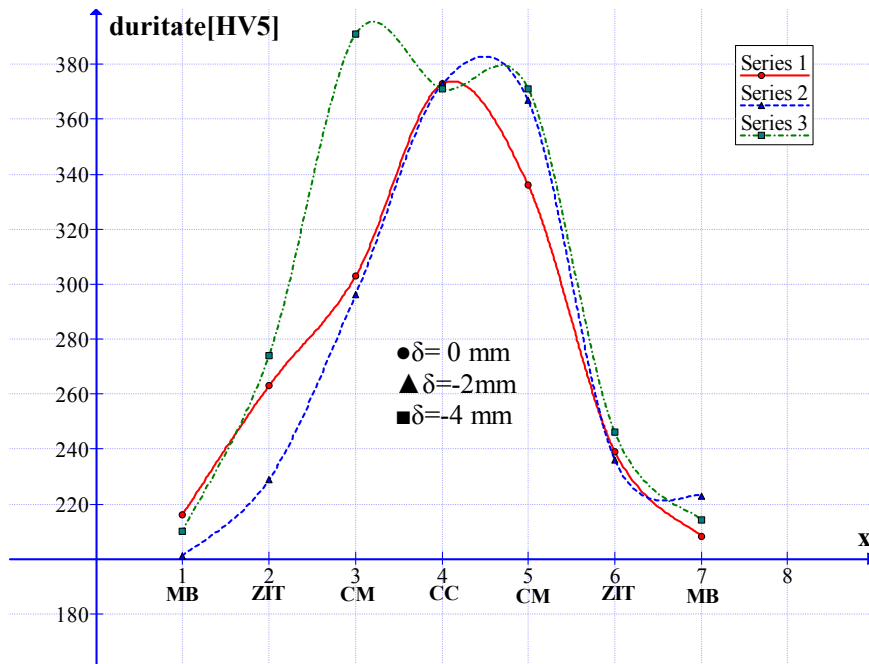


Figura 6.17 Variația transversală a durității în zona sudurii la puterea maximă de 3 kW, sudurile 5 ($\delta = 0$), 15 ($\delta = -2$ mm), 25 ($\delta = -4$ mm)

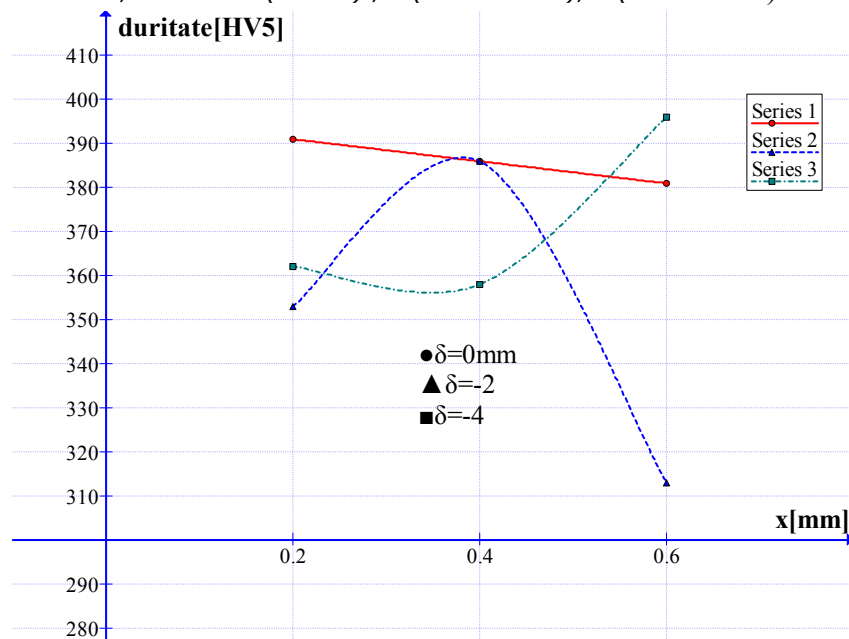


Figura 6.18 Variația în profunzime a durității la puterea maximă de 3 kW, sudurile 5 ($\delta = 0$)

Sudura 15. Pentru sudura 15 variația transversală a durității este de același tip ca pentru sudura 5. O durificare importantă se observă la centrul sudurii. Duritatea

crește de la materialul de bază la Zona influențată termic apoi către centrul sudurii. În ceea ce privește variația în profunzime apare o scădere a durtității în apropierea suprafeței după care se urmează o variație descrescătoare ca și în cazul precedent. Aceasta poate fi legată de modul particular de solidificare a topiturii la suprafața piesei.

Sudura 25. Pentru sudura 25 se observă ca și în cazurile precedente durificarea materialului în zona sudurii. Variația în profunzimea materialului a durtității arată aparent invers decât în celelalte cazuri analizate. În realitate variația surprinde numai scăderea relativă a durtității la suprafața piesei.

Cele trei suduri anterior prezentate au arătat o durificare a materialului în zona sudurii durificarea sudurii. Prin coborârea planului focal în interiorul piesei s-a realizat scăderea intensității fascicolului laser la suprafața piesei. Valorile durtității nu au fost diferite pentru cele trei cazuri însă a variat distribuția lor relativ la zonele suduri. Astfel focalizarea în interiorul piesei a produs o apropiere a valorilor durtității între centrul sudurii și marginile sudurii. Aceasta apropiere a valorilor însoțită de o creștere bruscă a durtității în zona sudurii în comparație cu zona afectată termic și materialului a sursei termice. Alt fenomen care apare este scăderea durtității, în zona topită și resolidificată, la suprafața sudurii în raport cu durtatea materialului de sub suprafață. Temperatura topiturii la suprafața băii de sudare este mai mică decât pentru focalizările în interiorul piesei decât în cazul focalizării fascicolului laser la suprafața piesei. Prin aceasta se va influența desfășurarea procesului de solidificare a topiturii.

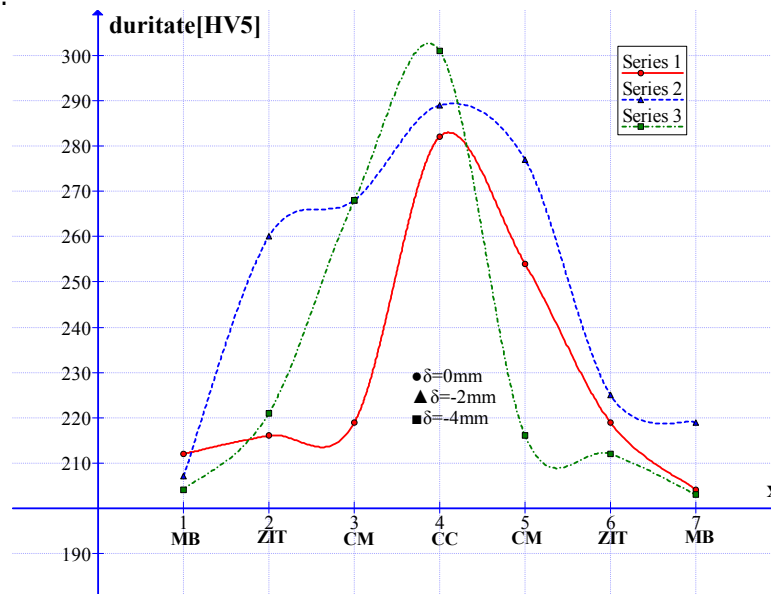


Figura 6.20 Variația transversală a durtității în zona sudurii pentru sudurile la viteză minimă 0.15 m/min pentru sudurile 6 ($\delta = 0$), 16 ($\delta = -2\text{mm}$), 26 ($\delta = -4\text{mm}$)

Variația durtității transversală respectiv în profunzime pentru sudurile realizate la viteza de sudare minimă (6, 16, 26) au fost reprezentate grafic folosind interpolare cu funcții spline în figurile 6.19 și 6.20. Sudurile analizate au fost realizate în aceleași condiții privind puterea și viteza de sudare (2kW, 0.15m/min), diferența între suduri a constat în variația defocalizării prin coborârea

planului focal în interiorul piesei. Discuțiile asupra variației durității sunt prezentate în cele ce urmează.

Sudura 6. Variația durității pentru sudura 6 arată durificarea materialului în zona sudurii. Duritatea maximă se obține la centrul sudurii. Pentru variația durității în profunzime la centrul sudurii se observă o scădere puternică a durității la suprafață urmată de o creștere puternică la o valoare superioară celei înregistrate pe la analiza transversală a variației pentru centrul sudurii

Sudura 16. Variația durității pentru sudura 16 arată durificarea materialului în zona sudurii. Se remarcă o apropiere a a valorilor între zona influențată termic, marginea sudurii și centrul acestuia. Variația în profunzime reprezentată nu arată diferențe mari. Valorile acesteia sunt mai mari decât cele obținute la analiza variației transversale a durității .

Sudura 26. Variația durității pentru sudura 26 arată durificarea materialului în zona sudurii . Se observă o diferență mică între zona afectată termic și materialul de bază. Altfel spus durificarea principală se obține la centrul sudurii. Variația în profunzime la centrul sudurii arată numai creștere durității în interiorul zonei topite în raport cu duritatea la suprafața sudurii.

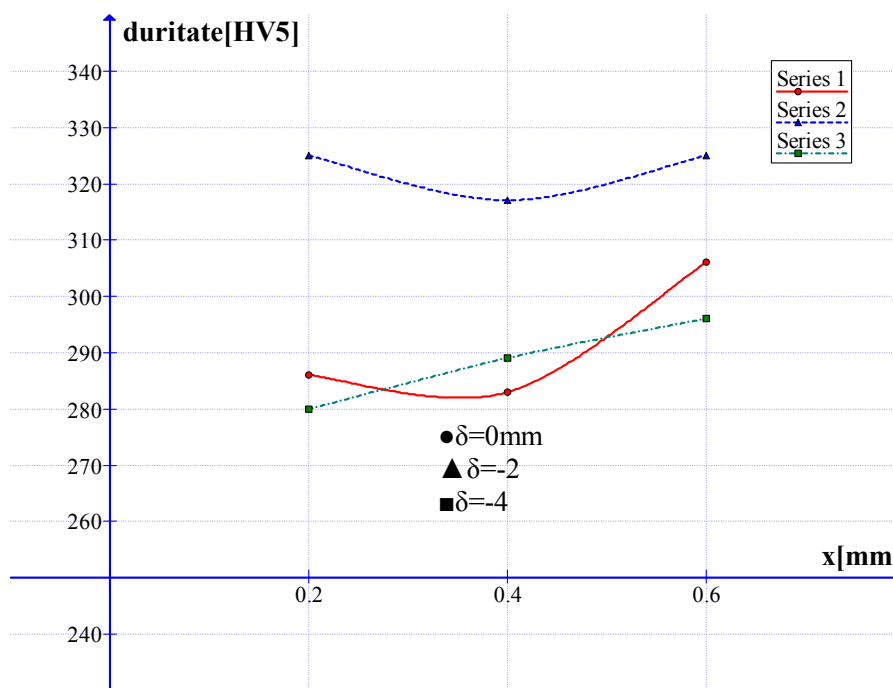


Figura 6.21 Variația în profunzime a durității în zona sudurii pentru sudurile la viteza minimă 0.15 m/min pentru sudurile 6 ($\delta = 0$), 16 ($\delta = -2$ mm), 26 ($\delta = -4$ mm)

Defocalizarea produs scăderea intensității fascicolului suprafața piesei.. Se confirmă modul de variație a durității observat pentru sudurile (5, 15, 25) în sensul obținerii unui palier constant al valorilor durității odată cu scăderea intensității fascicolului laser la suprafața piesei. Scăderea puterii a produs scăderea intensității

astfel că se poate face o analogie între sudurile 6 și 15 respectiv 16 și 25. Folosirea unei viteze de sudare mici a dus la o cantitate mare de topitură. Mai multă topitură înseamnă evident și scăderea temperaturii acesteia. Aceasta explică scăderea durițăților pentru cazul în care s-a folosit o viteză de sudare mică. Scăderea durițății poate fi astfel pusă în legătură cu începutul procesului de solidificare. În ceea ce privește variația durițății la centrul sudurii în zona analizată (până la 2mm în profunzime) modul general de variație este următorul: apare o creștere a valorilor durițății care apoi este urmată de o scădere a acestora.

Duritatea maximă a materialului a fost obținută pentru fiecare sudură în centrul acesteia. Pentru a avea o imagine generală asupra durificării materialului s-a calculat duritatea relativă a materialului. S-au mediat pentru fiecare sudură cele două măsurători pentru duritatea materialului de bază, obținându-se astfel o valoare pentru duritatea materialului de bază ($HV5_{MB}$). S-au mediat cele trei valori pentru duritate măsurate la centrul sudurii ($HV5_{CC}$). În toate cazurile analizate duritatea maximă a fost cea de la centrul sudurii, comparativ cu marginile acesteia și zona afectată termic. Duritatea relativă DR [%] s-a calculat ca raportul dintre diferența între duritatea la centrul sudurii și cea a materialului de bază. Rezultatele au fost exprimate în procente și se află în tabelul 6.2

$$DR = \frac{HV5_{CC} - HV5_{MB}}{HV5_{MB}} \text{ [%]} \quad (6.4)$$

Tabel 6.2 Analiza variațiilor relative ale valorilor durițăților

Sudura	Variația Relativă a durițății DR [%]	Sudura	Variația Relativă a durițății DR [%]
5	76	6	35
15	76	16	32
25	75	26	40

Rezultatele arată că pentru fiecare din cele două serii s-a obținut același nivel de duritate indiferent de defocalizare. Durificarea este dublă pentru sudurile realizate la putere maximă comparativ cu cele realizate la viteză minimă. Acest lucru se datorează dimensiunii băii de sudare. La viteză minimă baia de sudare este mai mare ceia ce afectează solidificarea. Dacă urmărim structura zonei topite pentru aceste suduri observăm o mică diferență între structuri pentru sudurile 6,16,26 comparativ cu cele de la sudurile 5,15,25. Aceasta constă în faptul că grăunții sunt mai mari și mai puțini alungiți. Reducerea cantitativă a limitelor de separație între grăunții zonei topite ar justifica scăderea relativă a durițății sudurilor.

6.4 Concluzii

A fost realizată o analiză a structurii materialului în zona sudurii. S-au realizat măsurători de duritate și microstructuri ale materialului. S-a observat durificarea materialului în zona sudurii. Această durificare este progresivă și atinge maximul în zona topită și resolidificată. Durificarea materialului este simetrică relativ la centrul sudurii. Centrul sudurii este o zonă în care apare o tendință de fragilizare a materialului. Aceasta se pune în evidență prin variația durițății la centrul sudurii în profunzime. În apropierea suprafeței se află o zonă în care

materialul are duritate mai scăzută. Variația durității la centrul sudurii este asociată cu prezența unor linii de fisură observate pe microstructuri.

Sudurile realizate la putere ridicată prezintă zone afectate termic mici. Sudurile la viteză de sudare mică prezintă zone afectate termic mari. Creșterea durității materialului este asociată cu trecerea de la o structură omogenă a acestuia la una eterogenă.

Principala problemă legată de sudurile realizate cu laser este prezența porozităților. Fotografierea în raze X a sudurilor a fost realizată în lucrările [Xie 2002 b] , [Haboudou 2003], [Katayama 2001] . Micrografii ale sudurilor sunt prezentate în lucrările [Liu 2007], [Liu 2008], [Cantello 1996]. Observarea porozităților și efectul acestora asupra rezistenței mecanice a sudurilor a fost prezentată în lucrările [Cho 2001] , [Dausinger 2001] [Katayama 2001]. Accentul asupra tipurilor de defecte care se obțin în suduri a fost prezentat în lucrările [Nath 2002] , [Tzeng 1998] , [Zang 2004] . Studiul durității materialului prin metoda Vickers este pe larg utilizată la evaluarea sudurilor. Dintre studiile care prezintă măsurători de duritate a sudurii [Sierra 2007], [Sun 1999].

Analize asupra caracteristicilor materialului sudurii au fost prezentate de autor și în alte lucrări. Astfel observarea porilor folosind fotografii în raze X a fost prezentată în lucrarea [Boboescu 2009 i]. Analiza durității și microstructurilor prezentate de secțiunea transversală a fost prezentată în lucrările [Boboescu 2009 k] și [Boboescu 2010 c].

7. Concluzii și contribuții personale

În Capitolul 7 se va prezenta o analiză structurată a conținutului lucrării. Aceasta va aborda următoarele probleme:

- efectul parametrilor variați asupra funcțiilor obiectiv;
- rezultate teoretice legate de fenomenul de keyhole în baia de sudare;
- realizarea obiectivelor specifice propuse;
- soluții tehnologice privind optimizarea procesului de sudare;
- perspective de studiu;
- principale contribuții ale autorului.

Principalele concluzii ale analizei variațiilor funcțiilor obiectiv cu parametrilor procesului de sudare sunt:

- Puterea laserului este factorul principal în stabilirea valorilor funcțiilor obiectiv.
- Viteza de sudare este al doilea factor de influență și are influență contrară puterii asupra funcțiilor obiectiv
- Defocalizarea are influență indirectă asupra funcțiilor obiectiv. Focalizarea în interiorul piesei duce la scăderea intensității laserului la suprafața piesei. Aceasta poate scădea însă și prin scăderea puterii. Majoritatea efectelor creșterii defocalizării (focalizării în interiorul piesei) asupra funcțiilor obiectiv sunt similare scăderii puterii.

Fenomenologia generală a procesului de sudare este legată de obținerea fazei topite în material . Datele experimentale arată că obținerea fazei topite în material are următoare dependențe observate la studiul lățimii sudurii LS și LM, profunzimii sudurii h și ariei topite AT

- Cantitatea de material topit crește cu intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei . Aceasta este controlată prin putere ca dependență principală și prin defocalizare ca dependență secundare. Intensitate la suprafață crește cu puterea și cu apropierea punctului focal de suprafața piesei.
- Cantitatea de material topit crește cu timpul de interacțiune Acesta este controlat de viteza de sudare și creștere cu scăderea vitezei de sudare.

Adâncimea craterului care se obține la sfârșitul procesului de sudare arată efectul cumulat al mișcării topiturii și al vaporizării. Aceasta are același tip de dependență cu observația că contribuția puterii și vitezei este egală și de sens contrar.

Supraînălțarea sudurii arată efectul datorat mișcării topiturii în procesul de sudare. Acesta este puternic dependent de puterea laserului și prin urmare de intensitatea radiației la suprafața piesei.

Se observă astfel că efectul datorat intensității laserului la suprafață și timpului de interacțiune este identic pentru toate transformările de fază.

Alături de transformările de fază care sunt specifice sudării în regim keyhole apare și efectul propriu al keyhole de creștere a cuplajului dintre radiația laser și material. Aceasta este pus în evidență la defocalizarea $\delta = -2\text{ mm}$. Analiza a fost efectuată asupra lățimii sudurii LS și LM , profunzimii h și ariei topite a materialului. AT Aici se obține o conjunctură favorabilă în care intensitatea laserului la suprafață este suficient de ridicată iar pata acestuia pe suprafața piesei este suficient de mare. Astfel apar distinct perioadele de inițiere și deschidere a keyhole în care

aceasta se formează și perioada în care radiația se propagă în keyhole. Propagarea radiației în keyhole conduce la creșterea cuplajului dintre radiația laser și material. În contrast cu situația anterior descrisă la defocalizarea $\delta = 0$ intensitatea laserului la suprafață este mult mai ridicată însă pata este mult mică. În această situație absorbția Radiației în piesă este directă se formează și chiar se menține o keyhole adâncă dar nu se poate folosi conceptul de propagare a radiației în keyhole. Prin punerea în evidență a acestui efect se disting două situații distincte pentru regimul keyhole:

- Efectul general (obținerea de topitură) asociat cu tendința generală de variație a parametrilor pentru producerea de topitură și vapori în material. Efectul este caracteristic focalizării fascicolului laser la suprafața piesei $\delta = 0$.
- Situația particulară de creștere a cuplajului dintre radiația laser și material care apare propagarea radiației în keyhole și înclinarea peretelui din față situație care produce variații particulare care nu coincid cu cele generale date de intensitatea laserului la suprafață și cu timpul de interacțiune. Efectul este caracteristic focalizării fascicolului laser în profunzimea piesei la $\delta = -2\text{ mm}$ și chiar la $\delta = -1\text{ mm}$ unde sudurile 35 și 36 au arătat un regim keyhole foarte pronunțat.

Aceste particularități ale procesului de sudare în regim keyhole sunt puse în evidență prin cercetări on-line a procesului de sudare. Cercetările efectuate arată că particularitățile legate de keyhole pot fi puse în evidență și prin studiul sudurilor. Acest rezultat permite efectuarea de presupuneri și considerații asupra formei keyhole pe baza caracteristicilor sudurii.

Abordarea problemelor teoretice au pus în evidență noi cunoștințe de despre keyhole și fenomenele care au loc în baia de sudare. Prima problemă abordată a fost structurarea cunoștințelor despre fenomenul de keyhole în sudarea laser. Definierea fenomenului de keyhole și evoluția în timp a băii de sudare. Abordarea acestora a arătat că o imagine corectă asupra fenomenelor care au loc în baia de sudare se poate obține numai în cazul în care se face legătura cu parametrii procesului în special cu intensitatea laserului la suprafața piesei. Principalele aspecte fenomenologice legate de keyhole sunt puse evidență de imaginile ale acesteia în raze X, și de observații asupra suprafeței băii de sudare. Aceste observații experimentale sunt însoțite de considerații teoretice care de obicei explică parțial fenomenele observate. Din punct de vedere al fizicii aceasta înseamnă studiul simultan vaporizării și mișcării topiturii produse de o densitate de flux termic ridicată. Problematika aceasta depășește cadrul practic de studiu al procesului de sudare. Se consideră totuși trei probleme care au un efect important:

- existența unui echilibru al presiunilor care contribuie la deschiderea și menținerea keyhole în baia de sudare;
- înclinarea peretelui din față al keyhole care are consecințe asupra absorbției radiației și mișcarea topiturii în baia de sudare, de la partea din față către partea din spate a băii de sudare cu consecințe la închiderea keyhole;
- absorbția radiației laser datorită reflexilor Fresnel în keyhole.

Aceste fenomene sunt prezentate în alte studii relativ la intensitatea absorbită de la laser. A face legătura cu parametrii de proces este dificil deoarece există un cerc al problemelor în care absorbția radiației laser este dependentă de forma keyhole care la rândul ei este dependentă de efectul termic al radiației absorbite. Soluția teoretică a fost atribuirea întregii problematice a unui rol secundar comparativ cu cele legate de obținerea zonei topite a sudurii. Astfel se consideră o

proportionalitate între capacitatea laserului de a obține topitură și a susține efecte speciale în baia de sudare (vaporizarea, formarea keyhole, mișcarea topiturii). Efectul apariției și închiderii keyhole se observă și în sudura finală prin prezența porozităților și cavităților în sudură. Acesta face legătură cu fenomenele anterior descrise.

Forma băii de sudare a keyhole și evoluția fenomenelor depind de intensitatea fascicolului laser la suprafața piesei. Tipul general de desfășurare a fenomenelor nu este predictibil însă pot fi separate două cazuri distincte de desfășurare a fenomenelor prezentate în figura 7.1. În cazul unei iradiieri numită slabă (dar suficientă pentru obținerea regimului de sudare keyhole) se produce o baie de sudare largă, se favorizează obținerea de topitură, iradierea are loc la peretele din față al keyhole, are loc propagarea radiației în keyhole și creșterea absorbției. În al doilea caz, cel al unei iradiieri puternice se crește contribuția vaporizării în care se produce o baie de sudare îngustă și o keyhole profundă. Fenomenele de formare a keyhole, evoluție și propagare a radiației în aceasta au un caracter simultan și nu pot fi separate. Cele două situații pot fi identificate prin studiul sudurilor.

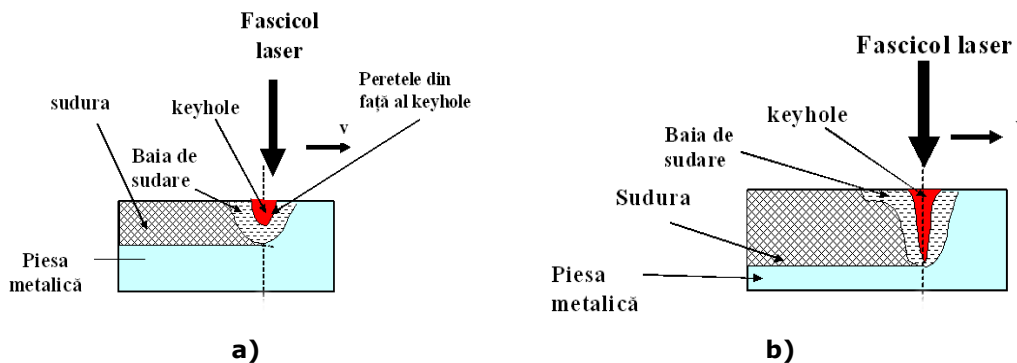


Figura 7.1 Cazuri specifice ale prezenței keyhole în baia de sudare a) cazul unei iradiieri slabe, b) cazul unei iradiieri puternice

Problemele legate de sudare și obținerea zonei topite a sudurii reduce particularitățile regimului de keyhole la cele legate de penetrarea ridicată a sudurii. Baza acestor studii este reprezentată de teoria termică. Aspectele acestora au fost abordate pe larg. Studiile efectuate au abordat următoarele aspecte:

- S-au formulat separat problemele termice pentru încălzirea materialului și pentru transformarea de fază produse de o densitate de flux termic situată la suprafața materialului.
- S-a arătat că transformările de fază sunt procese izoterme. Ele sunt aplicabile atât proceselor termice cât și celor mecanice produse de fasciculul laser. Transformările de fază pot fi definite exact ca transformări termice particulare (topire, vaporizare, sublimare) sau ca transformări termice integrale (încălzire urmată de topire).
- Efectul transformării de fază în material este pus în evidență de viteza u de propagare a frontului de transformare de fază în material. Aceasta este direct proporțională cu densitatea de flux termic și invers proporțională cu densitatea materialului și cu căldura latentă.

- Intensitatea fascicolului laser susține mai multe transformări de fază simultan. Efectul principal îl are transformarea de fază care are viteza cea mai mare de propagare în material.

Aceste idei apar și în alte studii însă nu sunt formulate explicit deoarece se urmărește descrierea unor situații cunoscute fără a urmări un cadru teoretic în care unele concepte sunt redefinite (cu referire directă la cel de transformare de fază). Lucrare de față a urmărit o structurare teoretică care să permită formulări matematice care fie folosite la modelarea analitică. Exploatarea și exemplificarea generala a conceptelor și relațiilor propuse depășește cadrul lucrării.

Pe baza structurii teoretice propuse s-au rezolvat următoarele probleme :

- identificare relației dintre densitatea de flux termic și timpul de interacțiune pentru care are loc sudarea în regim keyhole
- identificarea domeniului de variație pentru căldura latentă (a transformării de fază integrale) în condițiile unei densități de flux termic date.
- Delimitarea și separarea teoretică a regimurilor de sudare
- Modelarea profunzimii sudurii pe baza propagării frontului de topire în material.

Îmbinarea realizărilor teoretice cu cele experimentale, în special cu cele care privesc mărimile care caracterizează suprafața sudurii (dimensiunile craterului de la sfârșitul procesului de sudare) au condus la calculul raportului dintre viteza de penetrare a frontului de topire și a celui de vaporizare u_m/u_v pentru densitățile de flux termic folosite în experimentări. S-a arătat astfel că topirea materialului este principalul fenomen termic care are loc.

În Capitolul 1 au fost stabilite obiectivele studiului. În cele ce urmează se va discuta modul în care acestea au fost realizate:

Astfel despre obiectivul „O1 Stabilirea rolului defocalizării fascicolului laser ca factor de influență comparativ cu puterea laserului și viteza de sudare” se poate spune că se regăsește în următoarele rezultate:

- Pentru majoritatea funcțiilor obiectiv studiate defocalizarea are efect contrar puterii, se arată astfel că primul efect al defocalizării este scăderea intensității laserului la suprafața piesei.
- Inducerea de variații particulare care arată efectul acestei mărimi în creșterea cuplajului energetic în material.
- Obținerea celor mai mari valori pentru eficiența absolută K pentru focalizări în interiorul piesei.

Obiectivul „O2 Studiul caracteristicilor suprafeței sudurii în vederea stabilirii legăturii dintre parametrii de proces și caracteristici ale băii de sudare, mișcării topiturii și formării keyhole” se regăsește în următoarele rezultate:

- Analiza mărimilor care caracterizează craterul obținut la sfârșitul procesului de sudare

Obiectivul „O3 Stabilirea penetrării sudurii pentru sudarea în regim keyhole pe baza penetrării frontului de topire în material” se regăsește în următoarele rezultate

Obiectivul „O4 Identificarea unor caracteristici de material ale sudurilor legate de parametrii procesului de sudare” se regăsește în următoarele rezultate:

Componenta de optimizare a procesului de sudare laser apare în mod complementar modelării analitice. Funcțiile obiectiv studiate nu au prezentat maxime sau minime locale pe domeniul experimental. Ele au prezentat numai tendințe de variație crescătoare sau descrescătoare. S-a arătat că este recomandabil a folosii variația puterii pentru a controla:

- regimul de sudare
- penetrarea sudurii

- cantitatea de topitură

Valoarea concretă a puterii laserului depinde de cazul concret al grosimii pieselor, a materialului de adaos și interstițiului dintre ele.

Nu se recomandă folosirea puterii maxime disponibile deoarece în acest caz va crește cantitatea de porozități din sudură. Folosirea de puteri între 1.5 și 2.5 kW reprezintă un compromis rezonabil din punctul de vedere al obținerii regimului de keyhole cu o prezență moderată a porozităților.

Se vor evita vitezele de sudare mici. Acestea produc suduri late cu zone afectate termic mari și multe porozități, și fisuri la centrul sudurii. Se recomandă folosirea vitezelor de sudare de 0.6 și 0.9 m/min.

Se va prefera focalizarea fascicolului laser puțin sub suprafața piesei. Aceasta va asigura stabilitatea și reproductibilitatea caracteristicilor suprafeței sudurii. De asemenea în acest caz se asigură creșterea cuplajului dintre radiația laser și material. Se recomandă focalizarea la $\delta = -2\text{ mm}$.

Lucrarea are ca părți distincte o parte rezultate experimentale, o parte de cercetări teoretice și transversal celor două anterior amintite o parte metodică. Toate cele trei părți creează baze pentru studii viitoare. Acestea se pot concretiza în studii asupra regimului keyhole în sudarea laser atât din punct de vedere tehnologic cât și punct de vedere fizic.

Cercetările experimentale pot fi continuate pe același material sau pe materiale similare. Rezultatele obținute pot fi în continuare fructificate prin definirea și măsurarea de noi funcții obiectiv și aplicarea altor tipuri de modele matematice. Cunoașterea rezultatelor experimentale asigură posibilitatea unei îmbunătățiri în ceea ce privește valorile factorilor de influență. Aceasta se în primul rând la corelare mai bună a grosimii materialului cu penetrarea care să facă posibilă o mai bună observare a porozităților în raze X.

Partea teoretică arată principalele direcții de cercetare care apar în studiul efectelor iradierii cu laser a materialelor în general și a materialelor metalice în particular. Structurarea problemelor este însoțită de introducerea de noi concepte (transformarea de fază particulară extinsă de la efectele termice la cele mecanice și reacții chimice, definirea transformărilor de fază integrale). Exemplificarea și aplicarea acestora în lucrare a fost restrânsă la rezultatele experimentale. Aceste concepte oferă mari posibilități de studiu. Aceasta înseamnă în primul rând posibilitatea de a structura unitar rezultate experimentale diferite.

Partea metodică a lucrării oferă ca principale direcții de cercetare următoarele:

- Relativ la rezultate experimentale să se prezinte situații ideale ale formei și dimensiunilor keyhole relativ la momentul interacțiunii, proprietățile materialului și intensității laserului. Se propune astfel înlocuirea unor situații ideale ale formei și keyhole bazate pe considerare elementară a fenomenelor fizice cu caracteristici ale formei bazate pe parametrii de proces. Deși mai puțin sugestive noțiuni ca propagarea frontului de topire, propagarea frontului de vaporizare în material sunt mai concrete cantitativ decât „se topește” sau „se evaporă”. Prin structurarea l cercetărilor din lucrare și structurarea materialului bibliografic se creează posibilitatea unei mai bune sistematizări a studiului fenomenului de keyhole ca obiect de studiu în sine.

- Relativ la cercetarea teoretică se arată că introducerea de noi concepte bazate pe similitudini poate conduce la un progres în domeniul cercetat. De asemenea se arată că modul general de desfășurare a fenomenelor are prima importanță. Fenomenele particulare se încadrează în cadrul general pentru a fi înțelese corect.

- Relativ la partea experimentală s-a arătat că interpretările trebuie să vizeze prin selecția funcțiilor obiectiv aspecte esențiale ale procesului. Aceasta înseamnă să se aleagă o singură funcție obiectiv din mai multe similare care au același tip de variație. Aparatul matematic de prelucrare a datelor să fie însă consistent deoarece prelucrări diferite pot evidenția aspecte fenomenologice noi care nu rezultă din observarea directă a datelor experimentale. Un rol important îl are și corelația între diferite tipuri de analiză și îmbinarea rezultatelor particulare pentru definitivarea unei viziuni generale asupra procesului de prelucrare din punct de vedere fizic și tehnologic.

Principalele contribuții ale autorului tezei sunt prezentate în cele ce urmează:

- Studiul la nivel teoretic și experimental al fenomenului de keyhole în baia de sudare;
- Selectarea și corelarea fenomenelor fizice produse în baia de sudare cu aspecte tehnologice;
- Extinderea domeniului de aplicație a relațiilor care caracterizează obținerea transformărilor de stare de agregare în material;
- Prezentarea unui model analitic pentru propagarea frontului de topire în material cu aplicație la determinarea penetrării sudurii;
- Definirea și aplicarea unui program experimental pentru studiul sudării laser folosind experimente de tip clasic și factorial;
- Propunerea pentru experimentari a unor condiții experimentale particulare legate de oțelul folosit, grosimea acestuia și valorile parametrilor utilizați care au permis dezvoltarea liberă a zonei topite în material și investigarea unui domeniu experimental extins;
- Realizarea de modele matematice care leagă parametrii de proces de caracteristicile sudurii, folosind metode matematice variate;
- Punerea în evidență a aspectelor fenomenologice și tehnologice legate de folosirea defocalizării ca parametru de proces;
- Introducerea unor noi probleme de studiu legate de suprafața sudurilor cu scopul de a pune în evidență efectele unor fenomene fizice care au loc în baia de sudare;
- Utilizarea simultană a aparatului teoretic și a rezultatelor experimentale pentru caracterizarea condițiilor în care are loc topirea și vaporizarea materialului

Anexa 1

Mărimi fizice măsurate și calculate

A1.1 Mărimi măsurate și calculate pentru secțiunea prin sudură

Tabel A1.1 Marimi care caracterizează secțiunea sudurii

Sd.	Lățimea sudurii LS [mm]	Profun - zimea h [mm]	Raportul F[-]	Aria Topită AT [mm ²]	Sd.	Lățimea sudurii LS [mm]	Profun - zimea h [mm]	Raportul F[-]	Aria Topită AT [mm ²]
1	0.8	0.2	4	0	21	0.8	1.32	2.66	0
2	2.8	1.3	2	2	22	2.2	0.37	5.5	0.7
3	3.8	2.77	1.52	3	23	3.6	1.65	2	1.5
4	4	4.50	0.88	9	24	4.8	3.84	1.26	6.5
5	4	5.29	0.8	9	25	5	4.59	1.11	11
6	8.5	6.26	1.30	18	26	7.5	4.81	1.63	13
7	6	4.78	1.33	10	27	6	3.21	2	7
8	4	3.99	1.25	7	28	4	2.53	1.6	3
9	3	3.16	1.03	4	29	2.5	2.27	1.13	1.5
10	2	2.86	0.71	2.5	30	2.5	1.62	1.66	1
11	0.9	0.25	3	0	31	1.8	0.7	3.6	0.2
12	1.8	0.5	3.6	0.2	32	2.8	4.58	0.7	4
13	3.5	2.18	1.52	2	33	0.8	0.3	2.66	0.2
14	4.5	4	1.12	9	34	2.8	3.28	0.93	2.5
15	5	5	0.96	10	35	3	3.15	1.153	3
16	8	5.43	1.6	18	36	2.9	3.00	0.96	5
17	6	4.18	1.42	11	37	2.2	1.94	2.75	0.5
18	4	3.45	1.33	6					
19	3.4	2.89	1.21	3					
20	2.5	2.62	1.13	2.5					

A1.2 Mărimi măsurate și calculate pentru suprafața sudurilor

Tabelul A1.2 Mărimi care caracterizează craterul de la sfârșitul procesului de sudare –forma și dimensiunile craterului

Sudura	Axa X [mm]	Axa Y [mm]	alungirea b [mm]	Abaterea de la circularitate [%]
1	0.55	0.5	0.21	-26
2	2.1	2.28	1.26	27.4
3	3.21	2.76	1.96	49
4	3.24	2.32	2.25	110
5	4.58	2.62	3.47	186.9
6	6.09	4.84	3.33	28.6
7	4.69	3.49	2.81	54.7
8	5.11	3.55	3.24	78
9	3.92	2.86	2.62	92.8
10	3.36	2.58	1.77	22.9
11	1.21	1.19	0.53	-16.3
12	2.16	1.9	0.95	-11.8
13	3.33	3	1.86	25.7
14	5.29	3.83	3.24	63.1
15	5.77	3.6	3.6	81.4
16	5.73	5.46	3	9.7
17	5.34	4.46	2.89	23.5
18	4.5	3.46	2.34	20.2
19	4.05	3.18	2.31	38.6
20	3.36	2.69	1.9	36.2
21	1.13	0.93	0.66	42.6
22	0.62	0.5	0.37	47.4
23	3.2	2.91	1.81	27.4
24	5.74	4.38	3.37	48
25	5.93	4.21	3.92	90
26	4.86	4.58	2.4	1.4
27	4.46	4.06	2.4	17.3
28	4	3.37	2.07	14.3
29	4.12	3.42	2.41	41
30	3.45	2.92	1.86	22.6
31	1.69	1.58	0.9	13.7
32	6.97	5.03	4.49	79.8
33	1.16	1.16	0.6	6.1
34	7.05	5.19	4.55	78.6
35	3.68	2.71	2.13	46.6
36	6.87	4.89	3.82	39.3

Tabelul A1.3 Mărimi care caracterizează craterul de la sfârșitul procesului de sudare – suprafața adâncime și volumul craterului

sudura	Suprafața craterului acr [mm ²]	Adâncimea Craterului i _{cr} [mm]	Volumul craterului V _{cr} [mm ³]	Raportul G i _{cr} /h [-]
1	0.22	-	0	0
2	3.43	0.4	0.457	0.307
3	6.69	0.35	0.780	0.126
4	4.38	0.75	1.314	0.2
5	6.92	0.85	2.306	0.189
6	21.47	0.8	5.725	0.127
7	10.89	0.66	2.395	0.138
8	10.75	0.5	1.791	0.125
9	7.4	0.44	1.085	0.139
10	5.89	0.34	0.667	0.118
11	1.1	-	0	0
12	2.13	1.8	0.127	0.36
13	7.17	0.42	1.003	0.192
14	13.42	0.6	3.131	0.175
15	14.45	0.63	3.516	0.146
16	23.64	0.65	5.122	0.119
17	18.91	0.37	2.332	0.088
18	10.88	0.29	1.051	0.084
19	8.75	0.25	0.729	0.086
20	6.01	0.21	0.420	0.080
21	0.65	-	0	0
22	0.25	0.1	0.008	0.270
23	6.73	0.35	0.785	0.212
24	16.57	0.6	3.314	0.156
25	16.04	0.66	3.528	0.143
26	18.4	0.6	3.68	0.124
27	14.82	0.43	2.124	0.133
28	8.82	0.4	1.176	0.158
29	9.45	0.3	0.945	0.132
30	7.2	0.3	0.72	0.185
31	1.98	0.2	0.132	0.285
32	20.83	0.21	1.458	0.045
33	0.74	0.17	0.041	0.566
34	21.16	0.4	2.821	0.121
35	6.38	0.42	0.893	0.133
36	22.15	0.37	2.731	0.123
37		0.25	0	0.128

Tabelul A1.4 Alte mărimi care caracterizează suprafața sudurii

Sudura	Supraînălțarea sudurii Su [mm]	Lățimea Medie LM [mm]	Sudura	Supraînălțarea sudurii Su [mm]	Lățimea Medie LM [mm]
1	-0.01	0.8	21	0	0.83
2	-0.02	2.3	22	-0.01	0.66
3	0.04	2.66	23	-0.02	2.86
4	0.28	2.76	24	0.07	3.43
5	0.26	2.33	25	0.24	4.15
6	0.1	5.3	26	-0.01	5.06
7	0.11	4.26	27	-0.02	4.43
8	0.15	2.96	28	0.03	3.43
9	0.11	2.1	29	0.02	2.5
10	0.11	1.7	30	0.04	1.66
11	0.01	0.76	31	0.03	1
12	0	1.3	32	0.2	2.13
13	-0.01	2.73	33	0.01	0.86
14	0.15	3.13	34	0.21	1.96
15	0.2	3.7	35	0.1	2.4
16	0.09	5.36	36	0.14	2.36
17	0.07	4.46	37	-0.01	
18	0.1	3.26			
19	0.13	2.46			
20	0.1	1.93			

Tabelul A1.5 Măsurători ale lăţimii sudurii care au condus la calculul lăţimii mediate LM

Sudura	Lăţimea la începutul sudurii [mm]	Lăţimea la mijlocul sudurii [mm]	Lăţimea la sfârşitul sudurii [mm]	Lăţimea medie LM [mm]	Dispersia [mm]
1	0.9	1	0.5	0.8	0.26
2	2.4	2.3	2.2	2.3	0.1
3	2.6	2.9	2.5	2.66	0.2
4	2.9	3.3	2.1	2.76	0.61
5	2.2	2.4	2.4	2.33	0.11
6	5.1	5.4	5.4	5.3	0.17
7	4.3	4.2	4.3	4.26	0.05
8	3.1	2.9	2.9	2.96	0.11
9	2.2	2.1	2	2.1	0.1
10	1.6	1.8	1.7	1.7	0.1
11	0.7	0.8	0.8	0.76	0.05
12	1.2	1.5	1.2	1.3	0.17
13	2.7	2.8	2.7	2.73	0.05
14	2.6	3.4	3.4	3.13	0.46
15	3.8	3.7	3.6	3.7	0.1
16	5.3	5.3	5.5	5.36	0.11
17	4.6	4.4	4.4	4.46	0.11
18	3.4	3.3	3.1	3.26	0.15
19	2.4	2.5	2.5	2.46	0.05
20	2	1.8	2	1.93	0.11
21	0.8	0.8	0.9	0.83	0.05
22	0.4	1	0.6	0.66	0.3
23	2.9	2.8	2.9	2.86	0.05
24	3.9	2.6	3.8	3.43	0.72
25	4.2	3.9	4.1	4.15	0.05
26	5.1	5.1	5	5.06	0.05
27	4.4	4.4	4.5	4.43	0.05
28	3.4	3.4	3.5	3.43	0.05
29	2.6	2.3	2.6	2.5	0.17
30	1.6	1.7	1.7	1.66	0.05
31	1	1.1	0.9	1	0.1
32	2.2	1.9	2.3	2.13	0.2
33	0.9	0.9	0.8	0.86	0.05
34	2.2	2	1.7	1.96	0.25
35	2.3	2.7	2.2	2.4	0.26
36	2.4	2.4	2.3	2.36	0.05

Tabelul A1.6 Măsurarea detaliată a axei X al craterului

X[mm] Dispersia medie 0.137									
sd.	Mas1	Mas2	Mas3	Media	sd.	Mas1	Mas2	Mas3	Media
1	0.55	0.5	0.6	0.55	21	1.2	1.1	1.1	1.133
2	2.105	2.105	2.105	2.105	22	0.68	0.6	0.6	0.626
3	3.068	3.409	3.181	3.219	23	3.164	3.291	3.164	3.206
4	3.289	3.289	3.157	3.245	24	5.921	5.657	5.657	5.745
5	4.609	4.609	4.539	4.585	25	6.176	5.882	5.735	5.931
6	5.937	6.25	6.093	6.093	26	5	4.861	4.722	4.861
7	4.698	4.819	4.578	4.698	27	4.558	4.264	4.558	4.46
8	4.933	5.333	5.066	5.110	28	4.054	4.054	3.918	4.008
9	4	3.647	4.117	3.921	29	4.210	4.078	4.078	4.122
10	2.972	3.603	3.513	3.362	30	3.536	3.414	3.414	3.454
11	1.160	1.339	1.160	1.219	31	1.721	1.639	1.721	1.693
12	2.417	2.087	1.978	2.160	32	6.976	6.976	6.976	6.976
13	3.3	3.4	3.3	3.333	33	1.167	1.094	1.240	1.167
14	5.342	5.479	5.068	5.296	34	6.730	7.5	6.923	7.051
15	5.813	5.813	5.697	5.774	35	3.720	3.720	3.604	3.681
16	5.8	6	5.4	5.733	36	7.021	6.808	6.808	6.879
17	4.852	5.735	5.441	5.342					
18	4.459	4.594	4.459	4.504					
19	4.090	4.090	3.977	4.052					
20	3.545	3.181	3.363	3.363					

Tabelul A1.7 Măsurarea detaliată a axei Y al craterului

Y[mm] Dispersia medie 0.121									
sd.	Mas1	Mas2	Mas3	Media	sd.	Mas1	Mas2	Mas3	Media
1	0.4	0.55	0.55	0.5	21	0.9	1	0.9	0.933
2	2.315	2.315	2.210	2.28	22	0.48	0.52	0.52	0.506
3	2.840	2.840	2.613	2.764	23	2.911	3.037	2.784	2.910
4	2.368	2.302	2.302	2.324	24	4.342	4.473	4.342	4.385
5	2.695	2.624	2.553	2.624	25	4.264	4.117	4.264	4.215
6	4.843	5	4.687	4.843	26	4.722	4.722	4.305	4.583
7	3.373	3.614	3.493	3.493	27	4.264	3.823	4.117	4.068
8	3.333	4	3.333	3.555	28	3.378	3.378	3.378	3.378
9	2.823	2.941	2.823	2.862	29	3.552	3.289	3.421	3.420
10	2.522	2.702	2.522	2.582	30	2.926	2.926	2.926	2.926
11	0.982	1.339	1.25	1.190	31	1.557	1.639	1.557	1.584
12	1.648	2.197	1.868	1.904	32	5.116	5.116	4.883	5.038
13	3	3	3	3	33	1.094	1.167	1.240	1.167
14	3.835	3.972	3.698	3.835	34	4.807	5.769	5	5.192
15	3.488	3.720	3.604	3.604	35	2.674	2.790	2.674	2.712
16	5.4	5.6	5.4	5.466	36	4.680	5.106	4.893	4.893
17	4.558	4.411	4.411	4.46					
18	3.513	3.378	3.513	3.468					
19	3.181	3.068	3.295	3.181					
20	2.727	2.727	2.636	2.696					

Tabelul A1.8 Măsurarea detaliată a alungirii b a craterului

b[mm] Disp medie 0.1									
sd.	Mas1	Mas2	Mas3	Media	sd.	Mas1	Mas2	Mas3	Media
1	0.25	0.15	0.25	0.216	21	0.7	0.7	0.6	0.666
2	1.263	1.263	1.263	1.263	22	0.4	0.4	0.32	0.373
3	2.045	1.931	1.931	1.969	23	1.898	1.772	1.772	1.814
4	2.302	2.302	2.171	2.258	24	3.421	3.421	3.289	3.377
5	3.475	3.546	3.404	3.475	25	4.264	3.676	3.823	3.921
6	3.281	3.437	3.281	3.333	26	2.5	2.222	2.5	2.407
7	2.771	2.771	2.891	2.811	27	2.5	2.352	2.352	2.401
8	3.2	3.333	3.2	3.244	28	2.162	2.027	2.027	2.072
9	2.470	2.823	2.588	2.627	29	2.5	2.368	2.368	2.412
10	1.711	1.801	1.801	1.771	30	1.951	1.829	1.829	1.869
11	0.446	0.625	0.535	0.535	31	0.901	0.901	0.901	0.901
12	0.989	0.989	0.879	0.952	32	4.418	4.651	4.418	4.495
13	1.8	2	1.8	1.866	33	0.656	0.583	0.583	0.607
14	3.013	3.698	3.013	3.241	34	4.423	4.807	4.423	4.551
15	3.720	3.372	3.720	3.604	35	2.209	2.093	2.093	2.131
16	3	3	3	3	36	4.042	3.617	3.829	3.829
17	2.941	2.941	2.794	2.892					
18	2.297	2.297	2.432	2.342					
19	2.386	2.272	2.272	2.31					
20	2	1.818	1.909	1.909					

A 1.3 Mărimi calculate care caracterizează sudurile**Tabel A1.9 Mărimi calculate care caracterizează procesul de sudare**

Sudura	Timpul X/v t[ms]	K [%]	Sudura	Timpul X/v t[ms]	K [%]
1	55	1	21	113.3	1
2	210.5	37	22	62.6	13
3	321.9	37	23	320.6	18
4	324.5	67	24	574.5	49
5	458.5	56	25	593.1	69
6	2437.2	42	26	1944.4	30
7	939.6	47	27	892	32
8	511	65	28	400.8	28
9	261.4	58	29	274.8	21
10	134.4	58	30	138.1	23
11	121.9	1	31	67.7	9
12	216	3	32	279	62
13	333.3	25	33	46.6	9
14	529.6	67	34	282	39
15	577.4	62	35	220.8	47
16	2293.2	42	36	412.7	78
17	1068.4	51	37		15
18	450.4	56			
19	270.1	43			
20	134.5	58			

Anexa 2

Prelucrări statistice ale datelor experimentale

A 2.1 Tabele ANOVA după analiza A1

Tabelul A2.1 Tabel ANOVA pentru lățimea sudurii LS

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	6.845	1	6.845	159.19	0.00
B(speed)	3.645	1	3.645	84.77	0.01
C(defocusing)	0.125	1	0.125	2.91	0.23
AB	0.245	1	0.245	5.70	0.13
AC	1.125	1	1.125	26.16	0.03
BC	0.125	1	0.125	2.91	0.23
ABC	0.125	1	0.125	2.91	0.23
Total error	0.086	2	0.043		
Total (corr)	12.321	9			
$R^2 = 0.99 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.96$					

Tabelul A2.2 Tabel ANOVA pentru: h profunzimea h

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	29.452	1	29.452	171.08	0.00
B(speed)	1.304	1	1.304	7.58	0.11
C(defocusing)	0.973	1	0.973	5.65	0.14
AB	0.332	1	0.332	1.93	0.29
AC	0.190	1	0.190	0.11	0.77
BC	0.046	1	0.046	0.27	0.65
ABC	0.248	1	0.248	1.44	0.35
Total error	0.344	2	0.172		
Total (corr)	32.72	9			
$R^2 = 0.98 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.95$					

Tabelul A2.3 Tabel ANOVA pentru: Raportul F (LS/h)

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	8.967	1	8.967	15.28	0.05
B(speed)	0.035	1	0.035	0.06	0.83
C(defocusing)	0.137	1	0.137	0.23	0.68
AB	0.078	1	0.078	0.13	0.75
AC	0.009	1	0.009	0.02	0.91
BC	0.762	1	0.762	1.30	0.37
ABC	0.851	1	0.851	1.45	0.35
Total error	1.173	2	0.586		
Total (corr)	12.015	9			
$R^2 = 0.90 \quad R^2(\text{adj. for d. f.}) = 0.56$					

Tabelul A2.4 Tabel ANOVA pentru aria topită AT

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	65.551	1	65.551	55.08	0.01
B(speed)	25.561	1	25.561	21.48	0.04
C(defocusing)	0.661	1	0.661	0.55	0.54
AB	14.311	1	14.311	12.02	0.07
AC	0.211	1	0.211	0.18	0.71
BC	0.061	1	0.061	0.05	0.84
ABC	2.311	1	2.311	1.94	0.29
Total error	2.380	2	1.190		
Total (corr)	111.049	9			
$R^2 = 0.97$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.90$		

A2.2 Tabele ANOVA după analiza A2**Tabelul A2.5 Tabel ANOVA pentru: latimea sudurii LS**

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	6.845	1	6.845	24.07	0.002
B(speed)	3.645	1	3.645	12.82	0.011
C(defocusing)	0.125	1	0.125	0.44	0.538
Total error	1.706	6	0.284		
Total (corr)	12.321	9			
$R^2 = 0.86$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.79$		

Tabelul A2.6 Tabel ANOVA pentru: profunzimea h

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	29.452	1	29.452	178.42	0.00
B(speed)	1.304	1	1.304	7.90	0.03
C(defocusing)	0.973	1	0.973	5.89	0.05
Total error	0.990	6	0.165		
Total (corr)	32.72	9			
$R^2 = 0.96$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.95$		

Tabelul A2.7 Tabel ANOVA pentru: raportul F (LS/h)

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	8.967	1	8.967	18.71	0.005
B(speed)	0.035	1	0.035	0.07	0.798
C(defocusing)	0.137	1	0.137	0.29	0.616
Total error	2.875	6	0.479		
Total (corr)	12.015	9			
$R^2 = 0.76$			$R^2 (adj. for d. f.) = 0.64$		

Tabelul A2.8 Tabel ANOVA pentru: aria secțiunii topite AT

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	65.551	1	65.551	20.4	0.004
B(speed)	25.561	1	25.561	7.96	0.03
C(defocusing)	0.661	1	0.661	0.21	0.67
Total error	19.275	6	3.212		
Total (corr)	111.049	9			
$R^2 = 0.82$			$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.73$		

A2.3 Tabele ANOVA după analiza B1**Tabelul A2.9 Tabel ANOVA pentru lățimea sudurii LS**

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	1.21	1	1.21	132	0.00
B(speed)	1.21	1	1.21	132	0.00
AB	0.01	1	0.01	1.09	0.40
Total error	0.018	2	0.09		
Total (corr)	2.448	5			
$R^2 = 0.992$			$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.981$		

Tabelul A2.10 Tabel ANOVA pentru profunzimea h

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	15.484	1	15.484	1161.68	0.00
B(speed)	0.429	1	0.429	32.19	0.02
AB	0.003	1	0.003	0.23	0.68
Total error	0.026	2	0.013		
Total (corr)	15.942	5			
$R^2 = 0.998$			$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.995$		

Tabelul A2.11 Tabel ANOVA pentru raportul F

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	4.202	1	4.202	11.85	0.07
B(speed)	0.562	1	0.562	1.59	0.33
AB	0.722	1	0.722	2.04	0.28
Total error	0.709	2	0.354		
Total (corr)	6.196	5			
$R^2 = 0.88$			$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.71$		

Tabelul A2.12 Tabel ANOVA pentru aria topită AT

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	29.160	1	29.160	28.40	0.03
B(speed)	11.560	1	11.560	11.26	0.07
AB	2.560	1	2.560	2.49	0.25
Total error	2.053	2	1.026		
Total (corr)	45.333	5			
$R^2 = 0.95$			$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.88$		

A2.4 Tabele ANOVA după analiza B2**Tabelul A2.13 Tabel ANOVA pentru lățimea sudurii LS**

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	1.21	1	1.21	128.12	0.00
B(speed)	1.21	1	1.21	128.12	0.00
Total error	0.028	3	0.009		
Total (corr)	2.448	5			
$R^2 = 0.988$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.980$		

Tabelul A2.14 Tabel ANOVA pentru profunzimea h

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	15.484	1	15.484	1564.94	0.00
B(speed)	0.429	1	0.429	43.36	0.00
Total error	0.029	3	0.009		
Total (corr)	15.942	5			
$R^2 = 0.998$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.996$		

Tabelul A2.15 Tabel ANOVA pentru raportul F (LS/h)

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	4.202	1	4.202	8.81	0.05
B(speed)	0.562	1	0.562	1.18	0.35
Total error	1.431	3	0.477		
Total (corr)	6.196	5			
$R^2 = 0.768$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.614$		

Tabelul A2.16 Tabel ANOVA pentru aria topită AT

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	25.180	1	25.180	16.45	0.03
B(speed)	11.560	1	11.560	7.55	0.04
Total error	4.61	3	1.53		
Total (corr)	45.333	5			
$R^2 = 0.89$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.83$		

A2.5 Tabele ANOVA după analiza C1**Tabelul A2.17 Tabel ANOVA pentru lățimea sudurii LS**

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	6.76	1	6.76	80.32	0.01
B(speed)	2.56	1	2.56	30.42	0.03
AB	0.36	1	0.36	4.28	0.17
Total error	0.168	2	0.84		
Total (corr)	9.848	5			
$R^2 = 0.98$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.95$		

Tabelul A2.18 Tabel ANOVA pentru profunzimea h

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	13.987	1	13.987	31.96	0.02
B(speed)	0.921	1	0.921	2.11	0.28
AB	0.577	1	0.577	1.32	0.36
Total error	0.875	2	0.437		
Total (corr)	16.362	5			
$R^2 = 0.94$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.86$		

Tabelul A 2.19 Tabel ANOVA pentru raportul F (LS/h)

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	4.774	1	4.774	7.32	0.11
B(speed)	0.235	1	0.235	0.36	0.61
AB	0.207	1	0.207	0.32	0.63
Total error	1.305	2	0.652		
Total (corr)	6.521	5			
$R^2 = 0.79$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.49$		

Tabelul A2.20 Tabel ANOVA pentru aria topită AT

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	36.602	1	36.602	26.14	0.01
B(speed)	14.062	1	14.062	10.04	0.04
AB	14.062	1	14.062	10.04	0.04
Total error	2.80	2	1.4		
Total (corr)	67.528	5			
$R^2 = 0.95$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.89$		

A2.6 Tabele ANOVA după analiza C2**Tabelul A2.21 Tabel ANOVA pentru lățimea sudurii LS**

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	6.76	1	6.76	38.38	0.00
B(speed)	2.56	1	2.56	14.54	0.03
Total error	0.528	3	0.176		
Total (corr)	9.848	5			
$R^2 = 0.94$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.91$		

Tabelul A2.22 Tabel ANOVA pentru profunzimea h

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	13.987	1	13.987	28.88	0.01
B(speed)	0.921	1	0.921	1.90	0.26
Total error	1.452	3	0.484		
Total (corr)	16.362	5			
$R^2 = 0.91$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.85$		

Tabelul A2.23 Tabel ANOVA pentru raportul F

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	4.774	1	4.774	9.47	0.5
B(speed)	0.235	1	0.235	0.47	0.55
Total error	1.512	3	0.504		
Total (corr)	6.521	5			
$R^2 = 0.76$			$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.61$		

Tabelul A2.24 Tabel ANOVA pentru aria topită AT

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(power)	36.602	1	36.602	6.51	0.08
B(speed)	14.062	1	14.062	2.50	0.21
Total error	16.863	3	5.621		
Total (corr)	67.528	5			
$R^2 = 0.75$			$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.58$		

Referințe

1. [Abderrazak ,2008] – Kamel Abderrazak, Wacef Ben Salem, Hatem Mhiri Georges Lepalec, Michel Autric Modelling of CO2 laser welding of magnesium alloys Optics & Laser Technology 40 (2008) 581–588
2. [Akman, 2009] – E. Akman, A. Demir, T. Canel, T. Sinmazcelik Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys journal of materials processing technology 209 (2009) 3705–3713
3. [Amara, 2002] – E.H. Amara , A. Bendib, Modelling of vapour flow in deep penetration laser welding ,J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) 272–280.
4. [Amara, 2004] – El-Hachemi Amara, Remy Fabbro, Louisa Achab, Farida Hamadi, Nawal Mebani Modeling of Fictions on keyhole walls during vapor flow în laser welding ICALEO 2004
5. [Anawa,2008] – E.M. Anawa, A.G. Olabi Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components Optics & Laser Technology 40 (2008) 379–388
6. [Ancona, 2005] – A. Ancona, T. Sibillano , L. Tricarico , R. Spina , P.M. Lugara,G. Basile, S. Schiavone Comparison of two different nozzles for laser beam welding of AA5083 aluminium alloy Journal of Materials Processing Technology xxx (2005) xxx–xxx
7. [Ancona, 2007] – A. Ancona, P.M. Lugara, D. Sorgente , L. Tricarico Mechanical characterization of CO2 laser beam butt welds of AA5083 Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 381–384
8. [Batahgy, 1997] – Abdel-Monem El-Batahgy Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels Materials Letters 32 (1997) 155-163
- 9.[Bayraktar, 2005] – Emin Bayraktar , Dominique Kaplan Parametric approach model for determining welding conditions: New type of welding limit diagrams (WLD) Journal of Materials Processing Technology 170 (2005) 477–486
10. [Benyounis, 2005] – K.Y. Benyounis , A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi Optimizing the laser-welded butt joints of medium carbon steel using RSM Journal of Materials Processing Technology 164–165 (2005) 986–989
11. [Benyounis, 2008] – K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, M.S.J. Hashmi Multi-response optimization of CO2 laser-welding process of austenitic stainless steel Optics & Laser Technology 40 (2008) 76–87
12. [Berretta, 2007] – Jose Roberto Berretta, Wagner de Rossi, Mauricio David Martins das Neves,Ivan Alves de Almeida, Nilson Dias Vieira Junior Pulsed N:YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels Optics and Lasers in Engineering 45 (2007) 960–966
13. [Binda, 2004] – B. Binda, E. Capello, B. Previtali A semi-empirical model of the temperature field in the AISI 304 laser welding Journal of Materials Processing Technology 155–156 (2004) 1235–1241
14. [Boboescu 2006 a] - Boboescu Remus, Adelina Han Transfert de chaleur dans processus de soudage laser en regime capillaire Scientific Buletin of the Polithenica University of Timisoara, Transactions on Mechanics Tom.51 (65) fasc.2, 2006, p59-64.
15. [Boboescu 2007 a] - Remus Boboescu , Corina Stoican Thermal model for phase transformation in keyhole laser welding no 4/2007 p:6-11 ISSN 1454-3087
16. [Boboescu 2007 b] - Remus Boboescu Keyhole Phenomenon in Laser Welding-general presentation , Proceedings of International Conference on Material Science

- and Engineering Bramat 2007, section Welding engineering , University Transilvania Brasov Romania p: 188-194, ISBN 978-973-8415-56-0
17. [Boboescu 2008 a] - Remus Boboescu, Ion Sporea, Investigații experimentale asupra suprafețelor iradiate cu laser Lucrările sesiunii științifice cu participare internațională „Cercetare științifică și educație în forțele aeriene” Academia forțelor Aeriene” Henri Coandă” Brașov 2008
18. [Boboescu 2008 b] - Remus Boboescu, Valentin Glod Characteristics of irradiation parameters for industrial lasers used in welding Proceedings of the 14th internațional conference Land forces academy „ Nicolae Bălcescu” november 2008 Sibiu p:158-164 , ISSN 1843-6722
19. [Boboescu 2009 a] - Remus Boboescu, Valentin Glod „Analyze of welding process on high elasticity steel plates” Volumul conferinței AFASES 2009 (A XI conferință internațională cu tema “Cercetare științifică și educație în forțele aeriene”) , Academia forțelor aeriene “ Henri Coandă” Brașov p:977-983 I.S.B.N. 978-973-8415-67-6
20. [Boboescu 2009 b] - R. Boboescu Experimental modeling of the laser welding of carbon steel type Dillimax 500 EN 10137 Lucrările celei de A 3-a conferință internațională Tehnologii inovative pentru îmbinarea materialelor avansate ISIM Timișoara 2009
21. [Boboescu 2009 c] - Remus Boboescu , Ion Sporea Metode de modelare analitică a mișcării topiturii în baia de sudare Proceedings of 2nd Symposium with international participation Durability and Fiability of Mechanical Systems „Constantin Brâncuși” University of Târgu-Jiu Târgu-Jiu,22-23 may 2009 p:115-120
22. [Boboescu 2009 d] - Remus Boboescu ,Victor Bujor, Evoluția în timp a keyhole în baia de sudare în procesul de sudare laser Proceedings of 2nd Symposium with international participation Târgu-Jiu,22-23 may 2009 p:121-126 Editura Academica Brâncuși ISBN 978-973-144-271-6
23. [Boboescu 2009 e] - Remus Boboescu Victor Bujor , Studiu asupra fenomenelor fizice legate de topirea și vaporizarea metalelor în procesul de sudare laser Proceedings of 2nd Symposium with international participation Târgu-Jiu,22-23 may 2009 p:133-138 Editura Academica Brâncuși ISBN 978-973-144-271-6
24. [Boboescu 2009 f] - Remus Boboescu , Valentin Glod , Experimental modeling of the laser welding for carbon steel used in welded construction Proceedings of the 21st International Conference NAV-MAR-EDU 2009 Editura Academiei Navale „Mircea cel Bătrân” Constanța ISSN 1843-6749 p:284-293
25. [Boboescu 2009 g] - Remus Boboescu and Valentin Glod Forms problems with heat for heating material laser Proceedings of the 15th International Conference The Knowledge-Based Organization Nicolae Bălcescu Land forces academy Sibiu 2009 Vol.6p:45-49 ISSN 1843 - 6722
26. [Boboescu 2009 h] - Remus Boboescu and Valentin Glod Heating Problems related forms of phase transformation produced by laser materials Irradiation Proceedings of the 15th International Conference The Knowledge-Based Organization Nicolae Bălcescu Land forces academy Sibiu 2009 Vol.6 p:50-54 ISSN 1843 - 6722
27. [Boboescu 2009 i] - R. Boboescu , C. Dorohoi Analysis of porosity formation and X-ray control for laser welding of steels Proceedings of International Conference “Structural integrity of welded structures” ISIM 2009 Timisoara, Editura Sudura Timisoara ISSN 1842-5518
28. [Boboescu 2009 j] - Remus Boboescu, Ion Sporea, Ramona Laslău Anlalysis Method for Surfaces and Sections for Laser Welds Revista de tehnologii

- neconvenționale nr.1 /2009 p:36-41 ISSN-1454-3087
29. [Boboescu 2009 k] - Remus Boboescu, Ion Sporea, Ramona Laslău Changing the Material Structure in laser welding of steel Revista de tehnologii neconvenționale nr.2/2009 p:16-21 ISSN-1454-3087
30. [Boboescu 2010 a]- Remus Boboescu Study on solid waves that appears to laser welds surfaces Lucrările conferinței AFASES 2010 (A 12-a conferință internațională cu tema "Cercetare științifică și educație în forțele aeriene") , Academia forțelor aeriene " Henri Coandă" Brașov
31. [Boboescu 2010 b]- Remus Boboescu Main aspects of the laser welding process Lucrările conferinței AFASES 2010 (A 12-a conferință internațională cu tema "Cercetare științifică și educație în forțele aeriene") , Academia forțelor aeriene " Henri Coandă" Brașov
32. [Boboescu 2010 c]- Remus Boboescu, Ion Sporea Caracteristici ale sudurilor realizate cu fascicol laser pentru oțeluri Lucrările celui de al 3-Simpozion "Durability and Reliability of Mechanical Systems"Universitatea Constantin Brâncuși Târgu-Jiu, Romania, mai 2010
33. [Boboescu 2010 d]- Remus Boboescu, Ion Sporea Regimuri de sudare pentru sudarea laser Lucrările celui de al 3-Simpozion "Durability and Reliability of Mechanical Systems"Universitatea Constantin Brâncuși Târgu-Jiu, Romania, mai 2010
34. [Boboescu 2010 e]- R. Boboescu Characteristics of laser welds made on the carbon steel plates Lucrările celei de A 4-a conferință internațională Tehnologii inovative pentru îmbinarea materialelor avansate ISIM Timișoara iunie 2010
35. [Borrisutthekul, 2005] – Rattana Borrisutthekul, Yukio Miyashita, Yoshiharu Mutoh Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O Science and Technology of Advanced Materials xx (2005) 1–6
36. [Bruggemann, 2000] – G. Bruggemanna, A. Mahrle, Th. Benziger Comparison of experimental determined and numerical simulated temperature fields for quality assurance at laser beam welding of steels and aluminium alloyings NDT&E International 33 (2000) 453–463
- 36.1 [Bujor 2009 a] - Victor Bujor Remus Boboescu , Direcții și perspective pentru modelarea termică în sudarea laser Proceedings of 2nd Symposium with international participation Târgu-Jiu,22-23 may 2009 p:127-132 Editura Academica Brâncuși ISBN 978-973-144-271-6
37. [Bujor 2009 b] - Victor Bujor , Remus Boboescu, Formularea problemelor de modelare în sudarea laser Proceedings of 2nd Symposium with international participation Târgu-Jiu,22-23 may 2009 p:139-144 Editura Academica Brâncuși ISBN 978-973-144-271-6
38. [Cantello, 1996] – PA. Cantello , G. Ricciardi ,S. L. Gobbi Laser Welding of Superalloys for the Manufacturing of Aeroengine Components Annals of the CIRP Vol. 45/ 1/1996
- 39.[Carmignani, 1999] – C. Carmignani , R. Mares b, G. Toselli Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a single pass butt-welded thick steel plate Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 179 (1999) 197±214
- 40.[Chang, 2002] – W.S. Chang, S. J. Na , A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equations and thermal distortion of a small structure in micro-joining. Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 208-214
41. [Charschan, 1993] – Sidney S. Charschan, (Editor) Guide to Laser Materials Processing, Laser Institute of America 1993

42. [Chen, 2003] – Xi Chen , Hai-Xing Wang, Prediction of the laser-induced plasma characteristics in laser welding: a new modelling approach including a simplified keyhole model, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 (2003) 1634–1643.
43. [Cho, 2002] – M. H. Cho, D.F. Farson, J. I. Kim Laser Weld Chaos Control for Defect Reduction ICALEO 2002
44. [Chryssoluris, 1991] – George Chryssoluris Laser Machining Theory and Practice Springer-Verlag 1991
45. [Cicală, 1999] – Eugen Florin Cicală Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale Editura Politehnica Timișoara 1999
- 46.[Cicală 2005 a] – Eugen Florin Cicală Metoda experimentelor factoriale Editura Politehnica Timișoara 2005
47. [Cicală 2005 b]-E. Cicală, G. Duffet, H. Andrzejewski, D. Grevey, S. Ignat Hot cracking in Al–Mg–Si alloy laser welding – operating parameters and their effects *Materials Science and Engineering A*, Volume 395, Issues 1-2, 25 March 2005, Pages 1-9
48. [Cicală 2005 c] E. Cicală, A. Soveja, P. Sallamand, D. Grevey, J.M. Jouvard The application of the random balance method in laser machining of metals *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 196, Issues 1-3, 21 January 2008, Pages 393-401
- 49.[columbia.edu]<http://www.columbia.edu/cu/mechanical/mrl/ntm/Chapter1.html>
50. [Costa, 2003] – Alexandra P. Costa, Luisa Quintino, Martin Greitmann Laser beam welding hard metals to steel *Journal of Materials Processing Technology* 141 (2003) 163–173
51. [Coste, 2002] – Frédéric Coste, Lilian Sabatier, Olivier Dubet, Philippe Aubert, Lawrence Jones 20 mm thickness N:Yag Laser Welding of 316 L stainless steel with long focal length ICALEO 2002
52. [Courant, 2001] – B. Courant, J-J. Hantzpergue, S. Benayoun, J-P. L’Huillier, Melting and solidification processes in a moving graphite-covered titanium surface subjected to multi-pulse laser irradiation, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 (2001) 1437–1446
53. [CTIM, 1992] – Le soudage laser de faibles et moyennes epaisseurs, Centre Technique des Industries Mecaniques ,1992 ISBN 2-85400-229-2
54. [Dausinger, 2002] – Friedrich Dausinger, Peter Berger, Helmut Hügel Laser Welding of Aluminum Alloys:Problems, Approaches for Improvement and Applications ICALEO 2002
55. [De, 2004] – T. De , T. DebRoy , Probing unknown welding parameters from convective heat transfer calculation and multivariable optimization, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37 (2004) 140–150.
56. [Dillinger, 2003] -Dillinger Huete Fișa tehnică a oțelului Dillimax 500, 2003
57. [Donati, 2004] – L. Donati, L. Tomesani The prediction of seam welds quality in aluminum extrusion *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (2004) 366–373
58. [Dowden, 1996] – John Dowden, Phiroze Kapadia The penetration depth in keyhole welding with pseudo-continuous N-YAG and CO lasers investigated mathematically *Applied Surface Science* 106 (1996) 235-239
59. [Drăgănescu, 1986] – V. Drăgănescu ,V. G. Velculescu Prelucrări termice cu laseri Editura Academiei Republicii Socialiste România București 1986
60. [Du, 1999] – J. Du, J. Longobardi, W.P.Latham and A. Kar ,Weld strenght and process controllanbility for laser welding of thin sheet metals, ICALEO 1999
61. [Du, 2004] – Hanbin Du , Lunji Hu, Jianhua Liu, Xiyuan Hu A study on the metal flow in full penetration laser beam welding for titanium alloy Computational

- Materials Science 29 (2004) 419–427
62. [Dumitraș, 2004] – Dan C. Dumitraș, *Ingineria fasciculelor laser* Editura Bic All București 2004
63. [Dumord, 1998] – Eveline Dumord *Modélisation du soudage continu par faisceau de haute énergie : application au cas du soudage par laser N : YAG d'un acier X5 Cr.Ni 18-10* Université de Bourgogne France 1998
64. [Durr, 2004] – Ulrich Durr, Ronald Holtz, Mathias Jokiel, Rene Liebers, Dave Lavoie *Advanced micro-welding strategies with pulsed N:YAG lasers*, ICALEO 2004
65. [Elsen, 2007] – M. Van Elsen, M. Baelmans, P. Mercelis, J.-P. Kruth *Solutions for modelling moving heat sources in a semi-infinite medium and applications to laser material processing* International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) 4872–4882
66. [Fabbro, 1999] – R. Fabbro, K. Chouf *Keyhole description for deep penetration laser welding* Icaleo 1999
67. [Fabbro, 2002] – Rémy Fabbro *Basic Processes in Deep Penetration Laser Welding* ICALEO 2002
68. [Fabbro, 2004] – Rémy Fabbro, Sonia Slimani, Frédéric Coste, Francis Briand *Study of keyhole behavior for full penetration N-YAG CW laser welding* Proceedings of the 23rd International Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004
69. [Forsman, 1999] – Forsman T, Lampa C, Powell J, Magnuson M, *Predictions of the Cross-Sectional Geometry of N : YAG Laser Welds in Aluminium Alloys*, ICALEO 1999
70. [Fuerschbach, 2002] – P.W. Fuerschbach, J.T. Norris *Beam Characterization for N:YAG Spot Welding Lasers* ICALEO 2002
71. [Fuhrich, 1999] – T. Fuhrich, P. Berger, H. Hugel, *Maragony Effect in Deep Penetration Laser Welding of Steel*, ICALEO 1999
72. [Fujinaga, 1999] – S. Fujinaga, T. Narikiyo, H. Takenaka, S. Katayama, A Matsunawa, *Keyhole behavior during All Position Welding with High Power N : YAG Laser* ICALEO 1999
73. [Girard, 1999] – Karen Girard, *Etude de la creation de defauts volumiques generes pendant la solidification de soudures realisees par faisceau laser N :YAG impulsif application au soudage du tantale*, These de doctorat, Université de Bourgogne et UFR sciences et techniques Soutenue le Décembre 1999.
74. [Girard, 2000] – K. Girard, J. M. Jouvard, Ph. Naudy, *Study of voluminal defects observed in laser spot welding of tantalum*, J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 2815–2824.
75. [Gref, 2004] – Wolfgang Gref, Bernd Hohenberger, Friedrich Dausinger and Helmut Hugel *Energy Coupling and Process Efficiency in Double-Focus Welding with N:YAG* ICALEO 2004
76. [Gref, 2002] – Wolfgang Gref, Bernd Hohenberger, Friedrich Dausinger and Helmut Hugel *Energy Coupling and Process Efficiency in Double-Focus Welding with N:YAG* ICALEO 2002
77. [Greses, 2002] – J. Greses, P.A. Hilton, C.Y. Barlow, W.M. Steen *Plume Attenuation under High Power N:YAG Laser Welding* ICALEO 2002
78. [Grevey, 2005] Dominique Grevey, Pierre Sallamand, Eugen Cicala, Sorin Ignat *Gas protection optimization during N:YAG laser welding* Optics & Laser Technology 37 (2005) 647–651
79. [Gualini, 2001] – M. M. S. Gualini *Laser Welding of Zinc Coated Steel Sheets. An Old Problem with a Possible Solution* ICALEO 2001
80. [Ha, 2005] – Eung-Ji Ha, Woo-Seung Kim *A study of low-power density laser*

- welding process with evolution of free surface International Journal of Heat and Fluid Flow 26 (2005) 613–621
81. [Haboudou, 2003] – A. Haboudou, P. Peyre, A.B. Vannes, G. Peix Reduction of porosity content generated during N:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys Materials Science and Engineering A363 (2003) 40–52
82. [Hahn, 1968] – Gerald J.Hahn, Samuel S. Shapiro Statistical Models in Engineering Wiley& Sons 1968
83. [Haidemenopoulos, 2001] – G.N. Haidemenopoulos Coupled thermodynamic/kinetic analysis of diffusional transformations during laser hardening and laser welding Journal of Alloys and Compounds 320 (2001) 302–307
84. [Hall, 2002] – Aaron Hall, Allen Roach, Gerald Knorovsky Validating Predictions of Keyholing Phenomenon in Laser Weld Models ICALEO 2002
85. [Han, 2001] – W.J.Han, J.G.Byeon, K.S. Park Welding characteristics of the Inconel plate using a pulsed N:YAG laser beam Journal of Materials Processing Technology 113(2001)234-236
86. [He, 2003] – X. He, T. DebRoy, P. W. Fuerschbach, Alloying element vaporization during laser spot welding of stainless steel, J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 3079–3088.
87. [He,2003 b] – X. He, P W Fuerschbach, T. DebRoy, Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel, J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 1388–1398.
88. [Hilton, 2005] – Paul Hilton TWI Knowledge Summary N:YAG laser welding.Private communication 2005
89. [Ho, 2004] – Ho ,Wen, Distribution of intensity absorbed by the keyhole wall in laser processing ICALEO 2004
90. [Hoffman, 2004] – Jacek Hoffman , Zygmunt Szymanski , Time-dependent spectroscopy of plasma plume under laser welding conditions, J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (2004) 1792–1799
91. [Honda, 2004] – Hiroshi Honda, Susumu Tsukamoto, Isao Kawaguchi, Goro Arakane Monitoring of keyhole behavior in deep penetration laser welding Proceedings of the 23rd International Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004
92. [Huntington, 1983] – C.A. Huntington and T.W. Eagar Laser Welding of Aluminum and Aluminum Alloys Welding Research N 1983 p:105-107
93. [Inoue, 1999] – Inoue, Miamoto, Ono, Adachi, Matsumoto ,In process monitoring of penetration depth in 20 class CO₂ laser welding of thick sections, ICALEO 1999
94. [Ion, 2005] – John C. Ion Laser Processing of Engineering Materials Principles, Procedure and Industrial Application Copyright © 2005 Elsevier Ltd. ISBN: 978-0-7506-6079-2
95. [Jannot, 2003] – Yves Jannot Transferts Thermiques Cours 2003
96. [Jenkins, 1981] – Francis A. Jenkins, Harvey E. White ,Fundamentals of Optics McGraW-Hill 1981
97. [Jianga, 2005] – Hongjun Jianga, Paul Woodardc ,Methodology of generic modeling as applied to energy coupling of CO₂ laser material interaction, Optics and Lasers in Engineering 43 (2005) 19–31
98. [Jin, 2002] – Xiangzhong Jin, Lijun Li, Yi Zhang , A study on fresnel absorption and reflections in the keyhole in deep penetration laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) 2304–2310.
99. [Jin, 2008] – Xiangzhong Jin A three-dimensional model of multiple reflections for high-speed deep penetration laser welding numerical simulation of an actual keyhole Optics

- and Lasers in Engineering 46 (2008) 83–93
100. [Jin 2003] – Xiang Zhong Jin, Li Jun Li A conduction model for deep penetration laser welding numerical and actual keyhole Optics & Laser Technology 35 (2003) 5 – 12
101. [Jin 2004] – Xiangzhong Jin, Lijun Li An experimental study on the keyhole shapes in laser deep penetration welding Optics and Lasers in Engineering 41 (2004) 779–790
102. [Jouvard, 2000] – J.M. Jouvard Etude de l'interaction laser-matière lors des processus de soudage par laser N : YAG Présenté le 20 Décembre 2000 à l'IUT du Creusot
103. [Jouvard, 2001] – J. M. Jouvard, K Girard , O. Perret, Keyhole formation and power deposition in N:YAG laser spot welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001) 2894–2901.
104. [Kapat 1998] - J.S. Kapat ,Z. Wei ,Ashok Kumar , Role of kinetics in laser processing ,Applied Surface Science 127-128 (1998) 212-217.
- [Kaplan, 2002] – Alexander F. H. Kaplan, Masami Mizutani , Seiji Katayama, Akira Matsunawa , Keyhole Laser Spot Welding. ICALEO 2002
105. [Kaplan, 2002 b] – Alexander F. H. Kaplan, Masami Mizutani, Seiji Katayama, Akira Matsunawa, Unbounded keyhole collapse and bubble formation during pulsed laser interaction, with liquid zinc, J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) 1218–1228
106. [Katayama, 2002] – Katayama Seiji, Yoshida Daisuke, Yokoya Shinichiro and Matsunawa Akira Development of Tornado Nozzle for Reduction in Porosity during Laser Welding of Aluminum Alloy ICALEO 2002
107. [Kido, 2004] – Motoi Kido, Atsushi Sugihashi, Hiroyuki Yamamoto, Katsuhiko Maeda, Naoya Hamada, Toshio Kikuma, Katsuhiko Minamida Development of 45-kW Laser Welding System for Continuous Finish Rolling Nippon steel technical report No. 89 January 2004
108. [Kim, 2007] – Kim, C., Kim, J., Lim, H., Kim, J., Investigation of laser remote welding using disc laser, Journal of Materials Processing Technology (2007),
109. [Kim, 2008] – Cheolhee Kim, Junghak Kim, Hyunsik Lim, Jeonghan Kim Investigation of laser remote welding using disc laser journal of materials processing technology 201 (2008) 521–525
110. [Kluger, 2002] – Tom Kluger and Mohammed Naeem Material Processing With Super- Modulation ICALEO 2002
111. [Knorovsky, 1999] – G. A. Knorovsky, M.P. Kanouff, D.O. MacCalum, P.W. Fuerschbach, Analysis and Validation of laser Spot Weld –Induced Distortion, ICALEO 1999.
112. [Lacroix, 2000] – Teză de doctorat Université de Bourgogne 2000
113. [Lallemand, 2000] G. Lallemand, G. Jacrot, E. Cicala, D. F. Grevey Grooving by Nd:YAG laser treatment Journal of Materials Processing Technology, Volume 99, Issues 1-3, 1 March 2000, Pages 32-37
114. [Lampa, 1997] – Conny Lampa, Alexander F. H. Kaplan, John Powell, Claes Magnusson, An analytical thermodynamic model of laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997) 1293–1299
115. [Lancaster, 1980] – J.F. Lancaster The Physics of welding Second Edition Pergamon Press 1980
116. [Lange, 2004] – D.F. de Lange, A. Schoonderbeek, J. Meijer Melt ejection during laser drilling , ICALEO 2004
117. [Lee, 2002] – Jae Y. Lee, Sung H. K., Dave F. Farson, Choong D. Yoo, Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding, J. Phys.

- D: Appl. Phys. 35 (2002) 1570–1576.
118. [Leong] – K.H. Leong, G. Kornecki, P.G. Sanders, and J.S. Keske Laser Beam Welding of AZ31B-H24 Magnesium Alloy
119. [Leong, 2002] – K.H. Leong, G. Kornecki, P.G. Sanders, and J.S. Keske Laser Beam Welding of AZ31B-H24 Magnesium Alloy
120. [Leong, 1998] – K.H.. Leong and H. K. Geyer ,Laser Beam Welding of Any Metal, ICALEO 1998
121. [Leong, 1999] – Leong, K. H., Sabo, K. R. and Albright, C. E. Laser beam welding of 5182 aluminum alloy sheet J. Laser Applications, 11: (3) 109-118 Jun. 1999.
122. [Liu, 2007] – Xiu-Bo Liu, Ming Pang, Zhen-Guo Zhang, Wei-Jian Ning, Cai-Yun Zheng, Gang Yu Characteristics of deep penetration laser welding of dissimilar metal Ni-based cast superalloy K418 and alloy steel 42CrMo, Optics and Lasers in Engineering 45 (2007) 929–934
123. [Liu, 2008] – Xiu-Bo Liu , Gang Yu , Jian Guo, Yi-Jie Gu, Ming Pang ,Cai-Yun Zheng , Heng-Hai Wang Research on laser welding of cast Ni-based superalloy K418 turbo disk and alloy steel 42CrMo shaft Journal of Alloys and Compounds 453 (2008) 371–378
124. [Mackwood, 2005] – A.P. Mackwood ,R.C. Crafer Thermal modelling of laser welding and related processes:a literature review Optics & Laser Technology 37 (2005) 99 – 115
125. [Mahrle, 2002] – Achim Mahrle, Jurgen Schmidt, The influence of fluid flow phenomena on the laser beam welding process
- 126.[Matsunawa, 1997] – Akira Matsunawa, Vlad Semak, The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997) 798–809.
127. [Matsunawa, 1998] – Akira Matsunawa, Naoki Seto,Masami Mizutani, and Seiji Katayama
Liquid Motion in Keyhole Laser Welding ICALEO 1998 p: 151-159
128. [Mattei, 2003] – Simone Mattei, Bruno Martin Point sur les modelisation thermiques volumul conferinței LASER.AP 5
129. [Ming, 2005] – Han GuoMing , Zhao Jian, Li JianQang Dynamic simulation of the temperature field of stainless steel laser welding Materials and Design xxx (2005) xxx-xxx
- 130.[Miyachi Lasers b] – Xxx Suitability of materials for welding Unitek Miyachi Lasers
131. [Miyachi Lasers a] – Understanding Laser Parameters for Weld Development Unitek Miyachi Lasers Conection Technical Aplication Brief Volume 1 no.3 2003
- 132.[Moraitis, 2008] – G.A. Moraitis, G.N. Labeas Residual stress and distortion calculation of laser beam welding for aluminum lap joints journal of materials processing technology 198 (2008) 260–269
133. [Myamoto 2005] – Isamu Miyamoto, Seo-jeong Park, Toshihiko Ooie, Ultrafine-Keyhole Welding Process Using Single-Mode Fiber Laser ICALEO 2005
134. [Nakamura, 2001] – Susumu Nakamura, Motoki Hoshino and Yoshiro Ito Monitoring of CW YAG Laser Welding using □umerica la Acoustic Signals ICALEO 2001
135. [Nath, 2002] – A K Nath, R Sridhar, P Ganesh and R Kaul Laser power coupling efficiency in conduction and keyhole welding of austenitic stainless steel Sadhana Vol. 27, Part 3, June 2002, pp. 383–392
136. [Nath, 2005] – A.K. Nath, T. Reghu, C.P. Paul, M.O. Ittoop, P. Bhargava High-power transverse flow CW CO2 laser for material processing applications Optics &

- Laser Technology 37 (2005) 329–335
137. [Nichici, 1996] – Alexandru Nichici, Eugen Cicală, Robert Mee Prelucrarea datelor experimentale Universitatea Politehnica Timișoara 1996
138. [Nichici, 2004] – Alexandru Nichici / Academia Română, Filiala Timișoara, Energii concentrate – suport al prelucrării termice a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2004
139. [Okon, 2002] – P.Okon, G.Dearden, K.Watkins, M.Sharp, P.French Laser Welding of Aluminium Alloy 5083 ICALEO 2002
140. [Olabi, 2006] – A.G. Olabi , G. Casalino b, K.Y. Benyounis , M.S.J. Hashmi An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO₂ laser welding Advances in Engineering Software 37 (2006) 643–648
141. [Ono, 1999] – Kazuhiko Ono , Karoru Adachi, Yasuichi Matsumoto, Isamu Miyamoto, Takashi Inoue, Ryuichi Narita Influence of oxide film on weld characteristic of mild steel in CO₂ laser welding ICALEO 1999
142. [Ostle, 1975] – Bernard Ostle, Richard W. Mensing , Statistics in Research, Third Edition , The Iowa State University Press 1975
143. [Paicu, 2006] – G. Paicu Utilizări ale energiei electrice: Tehnologii electrice speciale Casa de editură Venus Iași 2006
144. [Pan, 2004] – Lung Kwang Pan, Che Chung Wang, Ying Ching Hsiao, Kye Chyn Ho Optimization of N:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis Optics & Laser Technology 37 (2004) 33 – 42
145. [Pan, 2007] – Lung Kwang Pan Che Chung Wang , Shien Long Wei , Hai Feng Sher Optimizing multiple quality characteristics via Taguchi method-based Grey analysis Journal of Materials Processing Technology 182 (2007) 107–116
146. [Pearsică, 2006] – Marian Pearsică, Ștefan Nedelcu, Doru Luculescu Metode de modelare a procesului de prelucrare cu laser Editura Albastră Cluj –Napoca 2006
147. [Pecharapa, 1997] – Wisanu Pecharapa and Aravinda Kar, Effects of phase changes on weld pool shape in laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997) 3322–3329
148. [Ping, 2008] – Danny P'ng, Pal Molian Q-switch N:YAG laser welding of AISI 304 stainless steel foils Technical note Materials Science and Engineering A 486 (2008) 680–685
149. [Prokorov, 1980] – Prokorov Laser Heating of Metals
150. [Ready, 1997] – John F. Ready Industrial Applications of Lasers (Second Edition) 1997 Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-583961-7
151. [Ream, 2004] – Stanley L. Ream Laser welding efficiency and cost: CO₂ , YAG, Fiber and Disc
152. [Reinhart, 2008] – G. Reinhart , U. Munzert, W. Vogl A programming system for robot-based remote-laser-welding with conventional optics CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008) 37–40
153. [Rykalin, 1978] – N.Rykalin, A Uglov and A. Kokora Laser machining and welding Mir Publishers Moscow 1978
154. [Sabbaghzadeh, 2008] – Jamshid Sabbaghzadeh, Maryam Azizi_, M. Javad Torkamany Numerical and experimental investigation of seam welding with a pulsed laser Optics & Laser Technology 40 (2008) 289–296
155. [Safta, 1984] -Voicu Safta Controlul îmbinărilor și produselor sudate Editura Facla Timișoara 1984
156. [Sakari, 2001] Antti Sakari Salminen Effect of Welding Parameters on the Efficiency and Energy Distribution during Laser Welding with Filler Wire ICALEO 2001

157. [Sankaranarayanan, 1999] - Srikanth Sankaranarayanan , Aravinda Kar, Nonlinear effects of laser-plasma interaction on melt-surface temperature, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) 777-784.
158. [Sasaki, 2002] - Yukimichi Sasaki , Tadashi Misu , Shunro Yoshioka , and Toshiyuki MIYAZAKI Miyazaki Monitoring of YAG Laser Spot Welding-Detection of Porosity Defect by Acoustic Signal ICALEO 2002
159. [Schellhorn 1995] - M. SCHELLHORN, H. v. BijLOW Deep penetration welding using a CO laser with an unstable resonator Optics 81 Laser Technology Vol27 No 3 1995
160. [Schmidt, 1996] - Gases and gas supply systems for increased productivity of laser processing ICALEO 1996
161. [Schmidt 2008] - M. Schmidt , A. Otto , C. Kageler Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 213-216
162. [Seefeld, 2004] - Thomas Seefeld, Jens von Beren, Frank Vollertsen, Damian Piontek, Ulrich Diltthey CO₂ Laser welding with double beam optics ICALEO 2004
163. [Semak, 1999 a] - V. V. Semak, B. Damkroger , S. Kempka, Temporal evolution of the temperature field in the beam interaction zone during laser material processing, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) 1819-1825.
- 164.[Semak 1999 b] - Vladimir V. Semak, William David Bragg, Brian Damkroger, Steven Kempka, Transient model for the keyhole during laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) L61-L64
165. [Semak, 2000] - V. V. Semak, R. J. Steele, P. W. Fuerschbach, B. K. Damkroger, Role of beam absorption in plasma during laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 1179-1185
166. [Semak, 1997] - Vladimir Semak , Akira Matsunawa, The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing, J. Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997) 2541-2552.
167. [Semak, 1995] - V. V. Semak, J. A. Hopkins, M. H. McCay , T. D. McCay, Melt pool dynamics during laser welding, J. Phys. D: Appl. Phys. 28 (1995) 2443-2450
168. [Semak, 2003] - V. V. Semak, G. A. Knorovsky, D. O. MacCallum, On the possibility of microwelding with laser beams, J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 2170-2174.
169. [Seto, 1999] - N. Seto, S. Katayama and A. Matsunawa ,High- Speed Simultaneous Observation of Plasma Keyhole Behavior during High Power CO₂ Laser Welding -Effect of Shielding Gas on Porosity Formation ICALEO 1999
170. [Shannon, 2004] - Geoff J Shannon Pulsed Nd:YAG laser welding of Al-Si controlled alloys and aluminium 4047 Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics 2004
171. [Shannon b] - Geoff J Shannon Spot and seam welding applications using Nd:YAG lasers, Presentation at Unitek Miyachi Corporation
172. [Shannon, b] - G. J. SHANNON, J. WATSON, W. F. DEANS Laser welding in a high pressure gas environment Research note Oprirs & Laser Technology, Vol. 27, No. 6, pp. 397-398. 1995
173. [Shen, 2001] - Z.H. Shen, S.Y. Zhang, J. Lu, X.W. Ni Mathematical modeling of laser induced heating and melting in solids Optics & Laser Technology 33 (2001) 533-537
174. [Sibillano, 2005] - T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi , P.M. Lugara, Correlation analysis in laser welding plasma Optics Communications xxx (2005) xxx-xxx
175. [Sierra, 2007] - G. Sierra , P. Peyre, F. Deschaux-Beaume, D. Stuart, G. Fras

- Steel to aluminium key-hole laser welding *Materials Science and Engineering A* 447 (2007) 197–208
176. [Smith, 1999] - Elizabeth Smith and Elijah Kannatey-Asibu Jr, Visualisation and Acoustic monitoring of Laser Weld Pool Oscillatory Behavior *ICALEO* 1999.
177. [Soveja, 2008] A. Soveja, E. Cicală, D. Grevey, J.M. Jouvard Optimisation of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 46, Issue 9, September 2008, Pages 671-678
178. [Steen, 2003] - W.M.Steen, Laser material processing—an overview, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 5 (2003) S3–S7
179. [Stoican 2007 a] - Stoican Adrian, Boboescu Remus The distribution of the heat flux density for the melting and evaporation in keyhole laser welding *Revista de tehnologii neconventionale* no 3/2007 p:101-106 ISSN 1454-3087
179. [Stoican 2007 b] - Stoican Adrian, Boboescu Remus Model for laser extinction laser radiation in metals *Revista de tehnologii neconventionale* no 2/2007 p:109-112 ISSN 1454-3087
180. [Sun, 1999] - Z. Sun , M. Kuo Bridging the joint gap with wire feed laser welding *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1999) 213–222
181. [Thorslund, 2003] - Thord Thorslund, Franz-Josef Kahlen, Aravinda Kar, Temperatures, pressures and stresses during laser shockprocessing ,*Optics and Lasers in Engineering* 39 (2003) 51–71
182. [Tsirkas, 2003] - S.A Tsirkas, P .Papanikos, Th Kermanidis Numerical simulation of laser welding process in butt-joint specimens *Journal of material processing* 134 2003 59-69
183. [Tsukamoto, 2004] - Susumu Tsukamoto, Goro Arakane, Hiroshi Honda, Seiji Kuroda Formation mechanism and prevention of weld defects in full penetration laser welding of thick steel plates,*ICALEO* 2004
184. [Tzeng, 2000 a] - Yih-Fong Tzeng Effects of operating parameters on surface quality for the pulsed laser welding of zinc-coated steel *Journal of Materials Processing Technology* 100 (2000) 163-170
185. [Tzeng, 2000 b] - Yih-fong Tzeng Parametric analysis of the pulsed Nd:YAG laser seam-welding process *Journal of Materials Processing Technology* 102 (2000) 40-47
186. [Ursu ,1986] - Ursu I. Interacțiunea radiației laser cu metalele. Editura Academiei București 1986
187. [Usov, 2004] - S.V. Usov, I.V. Minaev High-power impulse YAG laser system for cutting, welding and perforating of super hard materials .*Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004) p: 541–545
188. [Van Elsen 2007] - M. Van Elsen, M. Baelmans, P. Mercelis, J.P. Kruth Solutions for modelling moving heat sources in a semi-infinite medium and applications to laser material processing, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 4872–4882
189. [Wang, 2003] - Hai-Xing Wang , Xi Chen, Three-dimensional modelling of the laser-induced plasma plume characteristics in laser welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 (2003) 628–639.
190. [Wang, 2007] - Hong Wang , Yaowu Shi, Shuili Gong, Ai Qin Duan Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding *Journal of Materials Processing Technology* 184 (2007) 379–385
191. [Weston, 2003] - Weston, J., Wallach, E.R. Coupling for laser welds in aluminium alloys 2003
192. [Xie, 1999] - Jian Xie Plasma Fluctuation and Keyhole Instability in Laser

Welding ICALEO 1999

193. [Xie 2002 a] - J. Xie Weld Morphology and Thermal Modeling in Dual-Beam Laser Welding Welding Journal (December 2002) p:283S-290S

194. [Xie, 2002 b] - J. Xie Dual Beam Laser Welding Welding Journal (October 2002) p:224S-230S

195. [Yang, 1999] - Y.S. Yang, S.H. Lee A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications Journal of Materials Processing Technology 94 (1999) 151-156

196. [Yeh, 1996] - J.-Y. Yeh, L. N. Brush A boundary integral equation technique for the calculation of weld pool shapes in thin plates, Computational Materials Science 6 (1996) 92-102

197. [Yilbas, 2003] - Kalyon, B.S. Yilbas Laser pulse heating: a formulation of desired temperature at the surface Optics and Lasers in Engineering 39 (2003) 109-119

198. [Yue, 1996] - T.M.Yue, C. Y. Jiang, J.H. Xu ,W.S Lau Laser fantasy: from machining to welding Journal of Materials Processing Technology 57 (1996) 316-319

199. [Zang, 2004] - Xudong Zhang, Wuzhu Chen, Eiji Ashida, Fukuhisa Matsuda Relationship between weld quality and optical emissions in underwater Nd: YAG laser welding Journal of material processing 134 2003 59-69

200. [Zhang, 2008] - Yi Zhang, Genyu Chen, Haiying Wei, Jun Zhang A novel "sandwich" method for observation of the keyhole in deep penetration laser welding Optics and Lasers in Engineering 46 (2008) 133-139

201. [Zhang 1997] - Zhang Li, S.L. Golbi, J.H. Loreau Laser welding of Waspaloy sheets for aero-engines Journal of Materials Processing (1997)

202. [Zhang 2002] - W.H. Zhang and H.L. Tsai Pore Formation and Prevention in Deep Penetration Pulsed Laser Welding ICALEO 2002

203. [Zhang 2004] - Xudong Zhang, Wuzhu Chen, Eiji Ashida, Fukuhisa Matsuda Relationship between weld quality and optical emissions in underwater Nd: YAG laser welding Optics and Lasers in Engineering 41 (2004) 717-730