

DEZVOLTAREA PROCEDEULUI DE SUDARE HIBRID LASER- (MICRO)WIG PULSAT

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

Ing.fiz. Aurel – Valentin BÎRDEANU

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.dr.ing Dorin DEHELEAN
prof.dr. Laurențiu SLĂTINEANU
prof.dr.ing. Ionelia VOICULESCU
conf.dr.ing. Eugen CICALĂ

Ziua susținerii tezei: 13.09.2012

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 | |

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, 2006

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

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Institutului Național de Cercetare – Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara, prin studiu personal, dar mai ales pe baza experienței și a rezultatelor obținute în cadrul mai multor proiecte naționale și internaționale, atât ca manager de proiect / responsabil din partea partenerului cât și membru al echipelor de cercetare.

Dintre proiectele la care am participat, următoarele mi-au permis în mod special obținerea rezultatelor prezentate în teza de doctorat:

- Sensor controlled laser-welding robot for 3-d seam welding – SENSELASBOT – proiect FP5;
- Sisteme de microîmbinare pentru elemente de circuit și încapsulare ale microsenzorilor și actuatorilor – proiect PNCDI2;
- Sistem integrat de determinare a sudabilității cu fascicul laser a materialelor polimerice, de monitorizare și control în timp real a procesului de sudare – proiect PNCDI2;
- Studiul procesului de sudare hibrid laser – WIG / microWIG în regim pulsant (laser pulsant și respectiv WIG pulsant) – proiect PN – ISIM 09-160101 în cadrul Programului Nucleu ISIM.

Autorul dorește să mulțumească d-lui Prof.dr.ing. Dorin DEHELEAN, pentru coordonarea tezei de doctorat și pentru răbdarea de care a dat dovadă pe parcursul derulării stagiului doctoral, d-lui Prof.dr.ing. Alexandru NICHICI și d-lui Conf.dr.ing. Eugen CICALĂ pentru sprijinul acordat în legătură cu prelucrarea neconvențională a materialelor, dar mai ales pentru sprijinul acordat la proiectarea experimentală și modelarea statistică, colegilor Ing. Cristian CIUCĂ și Ing. Alexandru PUICEA pentru ajutorul oferit pe durata programelor experimentale extrem de laborioase, colegului Dr.ing. Victor VERBIȚCHI pentru elaborarea modalității de implementare practică a metodelor de sincronizare a pulsurilor celor două procese, colegilor din secția S2 pentru proiectarea și realizarea diferitelor componente concepute pentru sistemul experimental, precum și tuturor celor care m-au susținut pe parcursul derulării cercetării doctorale și nu în ultimul rând familiei care a fost alături de mine.

Timișoara, septembrie 2012

Aurel – Valentin Bîrdeanu

Bîrdeanu, Aurel – Valentin

Dezvoltarea procedului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 47, Editura Politehnica, 2012, 176 pagini, 249 figuri, 32 tabele.

ISSN:1842-8967

ISBN:978-606-554-516-8

Cuvinte cheie: sudare hibridă laser-arc, dezvoltare procedeu de sudare, sudare hibridă LASER-(micro)WIG pulsat, caracterizare și optimizare proces de sudare

Rezumat: Dezvoltarea unor noi tehnologii și procese de prelucrare, îmbunătățirea celor existente sau dezvoltarea unor noi echipamente de prelucrare și / sau componente pentru cele existente sunt câteva din direcțiile principale de cercetare-dezvoltare în domeniul fabricației, alături de optimizarea tehnologiilor de prelucrare existente, focalizate către îmbunătățirea eficienței liniilor de producție și a calității produselor realizate de acestea.

Obiectivul principal al prezentei lucrări de doctorat este reprezentat de dezvoltarea acestui nou procedeu de sudare hibrid – procedeu de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat (LmWP), procedeu bazat pe combinarea și cuplarea a două surse de energie cu funcționare în regim pulsat: fascicul laser cu funcționare în regim pulsat (pw) și respectiv arc electric (micro)WIG pulsat.

Noul procedeu de sudare hibrid a fost dezvoltat ca o soluție în ceea ce privește atenuarea variației de pătrundere la sudarea cu fascicul laser în regim pulsat, un fenomen specific, cu aplicabilitate focalizată către realizarea de micro-îmbinări, ca o alternativă la procedeele clasice de sudare cu energii liniare introduse în material crescute, precum și pentru prelucrarea materialelor compozite micro și nano-structurate sinterizate, prin determinarea unor condiții de optim, precum și prin conceperea unor ansamble pentru aplicarea procedului de sudare propus.

CUPRINS

Cuprins	v
Listă de abrevieri	vii
Listă de figuri.....	xi
Listă de tabele	xvii
1. Introducere.....	18
2. Sudarea hibridă laser-arc.....	22
2.1. Conceptul „sudare hibridă LASER – ARC”	22
2.2. Caracteristicile procesului de sudare hibrid LASER – ARC.....	25
2.2.1. Transferul de energie.....	25
2.2.2. Fenomene sinergice.....	26
2.2.3. Avantaje și dezavantaje	28
2.3. Aspecte ale modelării proceselor de sudare hibride laser-arc.....	30
2.3.1. Generalități	30
2.3.2. Modele utilizate la sudarea cu fascicul laser.....	30
2.3.3. Modele utilizate la sudarea cu arc electric	35
2.4. Modelarea proceselor de sudare hibride laser – arc	38
2.5. Elemente de modelare a modului de cuplare hibridă dintre fasciculul laser și arcul electric.....	44
2.6. Aspecte tehnologice.....	50
2.7. Procedeele de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat	55
2.7.1. Fondul de dezvoltare al noului procedeu de sudare hibrid.....	56
2.7.2. Principiul procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat... ..	58
2.8. Obiectivele tezei de doctorat.....	58
3. Strategia de experimentare. Soluție constructivă sistem experimental pentru studierea și dezvoltarea procesului de sudare hibrid LASER- (micro)WIG Pulsat.....	60
3.1. Strategia de experimentare	60
3.2. Soluție constructivă sistem experimental pentru sudare hibridă LASER- (micro)WIG pulsat	61
3.2.1. Soluție de principiu pentru montajul experimental.....	61
3.3. Soluții realizate pentru studierea și dezvoltarea procesului LASER-(micro)WIG pulsat	64
3.3.1. Soluție de principiu pentru montajul experimental – robot cartesian YAMAHA FXYX-A1.....	64
3.3.2. Soluție de principiu pentru montajul experimental - Robot FANUC ARC Mate 100 iC.....	67
3.3.3. Experimentări preliminare pentru testarea ajustărilor efectuate	69
4. Procedeele de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat.....	70
4.1. Sistemul experimental pentru studiul dinamicii procesului. Condiții generale de experimentare.	70
4.2. Experimentări pentru studiul dinamicii procesului de sudare hibrid LASER- (micro)WIG Pulsat	72
4.2.1. Experimentări preliminare pentru stabilirea zonei de investigat	72
4.2.2. Influența parametrilor de proces asupra dinamicii procesului de sudare hibrid WIG-laser pulsat	75
4.2.3. Influența parametrilor de proces asupra dinamicii procesului de sudare hibrid laser-WIG pulsat	81
4.2.4. Experimentări fără gaz de protecție laser.....	83

4.2.5. Experimentări cu modificarea vitezei de sudare și a frecvenței de repetiție a pulsurilor laser	84
4.3. Caracterizarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat.....	86
4.4. Modele pentru fundamentarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat	90
4.4.1. Selectare treceri sudate. Mod de prelevare epruvete	91
4.4.2. Influența parametrilor de proces asupra geometriei sudurii pentru varianta laser-WIG pulsat.....	92
4.4.3. Influența vitezei de sudare asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii	94
4.4.4. Influența parametrilor de proces asupra geometriei sudurii pentru varianta WIG-laser pulsat.....	96
4.4.5. Modelarea fenomenologică a procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat.....	100
5.Dezvoltări și optimizări ale procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat.....	105
5.1. Dezvoltări funcționale și optimizare sistem experimental.....	105
5.1.1. Limite de control ale procesului hibrid LASER-(micro)WIG pulsat. Soluție tehnică pentru optimizarea funcțională a sistemului experimental.....	105
5.2. Program experimental pentru stabilirea direcțiilor de optimizare a procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat.....	108
5.2.1. Conceperea program experimental	109
5.2.2. Stabilire spațiu de experimentare. Experimentări pentru stabilirea direcțiilor de optimizare a procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat	111
5.2.3. Evaluarea importanței factorilor de influență asupra funcțiilor obiectiv selectate.....	117
5.2.4. Direcții de optimizare ale procesului.....	123
5.3. Dezvoltări funcționale și optimizare proces de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat	124
5.3.1. Optimizare funcțională proces de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat	124
5.3.1.1. Sincronizarea pulsurilor și controlul defazajului. Mod de implementare.....	124
5.4. Program experimental pentru optimizarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat	127
5.4.1. Sinteză experimentări pentru stabilirea direcțiilor de optimizare. Stabilirea strategiei de experimentare	127
5.4.2. Stabilire spațiu de experimentare. Experimentări de optimizare a procesului de sudare.....	129
5.5. Validare rezultate și experimentări exploratorii pe materiale avansate noi. 150	
5.5.1. Validare rezultate pentru cazuri concrete de îmbinări cap la cap table subțiri acoperite din oțel de uz general	150
5.5.2. Experimentări exploratorii pe materiale avansate noi.....	156
6. Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare	159
6.1. Concluzii	159
6.2. Contribuții personale și elemente de originalitate	161
6.3. Direcții viitoare de cercetare	162
Bibliografie	163

LISTĂ DE ABREVIERI

A	absorbantă (%)
a	distanța dintre procesele componente ale procesului hibrid / combinat
a_{hibrid}	distanța hibridă (distanța dintre cele două procese componente ale procesului hibrid)
Al	Aluminiu
amorsare WIG- HF	amorsarea arcului WIG cu curenți de înaltă frecvență
Ar	Argon
B	Inducția magnetică
C	Carbon
CCD	cameră video cu dispozitiv cu cuplaj de sarcină
Ce	Ceriu
CO₂	Dioxid de Carbon
Cu	Cupru
cw	fascicul laser cu funcționare în regim continuu
d	diametrul fascicul laser / diametrul petei focale
dp	durata pulsului
E	intensitatea câmpului electric
EBW	sudare cu fascicul de electroni
EFC3²	experiment factorial complet de ordinul doi de tipul 3 ²
EFF	experiment factorial fracționat
EFF 2⁶⁻²	experiment factorial fracționat de tipul 2 ⁶⁻²
E_L	energia pulsului laser
Ep	energia pulsului laser
f	frecvența curentului WIG cc pulsat
Fe	Fier
FI	factor de influență
FL	fascicul laser
F_L	frecvența de repetiție a pulsurilor laser
FO	funcții obiectiv
FPA	detector „Focal Plane Array”
FpL / FPL / FrecvL	frecvența de repetiție a pulsurilor laser
FrecvW	frecvența curentului de sudare WIG
Fwig	frecvența curentului de sudare WIG
g_z	acelerația gravitațională
h	entalpia
H₂	Hidrogen
He	Heliu
HV5	măsurători de microduritate Vickers
I₀	maximul densității de putere în centrul fasciculului laser
Iav / Imediu / Imed	curentul mediu de sudare
Ib / Ibaza	curentul de bază (proces WIG cc pulsat)

IFOV	rezoluție spațială
IR	infraroșu
I_s	curent de sudare
I_v / I_{varf}	curentul de vârf (proces WIG cc pulsat)
J	densitatea de curent
K	conductivitatea termica
K₀()	funcția Bessel de speța a doua și ordin zero modificată
L	pătrunderea laser (Fig. 2.40)
L	trecere laser
Las1	regim laser 1
Las2	regim laser 2
Las3	regim laser 3
laser YAG	laser (Nd:) Yttrium Aluminum Garnet
LASER-GMA	procedeu hibrid fascicul laser - procedeu Gas Metal Arc
LASER-MIG	procedeu de sudare Metal Inert Gas
LBW	sudare cu fascicul laser
L_h	lățimea specifică procedurii WIG - lățimea în zona de gătuire
LmWP	procedeu de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat
Ls	lățimea la suprafață
LW	trecere laser-WIG
LWV-0002-3	marcaj probe sudate prin procedeu LASER-WIG pulsat
M	pătrunderea specifică procedurii de sudare cu arc electric
MAG	procedeu de sudare Metal Active Gas
MAG-YAG	procedeu hibrid fascicul laser Nd:YAG - procedeu MAG cu procedeu laser proces conducător
MB	material de bază
Mg	Magneziu
MIG/MAG	Metal Inert Gas / Metal Active Gas
MMA	sudare cu electrozi înveliți
MMC	materiale metalice compozite
Nd:YAG	(laser cu cristal) Neodim:Yttrium Aluminium Garnet
NM	nu s-a putut modela
O₂	Oxigen
OFW	sudare cu flacăra oxiacetilenică
P	pătrundere a fasciculului laser
p	pătrunderea sudurii
P	presiunea (ecuația 2.12)
P	puterea incidentă (ecuația 2.1)
P'_{Ap}	puterea absorbită în plasma indusă - procedeu hibrid
P'_E	puterea electrică - procedeu hibrid
P'_{p el}	puterea disipată prin răcirea electrodului - procedeu hibrid
P'_{p pl}	puterea pierdută prin radiația plasmei arcului - procedeu hibrid
P'_{pc MB}	puterea disipată în material prin fenomene de conducție - convecție - procedeu hibrid
P'_R	puterea reflectată - procedeu hibrid
P'_{tMB}	puterea consumată pentru topirea materialului de bază - procedeu hibrid
P1...18	încercări experimentale (probele) 1...18
P_{Ap}	puterea absorbită în plasma indusă

P_{bombardare K}	puterea primită în urma bombardării catodului de către ionii accelerați în câmpul electric
P_E	puterea electrică
P_{ef}	pătrunderea efectivă
P_{emisie electronica}	puterea consumată pentru emisia termoelectronică
P_h	adâncimea specifică procesului WIG
P_K	puterea la nivelul catodului
P_L	puterea fasciculului laser
PLmT	Pulsed Laser microTIG - denumirea LmWP în limba engleză
P_m [W] /	puterea medie a fasciculului laser
P_{medieL}	
P_{max}	pătrunderea măsurată în secțiune longitudinală
P_{med}	media aritmetică a p (pătrundere măsurată în secțiune transversală) și P _{max} (pătrundere măsurată în secțiune longitudinală)
P_D	puterea în puls a fasciculului laser
P_{pc MB}	puterea disipată în material prin fenomene de conducție - convecție
P_{pel}	puterea disipată prin răcirea electrodului
P_{plasmă indusă laser /}	energie termică și energie electrică datorată creșterii numărului de sarcini în circuitul electric
paq 35	
P_{ddl}	puterea pierdută prin radiația plasmei arcului
P_R	puterea reflectată
P_{tel}	puterea consumată pentru topirea electrodului
P_{tMB}	puterea consumată pentru topirea materialului de bază
P_{topire electrod}	puterea consumată pentru topirea sârmei electrod
pw	fascicul laser cu funcționare în regim pulsat
q	sarcina electrică volumică
Q_w	fluxul de căldură
R	înălțimea supraînălțării depuse
r₀	raza fasciculului laser
r_a	raza arcului electric
ratWIG / WIGrat	rata (factorul de umplere al) curentului WIG
r_m	raze de topire
r_v	raze de evaporare
SAW	sudare sub strat de flux
Si	siliciu
SUD	sudură
t [mm]	grosimea sudată (ecuația 2.1)
t [s]	țimp
T1...16	încercări experimentale (probe) 1...16
Tmax / Temp.	Temperatura maximă
MAX	
Tmin / Temp.	Temperatura minimă
MIN	
U	puterea sursei de radiație (ecuația 2.13)
u	viteza (ecuația 2.10)
Unghi FL-WIG	unghiul dintre capul de sudare laser și capul de sudare WIG
Us	tensiunea arcului de sudare WIG
u_w	viteza de sudare (folosit în modelul necuplat)
V	tensiunea arcului electric (folosit în modelul necuplat)

V / v / v_s	viteza de sudare
W	lățimea la suprafață a stratului depus (fig. 2.40.)
W	trecere WIG
W	Watt
WIG	Wolfram Inert Gas
WIG – YAG	varianta procedeu hibrid laser-WIG cu procesul WIG proces conducător
WIG cc	sudare WIG în curent continuu
WL	trecere WIG-laser
WLV-0001-1	marcaj probe sudate prin procedeul WIG-LASER pulsat cu variația vitezei de sudare
YAG – MIG	varianta procedeu hibrid laser-MIG/MAG cu procesul laser proces conducător
YAG – WIG	varianta procedeu hibrid laser-WIG cu procesul laser Nd:YAG proces conducător
ZIT	zona influențată termic
α	unghiul dintre capul Laser și capul WIG
δ	funcția delta Dirac
ε₀	permitivitatea spațiului liber
η	randamentul procesului
κ	difuzivitatea termică
κ_v	coeficientul de absorbție radiativă
M	vâscozitatea dinamică
μ₀	permeabilitatea magnetică a spațiului liber
ρ	densitatea masică
ρ_∞	densitatea gazului în afara descărcării
σ	conductivitatea electrică
τ	funcția Heavyside
Θ	unghiul hibrid (unghiul între axa laser și axa capului WIG)

LISTĂ DE FIGURI

- Fig. 2.1. Combinarea și respectiv cuplarea celor două procese de sudare
Fig. 2.2. Volumul de „producție științifică” corelat cu principalele procedee de sudare
Fig. 2.3. Sudarea cu fascicul laser
Fig. 2.4. Sudarea cu arc electric
Fig. 2.5. Sudarea hibridă LASER - ARC
Fig. 2.6. Stabilizarea descărcării electrice în arc la cuplarea hibridă a celor două procese
Fig. 2.7. Stabilizarea arcului WIG la curenți mici datorită fasciculului laser
Fig. 2.8. Stabilizarea arcului WIG în condiții de câmp magnetic asimetric datorită fasciculului laser
Fig. 2.9. Stabilizarea arcului (laser-MAG)
Fig. 2.10. Stabilizarea formei sudurii
Fig. 2.11. Avantajele procedurii de sudare hibrid
Fig. 2.12. Exemple de utilizare surse punctiforme suprapuse pentru modelarea și simularea câmpului termic la sudarea cu fascicul laser
Fig. 2.13. Forma calculată a băii de material topit pe baza
Fig. 2.14. Modelul matematic și geometria pentru încălzirea pulsată
Fig. 2.15. Razele de evaporare (r_v) și respectiv topire (r_m) calculate
Fig. 2.16. Teoria absorbtivității radiale și diferitele etape specifice la prelucrarea cu fascicul laser în regim pulsat
a) absorbtivitate redusă datorită temperaturii scăzute
b) situație cu concentrator local de absorbtie
c) absorbtivitate crescută cauzată de încălzire
d) difuzia stratului superficial datorită topirii
e) dimensiunea suprafeței topite mai mare decât diametrul fasciculului
f) pierderi prin evaporare
g) formarea găurii de cheie cu reflexii și absorbtii multiple
Fig. 2.17. Diferitele fenomene de topire la sudarea cu fascicul laser
Fig. 2.18. Zonele arcului electric
Fig. 2.19. Variația temperaturii, potențialului electric și a distribuției de presiune pentru un arc staționar axisimetric
Fig. 2.20. Distribuțiile presiunii, temperaturii, fluxului de căldură și a densității de curent ($t=64ms$)
Fig. 2.21. Evoluția temporală a presiunii, temperaturii, fluxului de căldură și a densității de curent
Fig. 2.22. Rezultatele simulate și experimentale ale modelării unei surse de căldură echivalente pentru sudarea laser-WIG
Fig. 2.23. Forma experimentală și prezisă a sudurii după adaptarea modelului hibrid cuplat
Fig. 2.24. Model matematic geometrie rost la sudarea hibridă laser-MIG
Fig. 2.25. Simularea evoluției procesului hibrid laser-MIG și profilele de temperatură
Fig. 2.26. Variația în timp a profilele vitezelor
Fig. 2.27. Influența curentului asupra dinamicii băii de sudare la procesul laser-WIG
Fig. 2.28. Dinamica băii de sudare LASER-MIG funcție de curentul de sudare
Fig. 2.29. Geometria și fenomenele fizice specifice sudării hibride laser-MIG
Fig. 2.30. Structura modelului matematic
Fig. 2.31. Dinamica curgerii gazelor calculată (a) și înregistrată (b)
Fig. 2.32. Secțiunea transversală a sudurii funcție de deschiderea rostului și raportul viteza de sudare – viteza de avans a sârmei
Fig. 2.33. Modelul simplificat al bilanțurilor energetice pentru procesele de sudare
Fig. 2.34. Variația puterii efective utilizate în procesul de sudare cu distanța de separație dintre procese

- Fig. 2.35. Dependența pătrunderii funcție de viteza de sudare, procedeul WIG-LASER (WIG-YAG), $P_L = 1,7$ kW, curent de sudare $I_s = 100$ A, gaz de protecție Argon
- Fig. 2.36. Variantele laser-WIG și respectiv WIG-laser
- Fig. 2.37. Comparație între sudarea WIG – YAG și YAG – WIG
- Fig. 2.38. Studiu comparativ al pătrunderii funcție de distanța dintre electrod și fascicul laser
- Fig. 2.39. Influența I_s la sudarea YAG – MIG asupra aspectului sudurii
- Fig. 2.40. Parametrii geometrici ai sudurii
- Fig. 2.41. Îmbinare aliaj Fe – aliaj Mg (suprafața)
- Fig. 2.42. Îmbinare aliaj Fe – aliaj Mg (secțiune transversală)
- Fig. 2.43. Îmbinare aliaj Mg – aliaj Al (secțiune transversală)
- Fig. 2.44. Schema sudării cu fascicul laser în regim pulsant
a. – pătrunderea efectivă a sudurii b. – pătrunderea unui puls laser
- Fig. 2.45. Influența vitezei de sudare asupra pătrunderii
- Fig. 2.46. Influența distanței între procese (“distanța hibridă”) asupra pătrunderii
- Fig. 2.47. Secțiunea transversală a sudurii laser pulsant – WIG cc
a- laser-WIG; b.- WIG-laser
- Fig. 2.48. Principiul procedurii de sudare hibrid LmWP / PLmT
- Fig. 3.1. Sistemul experimental
- Fig. 3.2. Cap hibrid pentru procedeul LmWP varianta cu sârmă de adaos
- Fig. 3.3. Axele de poziționare cap hibrid
- Fig. 3.4. Masa inerțială și robotul cartezian
- Fig. 3.5. Sistemul pentru poziționare sârmă de adaos
- Fig. 3.6. Soluție de principiu pentru montajul experimental
- Fig. 3.7. Cap de sudare hibrid LASER - WIG
- Fig. 3.8. Masa de lucru
- Fig. 3.9. Software programare și control robot cartesian FXYY
- Fig. 3.10. Robot FANUC ARC Mate 100 iC
- Fig. 3.11. Sistem de fixare cap de prelucrare (tăiere, sudare, cap hibrid)
- Fig. 3.12. Sistem de fixare cap de prelucrare
- Fig. 3.13. Robot antropomorf cu sistem de fixare cap de prelucrare
- Fig. 3.14. Sistem flexibil pentru susținerea capului de sudare
- Fig. 3.15. Aspectul vizual al experimentărilor preliminare pentru verificarea soluției constructive (trecuri cu fascicul laser și trecuri laser-WIG pulsant)
- Fig. 4.1. Ansamblul experimental final cu 3 sisteme de achiziție video: CCD, camera video, camera termografică IR
- Fig. 4.2. Imagine din timpul experimentărilor
- Fig. 4.3. Experimentări pentru stabilirea zonei de experimentare
(W – trecere WIG; L – trecere laser; WL – trecere WIG-laser)
- Fig. 4.4. Aspectul vizual al trecerilor pentru stabilirea zonei de experimentare (suprafață)
- Fig. 4.5. Detaliu plasmă generată de fasciculul laser și devierea arcului WIG către fasciculul laser
- Fig. 4.6. Creșterea curentului WIG și devierea către spotul laser
- Fig. 4.7. Alungirea arcului WIG cu creșterea agitației băii de sudare
- Fig. 4.8. Scăderea curentului WIG și reducerea dimensiunii băii de sudare comune (formarea solzilor sudurii)
- Fig. 4.9. Variația temperaturii zonei băii comune WIG-LASER
- Fig. 4.10. Stabilizarea procesului la curenți mici (15A) și distanță redusă între procese prin creșterea ratei de umplere (de la 40% la 60%), a frecvenței pulsurilor WIG (1Hz la 15Hz) și combinarea celor două (15Hz cu 60%) [16]
1 – ratWIG=40%, FrecvW=1Hz; 2 – ratWIG=60% FrecvW=1Hz; 3 – ratWIG=40%, FrecvW=15Hz; 3 – ratWIG=60%, FrecvW=15Hz
- Fig. 4.11. Devierea arcului WIG datorită suflajului magnetic și a gazului de protecție laser în zona curentului de bază și stabilizarea acestuia prin creșterea ratei de umplere procesului WIG
- Fig. 4.12. Lipsa suflajului magnetic la curenți mici și unghi FL-WIG 39° (stabilitatea crește cu creșterea frecvenței și ratei de umplere WIG)
1 – ratWIG=40%, FrecvW=1Hz; 2 – rat=60%, FrecvW=1Hz; 3 – rat=40%, FrecvW=15Hz; 4 – rat=60%, FrecvW=15Hz

- Fig. 4.13. Stabilizarea procesului datorită modificării curgerii gazelor de protecție la valoarea unghiului FL-WIG 39°
- Fig. 4.14. Creșterea dimensiunii băii de sudare la curenți mari (28A) și frecvențe mici (1Hz: 1 și 2) și atenuarea fenomenului prin creșterea frecvenței pulsurilor WIG (15Hz: 3 și 4); (rata de umplere: 40% - 1 și 3; 60% - 2 și 4)
- Fig. 4.15. Lipsa variației dimensiunilor băii topite la curenți mari (28A) și frecvențe mari (150Hz)
- Fig. 4.16. Creșterea dimensiunii băii de sudare la distanța redusă între procese în zona curentului de vârf
- Fig. 4.17. Variația temperaturii în zona monitorizată, la distanță redusă între procese (1.4mm), curent de valoare relativ mare (28A) și frecvență mică (1Hz); $T_{max}=865.263^{\circ}\text{C}$; $T_{min}=591.807$; Amplitudinea= 273.456°C
- Fig. 4.18. Decuplarea proceselor la curent mediu de sudare 15A și $a=3\text{mm}$
- Fig. 4.19. Aspectul suprafeței sudurii la curent mediu 15A și $a=3\text{mm}$, rata de umplere 40 (treccrea superioară) și respectiv 60% (treccrea inferioară)
- Fig. 4.20. Devierea arcului WIG spre plasma generată laser în zona curentului de vârf (Imed=15A, $a=6\text{mm}$, ratWIG=40%)
- Fig. 4.21. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență mică WIG (Imed=28A, FrecvWIG=1Hz, ratWIG=40%)
- Fig. 4.22. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență medie WIG (Imed=28A, FrecvWIG=15Hz, ratWIG=40%)
- Fig. 4.23. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență mare WIG (Imed=28A, FrecvWIG=150Hz, ratWIG=40%)
- Fig. 4.24. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență mare WIG cu reducerea amplitudinii prin creșterea ratei de umplere WIG (Imed=28A, FrecvWIG=150Hz, ratWIG=60%)
- Fig. 4.25. Variația temperaturii monitorizate la unghi FL-WIG 55° (Imed=28A, FrecvWIG=1Hz, ratWIG=40%)
- Fig. 4.26. Creșteri ale dimensiunii băii de sudare la frecvențe mici ale curentului pulsant WIG (rata de umplere 40 - sus și respectiv 60% - jos; $I_{av}=20\text{A}$)
- Fig. 4.27. Atenuarea devierii arcului WIG de către pulsul laser în zona curentului de bază ($I_{av}=20\text{A}$, rataWIG=40%)
- Fig. 4.28. Creșterea volumului arcului WIG datorită plasmei generate laser și devierea către spotul laser ($I_{av}=20\text{A}$, rataWIG=40%, FWIG=1Hz)
- Fig. 4.29. Corectarea devierii arcului WIG pulsant în prezența pulsului laser (în zona de bază a curentului și respectiv în zona curentului de vârf) $I_{av}=20\text{A}$, rataWIG=40%, FWIG=1Hz
- Fig. 4.30. Domeniul de variație a temperaturii pentru varianta laser-WIG pulsant (unghi FL-WIG 39°, $a=3\text{mm}$)
- Fig. 4.31. Trecceri WIG-laser pulsant fără gaz de protecție laser – aspect vizual (de sus în jos trecerile WL-ng 0001-1 la 0001-3)
- Fig. 4.32. Trecceri laser-WIG pulsant fără gaz de protecție laser – aspect vizual (de sus în jos trecerile: LW-ng 0002-1 la 0002-3)
- Fig. 4.33. Stropiri în cazul WIG-laser pulsant fără gaz de protecție laser
- Fig. 4.34. Variația temperaturii în zona monitorizată pentru varianta laser-WIG pulsant fără gaz de protecție la frecvență mare (150Hz) a pulsurilor WIG
- Fig. 4.35. Aspectul vizual al trecerilor pentru verificarea cuplării frecvențelor de repetiție la creșterea vitezei (de sus în jos: WLW-0001.1-1.4)
- Fig. 4.36. Aspectul vizual al trecerilor pentru verificarea cuplării frecvențelor de repetiție la creșterea vitezei (de sus în jos: WLW-0002.1-2.2; LVW0002.3-2.4)
- Fig. 4.37. Aspectul vizual al trecerilor pentru verificarea cuplării frecvențelor de repetiție la creșterea vitezei (de sus în jos: LVW0003.1-3.4)
- Fig. 4.38. Stropiri la creșterea vitezei de sudare datorate scăderii gradului de cuplare FL arc WIG
- Fig. 4.39. Fenomenul de deviere a arcului WIG către spotul laser
- Fig. 4.40. Fenomenele tranzitorii de cuplare fascicul laser – arc WIG pulsant
a – pe durata curentului de bază; b – pe durata curentului de vârf; c – la tranziția curent de vârf – curent de bază

- Fig. 4.41. Situații tranzitorii de cuplare fascicul laser – arc WIG
a, b – cuplare hibridă scăzută și apariția suflajului magnetic; c – lipsa cuplării hibride
- Fig. 4.41.-1. Variația temperaturii în zona monitorizată
a. 1Hz, 40%WIGrat; I_{av}=28A; diferența maximă: 373°C, b. 15Hz, 40%WIGrat; I_{av}=28A; diferența maximă: 330°C
- Fig. 4.42. Aspectul vizual al suprafeței sudurilor
I_{av}=20A (ratWIG: 40% la 60%; frecvența WIG: 1-15Hz)
- Fig. 4.43. Pori vizibili în secțiunea transversală
- Fig. 4.44. Secțiune longitudinală – variații de pătrundere
- Fig. 4.45. Sudură asimetrică (WIG: 20A,15Hz, 60%)
- Fig. 4.46. Sudură simetrică (WIG: 20A, 1Hz, 60%)
- Fig. 4.47. Aspect macroscopic transversal
WIG: a – I_{av}=20A, 15Hz; b – I_{av}=20A, 150Hz
- Fig. 4.48. Forma trecerilor cu varianta laser-WIG cc
- Fig. 4.49. Forma trecerilor cu varianta WIG cc-laser
- Fig. 4.50. Secțiunea longitudinală și măsurile măsurate
- Fig. 4.51. Elementele caracteristice geometriei sudurii realizate cu procedeul hibrid laser-WIG-laser pulsat (secțiune transversală)
- Fig. 4.52. Variația lățimii la suprafață a sudurii funcție de frecvența pulsurilor WIG (f) și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG
- Fig. 4.53. Variația pătrunderii funcție de frecvența pulsurilor WIG și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG
- Fig. 4.54. Variația parametrilor Ph și respectiv Lh funcție de frecvența pulsurilor WIG și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG
- Fig. 4.55. Variația pătrunderii efective funcție de frecvența pulsurilor WIG și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG
- Fig. 4.56. Variația lățimii la suprafață funcție de viteza de sudare
- Fig. 4.57. Variația pătrunderii cu viteza de sudare
- Fig. 4.58. Variația pătrunderii specifice WIG cu viteza de sudare
- Fig. 4.59. Variația parametrului Lh funcție de viteza de sudare
- Fig. 4.60. Variația pătrunderii efective funcție de viteza de sudare
- Fig. 4.61. Variația L_s cu frecvența pulsurilor WIG
- Fig. 4.62. Variația p cu frecvența pulsurilor WIG
- Fig. 4.63. Variația p_h cu frecvența pulsurilor WIG
- Fig. 4.64. Variația L_h cu frecvența pulsurilor WIG
- Fig. 4.65. Variația pătrunderii efective cu frecvența pulsurilor WIG
- Fig. 5.1. Soluție constructivă de ajustare pentru montajul experimental
- Fig. 5.2. Sistem experimental cap de sudare hibrid LASER –WIG optimizat
- Fig. 5.3. Dispozitiv de fixare și reglare cap de sudare WIG
- Fig. 5.4. Montajul experimental
- Fig. 5.5. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (1-3)
- Fig. 5.6. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (4)
- Fig. 5.7. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (5-8)
- Fig. 5.8. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (9-12)
- Fig. 5.9. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (13-16)
- Fig. 5.10. T1
- Fig. 5.11. T2
- Fig. 5.12. T3
- Fig. 5.13. T4
- Fig. 5.14. T5
- Fig. 5.15. T6
- Fig. 5.16. T7
- Fig. 5.17. T8
- Fig. 5.18. T9
- Fig. 5.19. T10
- Fig. 5.20. T11
- Fig. 5.21. T12
- Fig. 5.22. T13

- Fig. 5.23. T14
Fig. 5.24. T15
Fig. 5.25. T16
Fig. 5.26. Diagrama efectelor asupra L_s
Fig. 5.27. Diagrama efectelor asupra p (transversal)
Fig. 5.28. Diagrama efectelor asupra P_h (transversal)
Fig. 5.29. Diagrama efectelor asupra L_h (transversal)
Fig. 5.30. Diagrama efectelor asupra P_{max} (longitudinal)
Fig. 5.31. Diagrama efectelor asupra P_{ef} (longitudinal)
Fig. 5.32. Diagrama efectelor asupra dv (longitudinal)
Fig. 5.33. Diagrama efectelor asupra P_{med} (estimat)
Fig. 5.34. Corelația evoluției L_s ; p
Fig. 5.35. Corelația evoluției L_s ; L_h
Fig. 5.36. Corelația evoluției p ; P_h
Fig. 5.37. Corelația evoluției P_{max} ; P_{ef}
Fig. 5.38. Evoluția P_{med}
Fig. 5.39. Evoluția p ; P_{max} (transversal și respectiv longitudinal)
Fig. 5.40. Evoluția dv
Fig. 5.41. Soluțiile de control a sincronizării pulsurilor
Fig. 5.42. Montajul experimental [16]
Fig. 5.43. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶⁻² (1-3)
Fig. 5.44. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶⁻² (4-6)
Fig. 5.45. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶⁻² (7-9)
Fig. 5.46. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶⁻² (10-12)
Fig. 5.47. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶⁻² (13-15)
Fig. 5.48. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶⁻² (16-18)
Fig. 5.49. P1
Fig. 5.50. P2
Fig. 5.51. P3
Fig. 5.52. P4
Fig. 5.53. P5
Fig. 5.54. P6
Fig. 5.55. P7
Fig. 5.56. P8
Fig. 5.57. P9
Fig. 5.58. P10
Fig. 5.59. P11
Fig. 5.60. P12
Fig. 5.61. P13
Fig. 5.62. P14
Fig. 5.63. P15
Fig. 5.64. P16
Fig. 5.65. P17
Fig. 5.66. P18
Fig. 5.67. Diagrama Pareto P_{ef}
Fig. 5.68. Diagrama Pareto dv
Fig. 5.69. Diagrama Pareto L_h
Fig. 5.70. Diagrama Pareto L_s
Fig. 5.71. Diagrama Pareto P_{max}
Fig. 5.72. Diagrama Pareto p
Fig. 5.73. Diagrama Pareto P_h
Fig. 5.74. Diagrama Pareto P_{max} - P_{ef}
Fig. 5.75. Diagrama Pareto diferențe măsurători „p”
Fig. 5.76. Diagrama Pareto aspect vizual
Fig. 5.77. Diagrama Pareto stabilitate proces
Fig. 5.78. Suprafața de răspuns P_{ef} funcție de a_{hibrid} și FPL
Fig. 5.79. Suprafața de răspuns P_{ef} funcție de a_{hibrid} și Iav
Fig. 5.80. Suprafața de răspuns dv funcție de a_{hibrid} și Iav

- Fig. 5.81. Suprafața de răspuns L_h funcție de a_{hibrid} și I_{av}
- Fig. 5.82. Suprafața de răspuns L_h funcție de d_p și FPL
- Fig. 5.83. Suprafața de răspuns L_s funcție de a_{hibrid} și I_{av}
- Fig. 5.84. Suprafața de răspuns aspect vizual funcție de FWIG și FPL
- Fig. 5.85. Suprafața de răspuns stabilitate proces funcție de FWIG și FPL
- Fig. 5.86. Suprafața de răspuns stabilitate proces funcție de a_{hibrid} și FPL
- Fig. 5.87. Suprafața de răspuns $P_{\text{max}}-P_{\text{ef}}$ funcție de a_{hibrid} și I_{av}
- Fig. 5.88. Aspect vizual treceri exp. EFC 3^2 (1-3)
- Fig. 5.89. Aspect vizual treceri exp. EFC 3^2 (4-6)
- Fig. 5.90. Aspect vizual treceri exp. EFC 3^2 (7-9)
- Fig. 5.91. Suprafața de răspuns L_s
- Fig. 5.92. Suprafața de răspuns p
- Fig. 5.93. Suprafața de răspuns P_h
- Fig. 5.94. Suprafața de răspuns L_h
- Fig. 5.95. Suprafața de răspuns P_{max}
- Fig. 5.96. Suprafața de răspuns P_{ef}
- Fig. 5.97. Suprafața de răspuns dv
- Fig. 5.98. Suprafața de răspuns P_{med} (media p și P_{max})
- Fig. 5.99. Suprafața de răspuns D_{fp} (diferența în % $P - P_{\text{max}}$)
- Fig. 5.100. Suprafața de răspuns aspect vizual
- Fig. 5.101. Suprafața de răspuns stabilitate
- Fig. 5.102. Suprafața de răspuns $P_{\text{max}} - P_{\text{ef}}$
- Fig. 5.103. Sistemul de fixare a tablelor
- Fig. 5.104. Aspectul rostului îmbinării (tablă cu vopsea curățată mecanic în zona îmbinării)
- Fig. 5.105. Aspectul vizual al suprafeței (a) și rădăcinii sudurii (specimen cu curățirea stratului de vopsea din zona îmbinării)
- Fig. 5.106. Aspectul vizual al suprafeței (a) și rădăcinii sudurii (specimen fără curățirea stratului de vopsea din zona îmbinării)
- Fig. 5.107. Aspectul microscopic al îmbinării sudate L_{mWP} [Nital 10%]
- Fig. 5.108. Aspect microscopic M1-MB1 [Nital 2%, 100×]
- Fig. 5.109. Aspect microscopic M1-ZIT1 M1-MB1 [Nital 2%, 100×]
- Fig. 5.110. M1-SUD [Nital 2%, 100×]
- Fig. 5.111. M1-ZIT2 [Nital 2%, 100×]
- Fig. 5.112. M1-MB2 [Nital 2%, 100×]
- Fig. 5.113. Distribuția punctelor pentru evaluarea microdureții HV5
- Fig. 5.114. Valorile măsurate ale microdureții HV5 pentru îmbinare L_{mWP}
- Fig. 5.115. Pătrunderea maximă obținută cu procedeul WIG pulsat (aceeași configurație a rostului, aceeași parametri WIG și viteză mai mică decât cu procedeul L_{mWP})
- Fig. 5.116. Pătrunderea maximă obținută cu procedeul laser pulsat (aceeași configurație a rostului, aceeași parametri laser și viteză mai mică decât cu procedeul L_{mWP})
- Fig. 5.117. Treceri cu fascicul laser pe MMC nanostructurat (CuAlSi)
- Fig. 5.118. Treceri laser pulsat și WIG-laser pulsat MMC Fe-Cu-Si
- Fig. 5.119. Treceri WIG-laser pulsat 30%SiC + Al turnat și matritat
- Fig. 5.120. Treceri WIG-laser pulsat 30%SiC + Al turnat

LISTĂ DE TABELE

- Tabelul 2.1. - Eficiența relativă de îmbinare pentru diferite procedee de sudare
- Tabelul 2.2. - Comparație între procedeele de sudare (procesul hibrid și procesele componente)
- Tabelul 4.1. - Zona centrală de experimentare
- Tabelul 4.2. - Parametrii de proces investigați
- Tabelul 4.3. - Parametrii de proces pentru experimentările fără gaz de protecție
- Tabelul 4.4. - Setul de experimentări pentru verificarea cuplării frecvențelor cu variația vitezei de sudare
- Tabelul 4.5. - Parametrii specifici probelor laser-WIG pulsant
- Tabelul 4.6. - varianta laser-WIG pulsant
- Tabelul 4.7. - Influența vitezei pentru WIG-laser pulsant
- Tabelul 4.8. - Influența vitezei pentru laser-WIG pulsant
- Tabelul 4.9. - Influența frecvenței WIG la curent mediu 15A
- Tabelul 4.10. - Influența frecvenței WIG la curent mediu 20A
- Tabelul 4.11. - Influența frecvenței WIG la curent mediu 28A
- Tabelul 5.1. - Matrice program cuprinzând 6 factori de influență cu 2 nivele și 3 factori de influență cu 4 nivele
- Tabelul 5.2. - corespondența FI codificați - parametri de proces
- Tabelul 5.3. - Matricea de experimentare de tip Taguchi
- Tabelul 5.4. - Observațiile din timpul derulării programului experimental (matrice TAGUCHI)
- Tabelul 5.5. - Valorile măsurate ale FO
- Tabelul 5.6. - Valorile amplitudinii de variație a Pef și evaluarea diferențelor valorilor măsurători longitudinale / transversale
- Tabelul 5.7. - Matricea FO - FI a experimentului Taguchi
- Tabelul 5.8. - Matricea codificată a EFF derulat
- Tabelul 5.9. - Punctul central și domeniul de variație pentru EFF derulat
- Tabelul 5.10. - Matricea EFF cu valorile reale - corespondență număr încercare - număr probă
- Tabelul 5.11. - Observațiile din timpul derulării programului experimental EFF 2^{6-2}
- Tabelul 5.12. - Valorile măsurate ale FO pentru EFF 2^{6-2}
- Tabelul 5.13. - Valorile amplitudinii de variație a Pef și evaluarea diferențelor valorilor măsurători longitudinale / transversale
- Tabelul 5.14. Matricea codificată a experimentului de ordinul doi EFC 3^2
- Tabelul 5.15. - Matricea de experimentare reală EFC 3^2 și parametri de proces setați pe nivelele convenabile
- Tabelul 5.16. - Observațiile din timpul încercărilor EFC 3^2
- Tabelul 5.17. - Valorile măsurate ale FO pentru EFC 3^2
- Tabelul 5.18. - Coeficienții de regresie pentru modelele de ordinul 2
- Tabelul 5.19. - Comparație aspect vizual treceri sudate

1. INTRODUCERE

Dezvoltarea unor noi tehnologii și procese de prelucrare [86,118,122], îmbunătățirea celor existente [101] sau dezvoltarea unor noi echipamente de prelucrare și / sau componente pentru cele existente [9,29] sunt câteva din direcțiile principale de cercetare-dezvoltare în domeniul fabricației, alături de optimizarea tehnologiilor de prelucrare existente, focalizate către îmbunătățirea eficienței liniilor de producție și a calității produselor realizate de acestea.

Procesul de sudare hibrid LASER-ARC cu variațiile lui – LASER-GMA, LASER-WIG, LASER-PLASMĂ, etc. se înscrie în aceste direcții, fiind caracterizat de o dezvoltare accelerată și continuă către implementarea industrială [47,48,103,104] și extinderea aplicabilității acestuia, de ex. la realizarea unor îmbinări disimilare [6] sau la îmbinarea oțelurilor cu granulație ultrafină [43], prin cercetare focalizată pe înțelegerea și modelarea fenomenelor complexe ce caracterizează procesul de sudare hibrid [28,123,125], pe dezvoltarea și aplicarea unor modele care să permită investigarea influenței parametrilor de proces asupra rezultatelor prelucrării, de ex. pentru determinarea tensiunilor induse termic [65,66], dar și pentru dezvoltarea unor modele care să permită anticiparea rezultatelor procesării precum și instrumente pentru controlul acestora [10,23,25,88,108]. [16]

Din punct de vedere tehnologic, sudarea hibridă laser-arc este un procedeu care utilizează un ansamblu de două surse de energie ce interacționează, la care arcul electric își aduce aportul său de energie și eventual material topit de adaos, pentru cazul în care se utilizează material de adaos, iar fasciculul laser produce caracteristici specifice sudării cu fascicul laser în gaură de cheie – pătrunderea adâncă, stabilizarea arderii arcului electric și extinderea acestuia către rădăcina îmbinării, având ca rezultat îmbunătățirea reciprocă a stabilității proceselor și, implicit, creșterea productivității și eficienței [1,34,103], în comparație cu îmbinările realizate de fiecare procedeu separat.

Acest tip de tandem funcțional a două surse de energie, cu caracteristici extrem de diferite, în ceea ce privește modul de realizare a îmbinării sudate, a fenomenelor fizice specifice la interacțiunea cu materialele, a distribuției spațiale și temporale a energiei, dar și în ceea ce privește avantajele și dezavantajele tehnico-economice la implementarea în linii de producție, a primit și primește o atenție considerabilă datorită avantajelor oferite: viteze de prelucrare mai mari, pătrundere mai ridicată cu abilitate de îmbinare în rost mai larg, suprafață a sudurii cu aspect îmbunătățit corelate cu un număr mai redus de imperfecțiuni (de ex. reducerea porozității) – avantaje oferite în plus față de faptul că procedeu hibrid compensează / reduce dezavantajele specifice fiecărui procedeu în parte.

Pe de altă parte însă, avantajele ce sunt oferite de utilizarea acestui tandem funcțional, pot fi atinse doar în condițiile în care procesele componente și valorile parametrilor de proces (pentru procesul laser, pentru procesul arc și pentru ansamblul funcțional hibrid) sunt combinate corect [1,8,48,62,63,80,105,111].

Urmând aceste tendințe ce vizează domenii de vârf în cercetarea internațională, respectiv dezvoltarea și optimizarea proceselor de îmbinare, focalizat pe dezvoltarea de aplicații de sudare hibridă laser-arc în domeniul micro-prelucrării [67], a fost dezvoltat un nou procedeu de sudare hibrid [19] ce combină utilizarea

procedului de sudare cu fascicul laser în regim pulsant cu procedeul de sudare WIG pulsant [16,19], subiect de cercetare tratat în prezenta teză de doctorat.

Obiectivul principal al prezentei lucrări de doctorat este reprezentat de dezvoltarea acestui nou procedeu de sudare hibrid – **procedeul de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsant (LmWP)**, procedeu bazat pe combinarea și cuplarea a două surse de energie cu funcționare în regim pulsant: fascicul laser cu funcționare în regim pulsant (pw) și respectiv arc electric (micro)WIG pulsant.

Noul procedeu de sudare hibrid a fost dezvoltat ca o soluție în ceea ce privește atenuarea variației de pătrundere la sudarea cu fascicul laser în regim pulsant, un fenomen specific, cu aplicabilitate focalizată către realizarea de micro-îmbinări, ca o alternativă la procedeele clasice de sudare cu energii liniare introduse în material crescute, precum și pentru prelucrarea materialelor compozite micro și nano-structurate sinterizate.

Cercetările au fost focalizate pe conceperea și realizarea unui sistem experimental care să permită studierea și dezvoltarea noului proces de sudare hibrid, dar și dezvoltarea și optimizarea unor dispozitive care să permită realizarea unor capete de sudare hibride, caracterizarea, din punct de vedere fenomenologic și tehnologic-funcțional, a noului procedeu de sudare hibrid, identificarea principalelor caracteristici ce îl diferențiază de procedeele hibride laser-arc existente, obținerea de informații calitative în ceea ce privește influența parametrilor de proces asupra stabilității procesului de sudare, determinarea unor relații care să permită evaluarea influenței parametrilor de proces asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii, identificarea direcțiilor de optimizare funcțională și din punct de vedere a parametrilor de proces pentru minimizarea variației de pătrundere specifică sudării cu fascicul laser în regim pulsant, dar și în ceea ce privește abilitatea de sudare în rost larg la viteze crescute, precum și dezvoltarea unor soluții care să permită aplicarea industrială, în condiții de automatizare – robotizare a noului procedeu de sudare hibrid. Pentru verificarea rezultatelor obținute, au fost derulate experimentări tehnologice de sudare cu procedeul de sudare LmWP ca alternativă la procedeele de sudare cu arc electric pentru aplicații din domeniul industriei de material rulant, precum și efectuarea de experimentări exploratorii pe materiale compozite micro și nanostructurate pentru evaluarea îmbunătățirii comportării la sudare a acestora comparativ cu sudarea cu fascicul laser în regim pulsant.

Teza de doctorat este structurată în șase capitole, respectiv un capitol de sinteză și cercetare documentară completat de câteva contribuții personale și de prezentarea principiului noului proces de sudare hibrid LmWP, urmat de trei capitole conform logicii strategiei aplicate în cadrul procesului de cercetare – dezvoltare – conceperea și realizarea sistemului experimental pentru studierea și dezvoltarea procesului, caracterizarea noului proces de sudare hibrid și modelarea fenomenologică a acestuia, dezvoltări și optimizări ale noului proces de sudare hibrid finalizate cu validarea rezultatelor prin intermediul unor experimentări tehnologice de îmbinare cu acesta și experimentări exploratorii pe materiale avansate noi, urmate de capitolul ce include concluziile generale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare.

Capitolul 1 (capitolul prezent) include o introducere în tematica tezei de doctorat, prezentarea succintă a conținutului tezei de doctorat precum și prezentarea principalelor lucrări pe care se bazează conținutul tezei.

Capitolul 2, intitulat „**Sudarea hibridă laser-arc**”, prezintă o sinteză a cunoștințelor actuale și a direcțiilor principale de cercetare referitoare la procedeele de sudare hibride bazate pe combinarea și cuplarea sudării cu fascicul laser și sudarea cu arc electric. Sunt prezentate: conceptul pe baza căruia autorul a elaborat

o definiție acceptabilă pentru sudarea hibridă laser-arc, caracteristicile legate de transferul de energie și fenomenele sinergice ce apar precum și avantajele și dezavantajele procedurii. Este efectuată o sinteză cu privire la modelarea diferitelor variante ale procedurii de sudare hibrid laser-arc, pornind de la modele existente pentru procesele componente, completat de un model fenomenologic energetic elaborat de către doctorand. Sinteza este completată cu aspecte tehnologice specifice procedurilor de sudare hibride laser-arc, finalizate cu concluziile ce au stat la baza propunerii noului procedeu de sudare hibrid bazat pe combinarea și cuplarea procesului de sudare cu fascicul laser pulsant și respectiv (micro)WIG pulsant. Capitolul se încheie cu prezentarea principiului procesului LmWP.

Capitolul 3, intitulat **„Strategia de experimentare.Soluție constructivă sistem experimental pentru studierea și dezvoltarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsant”**, prezintă modul de abordare a cercetării-dezvoltării noului procedeu de sudare, ajustările concepute pentru studierea și dezvoltarea noului procedeu de sudare, a componentelor pentru realizarea unor ansamble cap hibrid precum și pe cele selectate pentru realizare și utilizare în cadrul programelor experimentale.

Capitolul 4, intitulat **„Procedeu de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsant”**, prezintă programul experimental, analizele și măsurătorile efectuate, pentru studiul dinamicii noului proces hibrid de sudare, caracterizarea acestuia, precum și modelele matematice experimentale determinate ale influenței parametrilor de proces WIG și ai geometriei hibride asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii. Pentru studiul dinamicii procesului de sudare hibrid, sistemul experimental, conceput și realizat, a fost completat cu două sisteme de achiziție video, precum și cu un sistem de înregistrare termografică pentru monitorizarea zonei procesate. De asemenea, este efectuată selecția variantei de proces care să fie optimizată în ceea ce privește atenuarea variației de pătrundere specifică sudării cu fascicul laser în regim pulsant – varianta cu procedeu WIG pulsant conducător.

Capitolul 5, intitulat **„Dezvoltări și optimizări ale procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsant”**, prezintă modul de optimizare a noului procedeu de sudare în două direcții: prima - optimizare funcțională prin conceperea și realizarea unor modificări ale sistemului experimental, precum și prin propunerea unei soluții pentru sincronizarea și respectiv controlul defazajului dintre cele două procese pulsante, a doua – optimizare din punct de vedere a parametrilor de proces – prin derularea unor programe experimentale bazate pe modelare statistică și design experimental bazat pe experimentul de tip factorial pentru identificarea influențelor principale asupra unor funcții obiectiv selectate ce caracterizează geometria rostului sudurii, dar și în ceea ce privește stabilitatea procesului și aspectul vizual al rezultatului procesării. Capitolul se încheie cu prezentarea experimentărilor tehnologice, pentru validarea rezultatelor programului experimental de optimizare, de sudare a tablelor subțiri acoperite din oțel de uz general, elaborate pe baza rezultatelor obținute în urma experimentărilor de optimizare a procesului, dar și cu prezentarea unor experimentări exploratorii pe materiale avansate noi.

Teza de doctorat este încheiată de capitolul 6 intitulat **„Concluzii, contribuții personale și direcții ulterioare de cercetare”**, ce sintetizează principalele concluzii ale tezei de doctorat, enumeră principalele contribuții personale ale doctorandului și trasează câteva direcții viitoare de cercetare bazate pe rezultatele obținute.

Unele din rezultatele obținute în cadrul cercetărilor s-au constituit în subiecte ale mai multor lucrări științifice făcute publice precum și în teme obiect a două cereri de brevetare.

Conținutul tezei se bazează în principal pe rezultatele obținute în cadrul proiectului „Studiul procesului de sudare hibrid laser – WIG / microWIG în regim pulsant (laser pulsant și respectiv WIG pulsant)” – proiect PN – ISIM 09-160101 în cadrul Programului Nucleu ISIM, proiect la care doctorandul a fost manager de proiect, iar o parte din principalele rezultate prezentate în teză au fost publicate / prezentate în:

- **Bîrdeanu, A.-V.**, & Savu, S. (2006). Stadiul actual și tendințe în dezvoltarea procedurii de sudare hibrid laser-arc. *Lucrările Conferinței Internaționale a ASR “Managementul Calității în Domeniul Sudării, în Contextul Aderării României la Uniunea Europeană”* (pp. 100-114). Brașov: Editura Sudura, Timișoara, 2006. Retrieved from www.asr.ro
- **Bîrdeanu, V.**, Dehelean, D., & Savu, S. (2009). Laser – TIG hibrid micro-welding process developments. *BID - ISIM Welding & Material Testing*, (4), 37-42. Retrieved from http://www.bid-isim.ro/bid_arhiva/bid2009/birdeanu4_2009.pdf
- **Bîrdeanu, A.-V.**, Ciucă, C., & Iacob, M. (2011). Pulsed LASER-TIG hibrid welding of coated unalloyed steel thin sheets. *BID - ISIM Welding & Material Testing*, (2), 31-34. Retrieved from http://bid-isim.ro/bid_arhiva/bid2011/birdeanu-2_2011.pdf
- **Bîrdeanu, A.-V.**, Ciucă, C., & Puicea, A. (2012). Pulsed LASER-(micro)TIG hibrid welding: Process characteristics. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(4), 890-902. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.11.014 (**revistă cu factor de impact - 2011: 1.783; 5-Y: 1.881**)
- Murariu, A. C., **Bîrdeanu, A.-V.**, Cojocaru, R., Safta, V. I., Dehelean, D., Boțilă, L., & Ciucă, C. (2012). Application of Thermography in Materials Science and Engineering. In R. V. Prakash (Ed.), *Infrared Thermography* (pp. 27-52). InTech. doi:10.5772/1353

Principalele proiecte pe baza cărora au fost obținute rezultatele prezentate în teza de doctorat au fost:

- Sensor controlled laser-welding robot for 3-d seam welding – SENSELASBOT – proiect FP5;
- Sisteme de microîmbinare pentru elemente de circuit și încapsulare ale microsenzorilor și actuatorilor – proiect PNCDI2;
- Sistem integrat de determinare a sudabilității cu fascicul laser a materialelor polimerice, de monitorizare și control în timp real a procesului de sudare – proiect PNCDI2;
- Studiul procesului de sudare hibrid laser – WIG / microWIG în regim pulsant (laser pulsant și respectiv WIG pulsant) – proiect PN – ISIM 09-160101 în cadrul Programului Nucleu ISIM.

Titlul în engleză al celor **două cereri de brevet** depuse și acceptate, pentru evaluare, de către OSIM:

- **Bîrdeanu, A. V.**, Pulsed LASER - TIG welding process, A / 01292/ 2010
- **Bîrdeanu, A. V.**, Verbițchi, V., System for monitoring and phase shift control for tandem pulsed LASER - TIG welding process, A / 01291/ 2010

2. SUDAREA HIBRIDĂ LASER-ARC

2.1. Conceptul „sudare hibridă LASER – ARC”

Procedeele de sudare cu arc electric ca și cele de sudare cu fascicul laser sunt de multă vreme implementate în industrie și acoperă o gamă relativ largă de utilizare, fiecare din aceste procedee având aplicații specifice, caracterizate de procesele fizice ce intervin, precum și de modul de transfer al energiei în material, corelate cu densitățile de energie ce pot fi realizate.

Se poate face o comparație între diferitele procedee de sudare, utilizând criteriul eficienței de îmbinare în ceea ce privește mm^2 de arie sudată, în direcție longitudinală (direcția de sudare), în funcție de kJ de energie furnizată. Eficiența sudării poate fi astfel definită [106]:

$$\text{unde } \quad \quad \quad Vt/P \quad \quad \quad (2.1)$$

- V = viteza de sudare, mm/s
- t = grosimea sudată, mm
- P = puterea incidentă, kW

Relația (2.1) poate fi utilizată pentru exprimarea eficienței procesului de sudare deși nu ține cont de volumul de material topit, deoarece privește procesul tehnologic de îmbinare din punct de vedere practic – un proces de sudare este cu atât mai eficient cu cât utilizează mai puțină energie la realizarea conturului de îmbinare necesar.

Deși, conform tabelului 2.1, eficiența procesului de sudare cu fascicul laser, definită de ecuația 2.1, nu are valoarea cea mai mare, comparativ cu alte procedee de sudare, ($15\text{-}25\text{mm}^2/\text{kJ}$ pentru laser comparativ cu $20\text{-}30\text{mm}^2/\text{kJ}$ pentru sudarea cu fascicul de electroni (EBW) și respectiv $65\text{-}100\text{mm}^2/\text{kJ}$ pentru sudarea cu curenți de înaltă frecvență) [106], una din caracteristicile remarcabile ale sudării cu fascicul laser a materialelor – „efectul de pătrundere adâncă”, adică obținerea unor îmbinări sudate cu un raport geometric lățime sudură – adâncime de penetrare subunitar, datorită concentrării energiei fasciculului laser pe o suprafață extrem de mică, corelată cu viteze de sudare ridicate și deci caracterizate de o energie liniară introdusă în material mică, dar și alte avantaje ale procesului precum și dezvoltarea unor noi echipamente laser cu prețuri relativ reduse fac procedeul de sudare cu fascicul laser tot mai atractiv pentru implementarea industrială.

Foarte multe aplicații uzează de acest avantaj – realizarea de îmbinări sudate înguste la viteze de sudare mari, dar pentru majoritatea aplicațiilor procedeul de sudare cu fascicul laser ridică problema pregătirii rosturilor pentru realizarea îmbinării. Pe de altă parte, creșterea productivității și a eficienței proceselor de sudare este o constantă a cercetării în domeniul sudării. Principale soluții aduse de cercetători sunt legate de introducerea de noi procedee de sudare caracterizate prin rate de depunere și viteze de sudare ridicate, dezvoltarea de noi variante ale procedeelelor de sudare existente, mecanizarea/automatizarea/robotizarea proceselor de sudare și dezvoltarea de noi materiale de sudare caracterizate prin rate de topire

ridicate și randamente mari. În acest context a fost studiată posibilitatea combinării procedeelor de sudare, iar una dintre variantele utilizate a fost combinarea procedeelor de sudare cu fascicul laser cu procedeele de sudare cu arc electric. Dacă cercetările inițiale, în această direcție, au vizat creșterea abilității de îmbinare în rost larg pentru procedeul de sudare cu fascicul laser, aducerea în contact a celor două procedee a relevat apariția unor fenomene sinergice ce permit optimizarea și compensarea deficiențelor fiecărui procedeu în parte precum și la creșterea numărului gradelor de libertate pentru adaptarea procedeului de sudare.

Tabelul 2.1. - Eficiența relativă de îmbinare pentru diferite procedee de sudare [106]

PROCES	Eficiența aproximativă a sudării (mm ² /kJ)
Sudare cu flacăra oxiacetilenică (OFW)	0,2-0,5
Sudare cu electrozi înveliți (MMA)	2 -3
Sudare WIG	0,8-2
Sudare sub strat de flux (SAW)	4-10
Sudare cu curenți de înaltă frecvență	65-100
Sudare cu fascicul de electroni (EBW)	20-30
Sudare cu fascicul laser (LBW)	15-25

Din punct de vedere istoric procedeul hibrid a fost investigat în anii 70 [105] și a revenit în atenția cercetătorilor în ultimii ani, în principal, datorită interesului față de aplicarea industrială a sudării cu fascicul laser. Cercetările inițiale au fost desfășurate fără aducerea în contact a celor două procese – procedeul combinat, dar fenomenele sinergice observate la apropierea acestora au deschis o nouă direcție de cercetare – procedee de sudare hibride LASER – ARC (fig. 2.1.). Aceste fenomene sinergice permit, pe lângă utilizarea avantajelor oferite de fiecare procedeu în parte, compensarea dezavantajelor fiecărui procedeu în parte și astfel creșterea eficienței procedeului hibrid comparativ cu însumarea eficiențelor pentru cele două procedee de sudare (2.2).

$$Ef_{LAHW} > Ef_{LBW} + Ef_{GMA} \quad (2.2)$$

Expresia (2.2) include atât date cu privire la productivitatea legată de vitezele de sudare ridicate, dar și referitoare la pătrunderea sudurii, eficiența energetică (consumul energetic) și respectiv calitatea și stabilitatea procesului de sudare concretizată în reducerea operațiilor ulterioare de prelucrare și/sau reducerea rebuturilor.

Pe baza celor prezentate, poate fi dată o definiție acceptabilă a procedeului de sudare hibrid LASER – ARC: „procedeul de sudare hibrid laser-arc se bazează pe combinarea și cuplarea acțiunii radiației laser (de ex. CO₂ sau Nd:YAG) cu procesul de descărcare electrică în arc (WIG, plasmă sau MIG/MAG) într-o singură zonă de procesare (plasmă și material topit) ceea ce duce la apariția unor fenomene sinergice, făcând posibilă evitarea dezavantajelor ce le implică fiecare proces în parte și utilizarea avantajelor specifice acestora” [14].

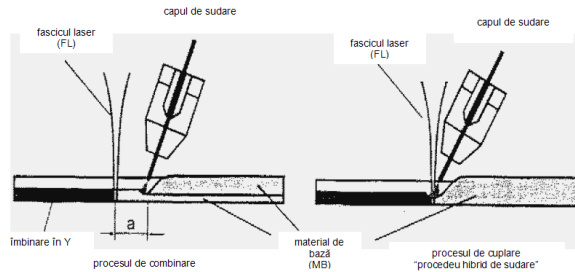


Fig. 2.1. Combinarea și respectiv cuplarea celor două procese de sudare (după [105])

Deși procesul hibrid a demonstrat imediat caracteristici îmbunătățite în comparație cu fiecare proces în parte, această inovație nu și-a găsit imediat aplicații practice în industrie datorită faptului că procedeul laser nu era încă adecvat pentru utilizare pe scară industrială. În anii 80 sudarea cu fascicul laser a devenit un procedeu adecvat din punct de vedere al implementării industriale [117], datorită dezvoltării surselor laser la un preț relativ redus și de puteri mari, iar faptul că dezavantajele procedeeului puteau fi reduse prin utilizarea unei surse de sudare convenționale cu arc electric a relansat cercetările asupra procedeeului hibrid laser - arc.

Implementarea industrială a procedeeului hibrid a urmat trendul din anii 80 și în anii 90 [117] cu îmbunătățiri continue a echipamentelor laser de putere, iar dezvoltările procedeeului hibrid au demonstrat avantajele implementării la scară industrială. Posibilitățile de implementare și limitările procedeeului au fost studiate intens studiate în toată lumea, iar dezvoltarea sa a cunoscut o accelerare puternică odată cu implementarea în industria construcțiilor sudate ce necesită suduri de calitate ridicată la viteze mari. Procedeul de sudare hibrid laser - arc a devenit un subiect fierbinte în domeniul prelucrării cu fascicul laser, alte domenii industriale devenind interesate: industria auto și navală.

La ora actuală sunt dezvoltate capete integrate specializate hibride, iar procedeul hibrid laser - arc este utilizat pentru multe aplicații industriale. Astfel, din punct de vedere al aplicării industriale a procedeeului pot fi menționate aplicații de succes în domeniul industriei navale [116], [32], [47], auto [34], [102], [48], dar și la sudarea unor oțeluri speciale [56], [5] și a conductelor petroliere [109], [47].

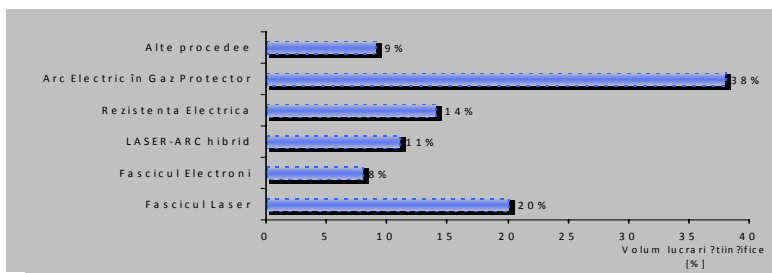


Fig. 2.2. Volumul de „producție științifică” corelat cu principalele procedee de sudare [76]

Se poate observa că procedeul este aplicat cu predilecție la aplicațiile cu îmbinări de lungime și grosime mare specifice construcțiilor navale (de exemplu, la șantierul Meyer - Werft din Germania mai mult de 50% din îmbinări sunt sudate cu procedeul hibrid LASER-MIG), dar și în domenii în care aplicarea unui proces de sudare este mai eficientă în formă mecanizată sau automatizată (industria chimică și

petrochimică, construcția echipamentelor de ridicat, vehicule industriale, construcția de mașini, etc.) precum și în domeniul microîmbinărilor (realizare de tubulatură cu grosimi relativ reduse).

Sudarea hibridă ocupă în acest moment un loc important în cadrul proceselor de îmbinare aplicate industrial [14], acest fapt fiind dovedit de numărul relativ mare al documentelor Institutului Internațional de Sudură prezentate în cadrul întrunirilor anuale și a conferințelor internaționale de la Praga (Cehia) – 2005, Quebec (Canada) – 2006, Dubrovnik (Croatia) – 2007 și Graz (Austria) – 2008, iar un studiu relativ recent - *Fields of research/welding – courtesy Middeldorf and Lehman, IIW Quebec, 2006* cu privire la volumul de producție științifică legată de principalele procedee de sudare arată că, deși implementarea industrială a proceselor de sudare hibride laser-arc a început relativ recent, volumul lucrărilor științifice ce tratează acest procedeu este de 11% din volumul total (fig. 2.2.) ceea ce demonstrează avantajele importante oferite de implementarea industrială acestor procese și interesul cercetărilor în studierea acestor procedee de sudare concretizate în această creștere rapidă.

2.2. Caracteristicile procesului de sudare hibrid LASER – ARC

Procesul de sudare hibrid laser - arc prezintă elemente care îl diferențiază atât de procedeele de sudare neconvenționale (sudare cu fascicul laser, sudare cu fascicul de electroni, sudare cu plasmă) cât și de procedeele de sudare convenționale (sudare în mediu de gaz protector) prin faptul că fenomenele sinergice ce au loc permit evitarea dezavantajelor specifice celor două procedee componente și utilizarea avantajelor oferite de acestea.

2.2.1. Transferul de energie

Cele două procedee de sudare sunt caracterizate de moduri distincte de transfer a energiei: în cazul procedeeului de sudare cu fascicul laser transferul energiei dintre fasciculul laser și material are loc prin intermediul unei radiații coerente (fig. 2.3.), pe când arcul electric transferă căldura necesară sudării prin intermediul unui curent electric care circulă spre piesa de lucru prin plasma generată, denumită “coloana arcului” (fig. 2.4.).

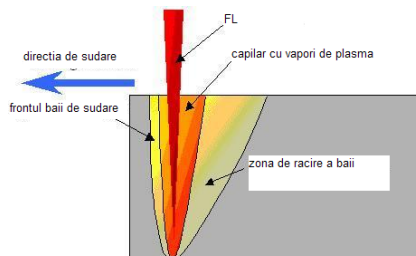


Fig. 2.3. Sudarea cu fascicul laser

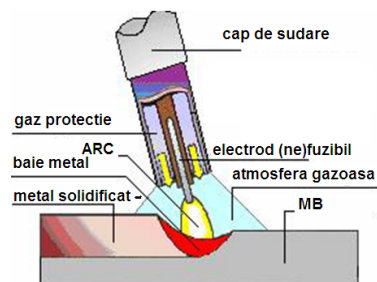


Fig. 2.4. Sudarea cu arc electric

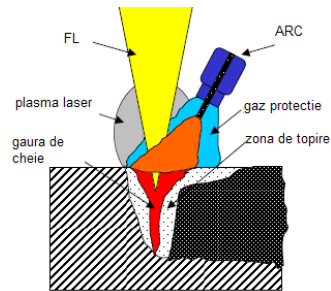


Fig. 2.5. Sudarea hibridă LASER - ARC

În situația aducerii în contact a celor două procese (fig. 2.5.), în ecuația bilanțului energetic, energia termică transferată în material nu este o sumă a energiilor transferate de către cele două procese separat datorită apariției fenomenelor sinergice, fiecare dintre procedee influențându-l pe celălalt.

2.2.2. Fenomene sinergice

Fenomenele fizice sinergice specifice procedurii de sudare hibrid laser - arc stau la baza avantajelor oferite de acest procedeu. Odată cu reducerea distanței dintre cele două procese sub o distanță limită, cele două procese interacționează și se influențează reciproc astfel:

- plasma generată de fasciculul laser este preluată în circuitul descărcării electrice ceea ce duce la scăderea rezistivității acestuia; în același timp arcul electric este atras spre pata focală îmbunătățind stabilitatea arcului; aportul termic suplimentar al laserului duce la evitarea fenomenului de contracție al arcului electric
- preluarea în circuitul electric a plasmii generate de fasciculul laser precum și „preîncălzirea” materialului de către arcul electric duc la creșterea coeficientului de absorbție (crește cuplajul energetic fascicul laser – material) și în consecință la creșterea adâncimii de penetrare a fasciculului laser.

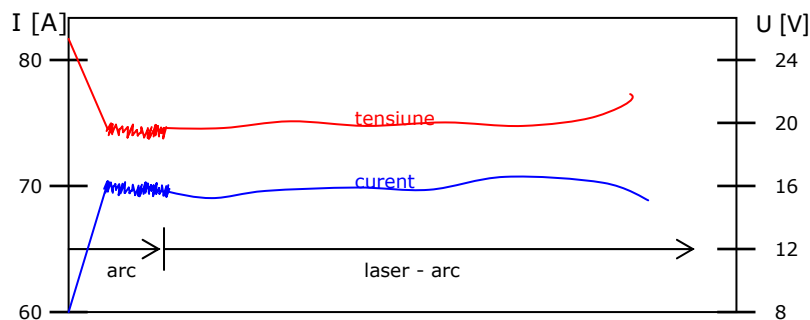


Fig. 2.6. Stabilizarea descărcării electrice în arc la cuplarea hibridă a celor două procese [112]

Rezistența electrică a arcului electric de sudare este dependentă de intensitatea curentului furnizat de sursa de alimentare a echipamentului și de gradul

de ionizare al mediului de protecție utilizat. Prezența plasmei generate de fasciculul laser în apropierea descărcării electrice în arc produce o ionizare suplimentară, dar și creșterea numărului de purtători de sarcină ce se deplasează prin spațiul de arc electric. Aceste fenomene produc o creștere a conductivității și implicit la reducerea căderii de tensiune pe arcul electric deci la reducerea pierderilor cauzate de căderile de tensiune pe elementele circuitului electric.

Verificarea acestor ipoteze a fost efectuată experimental prin trasarea caracteristicii volt-ampere [112] pentru varianta laser - WIG (fig. 2.6.). În plus rezultatele obținute au fost propuse pentru implementarea la sudarea WIG clasică prin utilizarea unui laser de putere redusă doar în scopul creșterii stabilității arcului electric.

Stabilizarea arcului electric la cuplarea hibridă are o importanță deosebită la sudarea cu curenți mici (fig. 2.7.) sau în situația existenței unui câmp magnetic asimetric (fig. 2.8.). [52]

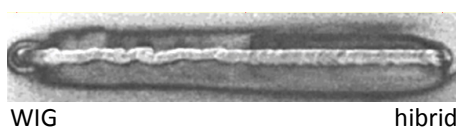


Fig. 2.7. Stabilizarea arcului WIG la curenți mici datorită fasciculului laser [52]

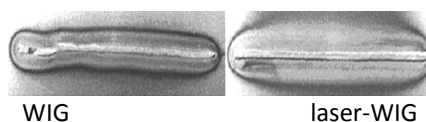


Fig. 2.8. Stabilizarea arcului WIG în condiții de câmp magnetic asimetric datorită fasciculului laser [52]

Experimente similare [81] pentru varianta laser - MAG au relevat creșterea stabilității tensiunii arcului (fig. 2.9.) reflectată în forma stabilă a sudurii la viteze crescute (fig. 2.10.).

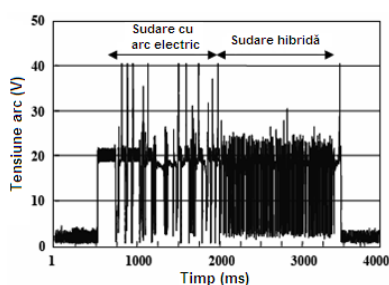


Fig. 2.9. Stabilizarea arcului (laser-MAG) [81]

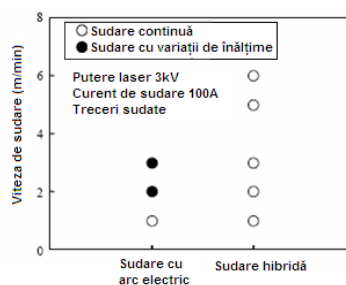


Fig. 2.10. Stabilizarea forme sudurii [81]

Creșterea stabilității procesului la viteze crescute este datorată, de asemenea fenomenelor sinergice ce apar: dacă pentru sudarea cu arc electric emisia termică scade odată cu creșterea vitezei de sudare datorită scăderii temperaturii, densitatea de electroni din gaura de cheie formată de fasciculul laser combinată cu emisia termică permit păstrarea descărcării în arc în regim stabil, iar concentrarea arcului într-o zonă de dimensiuni reduse (în zona petei focale) concentrează energia arcului și produc topiri fine de material cu frecvență mare.

Se menționează de asemenea [110], [99] că pentru varianta laser-MAG cuplarea celor două procese duce la scăderea numărului scurtcircuitelor odată cu creșterea puterii fasciculului laser precum și la stabilizarea petei catodice, aceste două fenomene reducând stropirile, crescând astfel, în mod semnificativ, productivitatea și eficiența procesului de îmbinare.

2.2.3. Avantaje și dezavantaje

Fasciculul laser se pretează la o varietate de tehnologii pentru îmbinarea prin sudare, brazare sau lipire a unei game foarte largi de materiale (metalice, nemetalice, plastice, compozite, etc.) [12,17,20,21,92-95,97,98], dar și pentru alte aplicații similare, cum ar fi generarea formei prin sudare [84] sau realizarea de (micro)straturi (multi)funcționale [83,91]. Pe lângă flexibilitatea ridicată a procedului și posibilitatea controlului procesului [13], în condiții de automatizare – robotizare, o caracteristică importantă a acestui procedeu este posibilitatea controlării energiei introduse în material, la viteze relativ mari de sudare. În general această caracteristică duce la o zonă topită îngustă cu un raport pătrundere – lățime a sudării relativ mare ceea ce poartă numele de "deep weld efect" – efectul de pătrundere adâncă. Pe de altă parte, din cauza diametrului foarte mic al spotului fasciculului laser abilitatea de îmbinare prin sudare în rost larg este scăzută și de aceea pregătirile pentru îmbinare trebuie să fie făcute foarte atent cu toleranțe reduse pentru a evita defecte de genul concavitate a sudurii sau topire redusă a pereților laterali ai îmbinării.

Utilizarea materialelor de adaos la sudarea cu fascicul laser nu și-a găsit decât o utilizare redusă datorită reducerii considerabile a vitezelor de sudare precum și datorită faptului că se pierde din robustețea procedului, deși în ultima perioadă se poate constata o creștere a interesului pentru această variantă [2,11,22,33,35,45,115] datorită tendințelor actuale de utilizare a aliajelor ușoare, în special în industria auto, fapt ce implică realizarea unor îmbinări între materiale disimilare, iar sudarea/brazarea cu fascicul laser cu material de adaos pare a fi o variantă adecvată pentru aceste aplicații. În ceea ce privește investiția inițială mare la implementarea sudării cu fascicul laser, mai ales pentru laserii de putere mare, dezvoltările actuale concentrate pe laserii cuplați cu fibră optică [24], vor permite în viitorul apropiat reducerea costului pe kW putere de ieșire a echipamentelor industriale laser, una dintre aplicațiile cele mai interesante pentru acești laseri fiind sudarea [77,82,87,114].

În cazul procedeeleor de sudare cu arc electric densitățile de energie mult mai mici duc la viteze mai reduse de sudare, diametrul arcului pe suprafața materialului fiind, în general, mult mai mare față de procedeu de sudare cu fasciculul laser. Ca rezultat, sudura este mai lată decât în cazul procedului de sudare cu fascicul laser astfel încât energia introdusă și abilitatea de îmbinare cu rost larg sunt mai ridicate pentru o dimensiune comparabilă a pătrunderii. În același timp, tehnologiile de sudare cu arc electric oferă avantajul unui randament ridicat (aproximativ 80%), dar și investiții reduse. Pe de altă parte, pătrunderea este limitată (fapt ce implică în cele mai multe situații utilizarea trecerilor multiple), iar îmbinarea sudată este caracterizată de un raport scăzut pătrundere – lățime a sudării. Restrângerea aplicațiilor acestor procedee este dată de vitezele de sudare scăzute în strânsă legătură cu expunerea sudurii și a componentelor îmbinate la energii termice ridicate.

Tabelul 2.2. – Comparație între procedeele de sudare (procesul hibrid și procesele componente)

SUDAREA CU FASCICUL LASER	
AVANTAJE	DEZAVANTAJE
Viteză mare de sudare	Investiție inițială relativ mare
Energie liniară introdusă în material scăzută	Abilitatea de îmbinare în rost deschis scăzută implică toleranțe ridicate la pregătirea rostului
ZIT redus	Porozități în sudură
Adâncimea de pătrundere mare	Risc de apariție a fisurilor
Raport geometric al îmbinării – adâncime de penetrare / lățimea sudurii supraunitar	Cuplarea fascicul laser – material poate fi ecranată de plasma indusă laser
Îmbinare dintr-o singură trecere („one shot process”)	Necesită instalații laser de putere mare
Distorsiuni reduse	Randament scăzut de producere a fasciculului laser (2% pentru laserii CO ₂ , 10% pentru laserii Nd:YAG)
Posibilitatea realizării îmbinărilor din materiale disimilare	
Prelucrări post-sudare relativ reduse	
Cost per metru de sudură redus	
SUDAREA ÎN MEDIU DE GAZ PROTECTOR	
AVANTAJE	DEZAVANTAJE
Investiție inițială relativ scăzută	Viteză mică de sudare
Abilitate de îmbinare în rost deschis bună	Pătrundere mică
Posibilitatea influențării metalurgice a sudurii prin intermediul materialului de adaos	Energie liniară introdusă în material mare
Randament ridicat al instalațiilor (60-80%)	ZIT și distorsiuni ale materialului mari
	În general sudarea se realizează din mai multe treceri
SUDAREA HIBRIDĂ LASER – ARC	
AVANTAJE	DEZAVANTAJE
Creșterea stabilității procesului de sudare	Complexitatea fenomenelor fizice și creșterea numărului parametrilor de proces implică un volum de cercetare mai mare pentru optimizarea procesului de sudare Necesitatea implementării sudării automatizate/robotizate ce implică și costuri suplimentare (avantaj ținând cont de creșterea productivității procesului).
Eliminarea porozităților	
Îmbunătățirea calității sudurii	
Îmbunătățirea geometriei sudurii	
Abilitate de îmbinare în rost deschis crescută	
Adâncime de pătrundere mare	
Viteză mare de sudare	
Procedeu de sudare dintr-o singură trecere	
Reducerea investiției comparată cu investiția pentru sudarea cu fascicul laser (cu 30-40%)	
Posibilitatea controlării lățimii sudurii	
Durificări mai reduse	
Eficiență electrică îmbunătățită (reducere cu până la 50% a energiei electrice consumate)	
Flexibilitate ridicată	

Procedeu de sudare hibrid laser-arc îmbină avantajele oferite de dezvoltările din domeniul instalațiilor cu fascicul laser și ale echipamentelor de sudare cu arc electric prin optimizarea și compensarea deficiențelor fiecărui procedeu în parte, dar și prin la mărirea gradelor de libertate în ceea ce privește controlul procesului. Sintetic, principalele avantaje obținute prin cuplarea hibridă a celor două procedee comparativ cu procedeele componente, precum avantajele și dezavantajele fiecărui procedeu în parte sunt prezentate în tabelul 2.2, iar sugestiv în fig. 2.11.

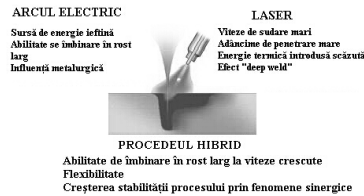


Fig. 2.11. Avantajele procedurii de sudare hibrid [103]

Avantajele obținute prin cuplarea celor două procese sunt explicate de fenomenele sinergice ce apar urmate de îmbunătățirea cuplajului energetic al fasciculului laser cu materialul de bază precum și îmbunătățirea stabilității arcului electric. În ceea ce privește flexibilitatea ridicată oferită de procedeu această constă în combinarea cu diferitele variante ale procedurii de sudare cu arc electric (MIG-MAG, WIG, plasmă, cu două sârme, etc.) precum și în controlul procesului prin combinațiile multiple ale parametrilor de proces.

2.3. Aspecte ale modelării proceselor de sudare hibride laser-arc

2.3.1. Generalități

Fenomenele fizice ale interacțiunilor ce intervin la cuplarea celor două surse termice (fasciculul laser și arcul electric) sunt foarte complexe, iar pentru evidențierea acestora este necesar să fie înțelese principalele fenomene fizice ale sudării cu fascicul laser și ale sudării cu arc electric separat, precum și a modelării acestor două procese. În acest sens, în următoarele subcapitole se va face o trecere în revistă a principalelor modele utilizate în cazul celor două procedee: sudarea cu fascicul laser și respectiv sudarea cu arc electric.

Modelele dezvoltate de diverși autori, pentru procesarea cu cele două procedee distincte, pornesc de la ecuația căldurii în formă diferențială utilizând metode analitice cu ipoteze simplificatoare corelate cu condițiile specifice de prelucrare termică.

$$\rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (K \vec{\nabla} T) + Q_w(x, y, z, t) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_0 c_p T \vec{V}) \quad (2.3)$$

unde:

- $K = \rho_0 c_p k$
- Q_w - este fluxul de căldură
- $\rho_0 c_p T \vec{V}$ este densitatea de căldură de convecție

2.3.2. Modele utilizate la sudarea cu fascicul laser

Sudarea cu fascicul laser se bazează, în principal, pe evaporarea materialului de bază pentru a produce un capilar de vapori (gaura de cheie). În funcție de tipul laserului – în funcționare continuă (cw) sau pulsat (pw) avem a face

cu o situație quasi-staționară – gaura de cheie este susținută de presiunea vaporilor ce sunt produși de interacțiunea cu fasciculul laser - sau nu – gaura de cheie este produsă de pulsările laser și închisă pe durata pauzelor dintre pulsuri funcție de frecvența de repetiție.

Pentru sudarea cu fascicul laser în regim continuu, în situația în care este stabilită o gaură de cheie quasi-staționară, câmpul de temperatură este determinat de conducția energiei fasciculului laser absorbită și distribuită la nivelul pereților găurii de cheie, dar și de convecția legată de deplasare și dinamica băii de metal topit.

Pentru viteze de sudare constante, modelul cel mai uzual este reprezentat de surse de căldură punctuale mobile (2.4) sau surse de căldură liniare mobile (2.5) [36,106].

$$T(x, y, z) = T_a + \frac{2AP_L}{Kr} \exp\left(-\frac{v(x+r)}{2k}\right) \quad (2.4)$$

unde:

- $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$
- A – absorbantă (%)
- P_L – puterea fasciculului laser
- K – conductivitatea termica
- v – viteza de sudare
- κ – difuzivitatea termică

$$T(x, y) = T_a + \frac{AP_L}{d2\pi K} \exp\left(-\frac{vx}{2k}\right) K_0\left(-\frac{v\sqrt{x^2 + y^2}}{2k}\right) \quad (2.5)$$

unde:

- d – diametrul FL
- $K_0(\)$ – funcția Bessel de speța a doua și ordin zero modificată

Ambele modele nu dau rezultate în apropiere de sursa de căldură datorită singularității din origine, iar acest neajuns poate fi evitat prin utilizarea unei surse termice Gaussiene (2.7), similara unei distribuții Gaussiene a fasciculului laser (2.6).

$$I(x, y) = \frac{2P}{\pi d^2} e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{d^2}} \quad (2.6)$$

$$Q_w(x', y', z', t') = \frac{4A P_L}{\pi r_F^2} \exp\left[-2\left(\frac{x'^2}{r_F^2} + \frac{y'^2}{r_F^2}\right)\right] \delta(z') \tau(t') \quad (2.7)$$

unde τ este funcția Heavyside și are valoarea 0 pentru $t < 0$ și 1 pentru $t \geq 0$, iar δ este funcția delta Dirac

Unul dintre modele ce consideră majoritatea mecanismelor la sudarea cu fascicul laser a fost dezvoltat de Kaplan și colaboratorii [57]; [59] va fi prezentat în

continuare. Modelul elaborat, are la bază principalele fenomene produse la sudarea cu fascicul laser și relațiile complexe dintre acestea, atât pentru cele trei stări succesive ale materialului prelucrat (solidă, lichidă, gazoasă): generarea câmpului termic și transferul de căldură (absorbția, conducția și convecția, convecția la suprafață și radiația, transformările de fază, conducția specifică fascicului pulsant, geometria băii topite), curgerea materialului topit, fenomenele fizice în gaura de cheie precum și influența câmpurilor electromagnetice.

Modelul elaborat are la bază generarea parțială a căldurii la absorbția fascicului laser de către materialul de prelucrat în cele trei stări, luând în considerare principalul mecanism de absorbție – absorbția directă a fascicului laser pe peretele găurii de cheie, dar și absorbția datorată împrăștierii multiple, absorbția directă în plasma metalică și la suprafața piesei precum și pierderile inerente ale energiei fascicului. Pentru modelarea unor surse termice echivalente (de exemplu sursă punctuală sau liniară în mișcare) cea mai simplă metodă aplicată este utilizarea unei energii absorbite echivalente prin stabilirea unui coeficient de absorbție relativ. Pe baza acestor surse echivalente au fost dezvoltate modele cu surse suprapuse (fig. 2.12.), pentru a ține cont de conducție și absorbția la suprafața găurii de cheie [107], dar fără a calcula distribuția temporală și spațială a puterii absorbite ținând cont de variația coeficientului de absorbție de caracteristicile optice ce depind de material, lungimea de undă a fascicului laser, de temperatură precum și de incidența fascicului. Aceste tipuri de modele utilizează un număr mare de simplificări, dar s-au dovedit a fi corespunzătoare pentru mai multe situații complexe ca de exemplu sudarea laser prin conducție sau cu penetrare adâncă parțială (fig. 2.13.) cu obținerea unor câmpuri de temperatură și viteze de răcire realiste ce permit evaluarea comportării metalurgice a materialelor prelucrate cu fascicul laser [36].

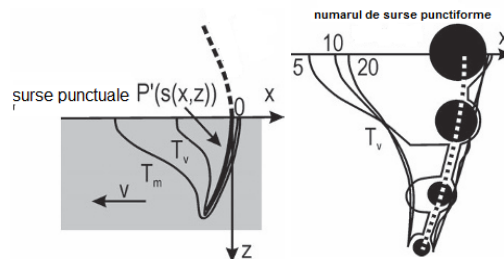


Fig. 2.12. Exemple de utilizare surse punctiforme suprapuse pentru modelarea și simularea câmpului termic la sudarea cu fascicul laser [36]

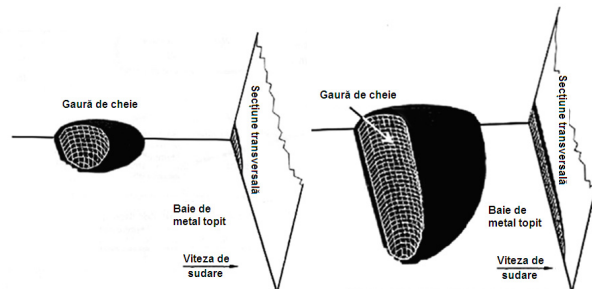


Fig. 2.13. Forma calculată a băii de material topit pe baza suprapunerii surselor termice punctiforme în mișcare [36]

Kaplan și colaboratorii, ia în considerare această variație a coeficientului de absorbție, dar și modificările produse de topografia și starea chimică a suprafeței materialului pentru dezvoltarea unui model matematic semi-analitic.

Un alt tip de sursă utilizată pentru modelarea analitică a procesului de sudare cu fascicul laser este sursa cilindrică sau eliptică suprapusă peste secțiunea transversală a găurii de cheie, având temperatura la suprafață constantă cu rezultate remarcabile prin utilizarea metodelor de calcul numerice sau cu element finit.

În situația sudării cu fascicul laser în regim pulsant, situație ce va fi întâlnită în cazul procedurii de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsant, procedeu dezvoltat în cadrul studiului doctoral, sunt produse situații și condiții tranzitorii cu variații puternice, dar în cele mai multe situații fenomenologia ar putea fi prezentată prin utilizarea condițiilor quasi-staționare. De asemenea, studii referitoare la sudarea cu fascicul laser în regim pulsant [42], prin dezvoltarea unui model ce ține cont de variabilele dependente de temperatură precum și distribuția de intensitate a laserului cu utilizarea metodei elementului finit și validarea experimentală, au demonstrat faptul că dimensiunea sudurii depinde puternic de distribuția energiei laser și a absorbivității.

O soluție pentru ecuația conducției căldurii a fost dezvoltată prin dilatarea soluțiilor stărilor staționare a surselor de căldură în mișcare [58]. Acest model permite calcularea câmpului termic de conducție discretizat pentru sudarea "single-pulse" ținând cont de gradul de absorbție a suprafeței funcție de spațiu și timp, prin suprapunerea unor surse inelare de căldură (fig. 2.14.):

Utilizarea unui astfel de model a permis stabilirea domeniilor de topire și respectiv evaporare și variația acestora în timp. (fig. 2.15.)

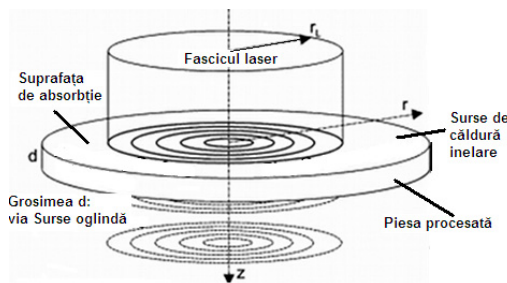


Fig. 2.14. Modelul matematic și geometria pentru încălzirea pulsantă a unei piese infinite de o sursă laser circulară [58]

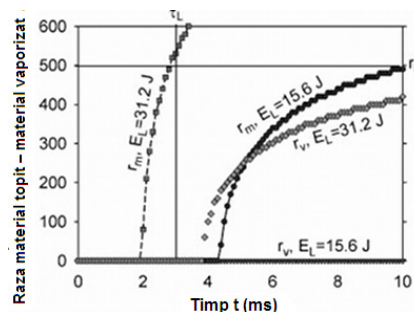


Fig. 2.15. Razele de evaporare (r_v) și respectiv topire (r_m) calculate pentru două energii ale pulsului (E_L) [58]

Pe baza acestui model, a fost stabilită o teorie a procesului în trepte, ce ține cont de situația cea mai des întâlnită la sudarea metalelor – o suprafață cu un coeficient de reflexie mare (fig. 2.16.).

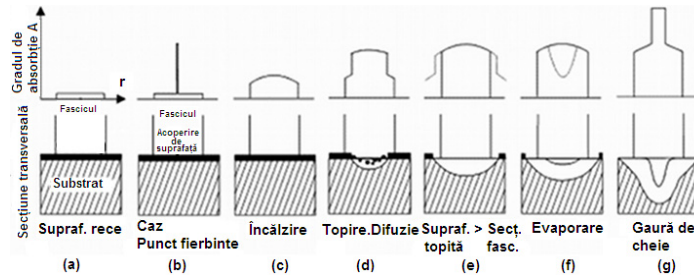


Fig. 2.16. Teoria absorbtivității radiale și diferitele etape specifice la prelucrarea cu fascicul laser în regim pulsant [58]

- absorbtivitate redusă datorită temperaturii scăzute
- situație cu concentrator local de absorbtie
- absorbtivitate crescută cauzată de încălzire
- difuzia stratului superficial datorită topirii
- dimensiunea suprafeței topite mai mare decât diametrul fasciculului
- pierderi prin evaporare
- formarea găurii de cheie cu reflexii și absorbtii multiple

Referitor la forma băii de metal topit, frontul de topire și respectiv de solidificare, se disting, din nou, două situații particulare specifice celor două moduri de funcționare a laserului – continuu și pulsant, dependente, în principal, de conducție și parțial de convecție. Dacă pentru majoritatea situațiilor de sudare cu fascicul laser în regim continuu conducția duce la stări quasi-stactice [36], pentru sudarea cu fascicul laser în regim pulsant și mai ales pentru sudarea "single-pulse" în gaură de cheie, condițiile sunt tranzitorii cu formare de pori în majoritatea cazurilor, situație întâlnită și în cazul sudării hibride datorită picăturilor de material topit. Principalele tipuri de curgere ale materialului în baia de metal topit (fig. 2.17.) sunt [36]:

- curgerea redirecționată în jurul găurii de cheie
- curgere Marangoni datorată gradientilor de tensiune superficială
- curgere necontrolată și stropiri în spatele găurii de cheie
- denivelări datorate acumulărilor în spatele găurii de cheie
- punctul de staționare a curgerii accelerate (cauza creșterii marginale și a vârfului central)
- curenți turbionari interni datorati curgerilor verticale
- coborârea rădăcinii datorată gravitației și a frontului găurii de cheie

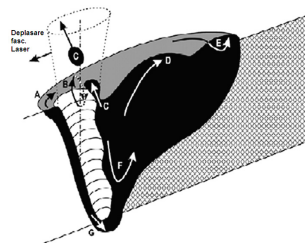


Fig. 2.17. Diferitele fenomene de topire la sudarea cu fascicul laser [36]

Literatura [3,4,39,46,121] arată un interes deosebit în studierea și modelarea acestor fenomene pentru completarea modelelor ce utilizează fenomenele de conducție la sudarea cu fascicul laser, pentru suprapunerea diferitelor mecanisme de proces. De asemenea, se poate menționa utilizarea metodei cu element finit pentru elaborarea de modele tridimensionale ce explică fenomenele complexe ce apar la sudarea cu fascicul laser [46,121].

Studiul efectuat de Mackwood și Craferb [75], prezintă o sinteză a modelelor utilizate în principal la prelucrarea cu fascicul laser, dar utilizate de asemenea la sudarea cu alte procedee, la nivelul anului 2003, toate soluțiile prezentate fiind bazate pe ecuația conducției căldurii. Modelele prezentate de autor acoperă atât soluții de bază analitice, dar și soluțiile numerice – modelare cu element finit, modelare cu diferențiale finite și combinația celor doua (metoda volumelor finite).

2.3.3. Modele utilizate la sudarea cu arc electric

Sudarea cu arc electric face parte din procesele caracterizate de: o descărcare auto-susținută și reversibilă, plasmă la temperaturi mult mai mari decât temperatura ambientală, densități de curent ridicate și tensiune relativ scăzute. În același timp însă, este dificil de definit precis proprietățile și comportamentul arcului electric, cu atât mai mult arcurile electrice specifice procedeelor de sudare, datorită limitărilor specifice, pentru a asigura stabilitatea în timp și spațiu.

Cercetările întreprinse în domeniul arcului electric pot fi clasate în două categorii:

- cercetări privind rezolvarea cu o precizie cât mai ridicată a unui set de ecuații diferențiale utilizate în descrierea comportării arcului electric, ținând cont de cât mai multe fenomene care se dezvoltă în timpul arderii arcului; aceste calcule extrem de laborioase permit determinarea cât mai exactă a proprietăților interne ale arcului electric în configurații bine determinate;
- cercetări experimentale, care au ca scop determinarea unui model matematic, permițând reprezentarea sistemului ardere arc – transfer de metal printr-o ecuație diferențială sau mai multe, în care intervin ca variabile numai parametrii electrice ai arcului; acest model se determină prin utilizarea setului de ecuații ale plasmei, prin simplificare, neglijând fenomenele de importanță secundară.

Două principale tipuri de modele teoretice utilizate pentru studiul arcului electric s-au consacrat:

- modele de arc ce rezultă din ecuația de bilanț a energiei din arc, exprimând că variația de entalpie din coloana de arc este determinată de diferența dintre energia introdusă în arc prin câmpul electric aplicat și energia disipată de coloana de arc prin conducție termică, convecție și radiație - modele cunoscute sub numele de modele de tip "cutie neagră" sau "modele de conductanță" și au la bază o singură ecuație diferențială de ordinul I.
- modele de arc electric ce utilizează mai multe ecuații fundamentale ale fizicii plasmei ce se diferențiază prin condițiile și/sau sau ipotezele puse și prin metodele de rezolvare numerică a sistemului de ecuații. -e modele cunoscute sub numele de "modele fizice".

Deși fenomenele fizice specifice sudării cu arc electric au fost studiate de mulți ani, modelările teoretice și observațiile experimentale nu au reușit să

stabilească un comportament bine definit mai ales datorită unor interdependențe uneori contradictorii atât în coloana arcului cât și datorită fenomenelor specifice în zona electrozilor [69,70].

Din punct de vedere macroscopic, arcul electric poate fi privit ca un convertor de energie. Astfel, prin arc, energia electrică este transformată în căldură și într-o gamă relativ largă de radiație electromagnetică, proces dependent de condițiile fizice în care se desfășoară descărcarea (tipul de gaz, tipul electrozilor, geometria în care se desfășoară procesul, etc.) și la care pot fi distinse trei zone principale: zona de cădere catodică, coloana arcului și zona de cădere anodică (fig. 2.18.).

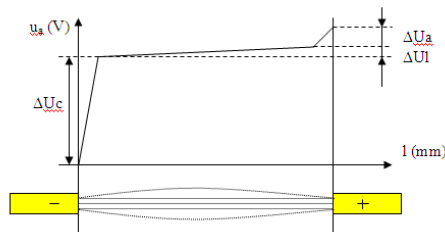


Fig. 2.18. Zonele arcului electric [69]

Acele specifice proceselor de sudare sunt caracterizate de transferul de masă între electrozi (material de adaos și / sau gaze), cu apariția unor forțe ce depind de condițiile specifice în zona electrozilor, modele analitice dezvoltate utilizând simplificări bazate pe sudarea fără material de adaos și condiții de echilibru stabilite [69,70].

În aceste condiții, sunt aplicate câteva ecuații de continuitate: conservarea masei (2.8), a sarcinii electrice (2.9), legea lui Ohm generalizată (2.10), ecuațiile Maxwell (2.11), conservarea momentului / Navier-Stokes (2.12) și conservarea energiei (2.13).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla J = 0 \quad (2.9)$$

$$J = \sigma(E + u \times B) \quad (2.10)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + J \times B + (\rho - \rho_\infty) g_z \quad (2.12)$$

$$\rho u \cdot \nabla \left(h + \frac{u^2}{2} \right) - \nabla \cdot (-k \nabla T) + U = J \cdot E \quad (2.13)$$

unde:

- ρ – densitatea masică
- u – viteza
- q – sarcina electrică volumică
- J – densitatea de curent
- σ – conductivitatea electrică
- E – intensitatea câmpului electric,
- B – inducția magnetică
- μ_0 – permeabilitatea magnetică a spațiului liber
- ϵ_0 – permitivitatea spațiului liber
- P – presiunea
- M – vâscozitatea dinamică
- ρ_∞ – densitatea gazului în afara descărcării
- g_z – accelerația datorită gravitației
- κ – conductivitatea termică
- h – entalpia
- U – puterea sursei de radiație

Pentru ecuațiile prezentate, în condițiile de echilibru relativ și condiții de graniță prestabilite, pot fi găsite soluții numerice simultane ce descriu comportamentul, structura și schimburile de energie în coloana arcului [37,38,41,50].

Pornind de la aceste modele simplificate, cercetările actuale [40,53,54,113], s-au axat pe dezvoltarea acestora, prin introducerea fenomenelor și condițiilor specifice arcurilor de sudare, plasmelor multi-componente, fenomenelor din zona electrozilor, transferului de metal și a băii de metal topit, pentru a elabora modele ce pot explica suficient de bine procesele de sudare cu arc electric și obținerea unor modele unificate.

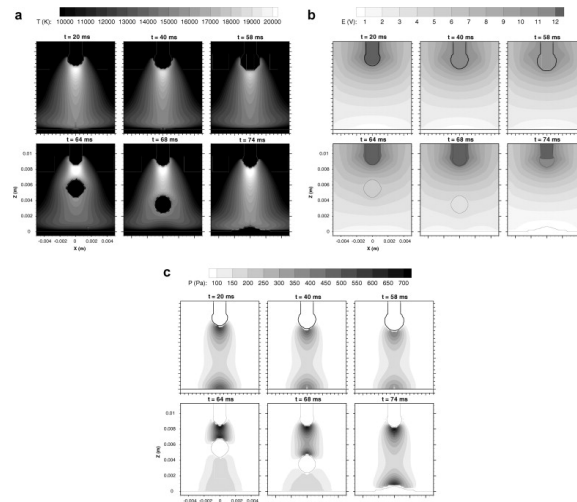


Fig. 2.19. Variația temperaturii, potențialului electric și a distribuției de presiune pentru un arc staționar axisimetric [119]

Un astfel de model, tri-dimensional [119], studiază fenomenele de transport în sudarea cu arc electric în medii de gaz protector, incluzând plasma arcului, generarea picăturilor, transferul acestora în baia de sudare precum și dinamica băii de sudare. Prin introducerea în model a interacțiunilor și a cuplării dintre zona de

metal și zona plasmei și calcularea comportării în timp a distribuțiilor de viteze, presiune, temperatură, rezultatele numerice au relevat variația presiunii arcului și a densității de curent în timp, precum și faptul că transferul de căldură la suprafață nu are o distribuție Gaussiană. (fig. 2.19. - 2.21.).

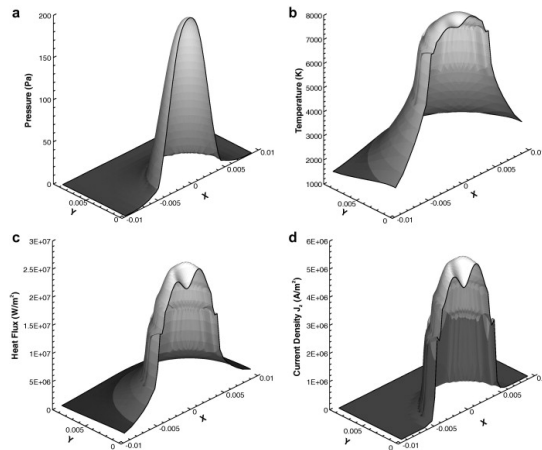


Fig. 2.20. Distribuțiile presiunii, temperaturii, fluxului de căldură și a densității de curent (t=64ms) [119]

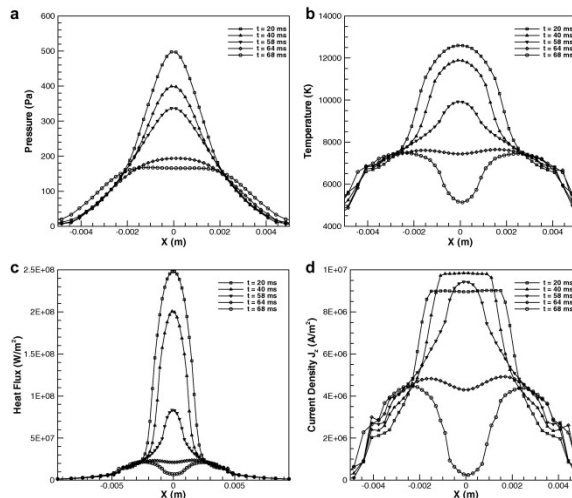


Fig. 2.21. Evoluția temporală a presiunii, temperaturii, fluxului de căldură și a densității de curent [119]

2.4. Modelarea proceselor de sudare hibride laser – arc

La combinarea celor două procese de sudare, câteva fenomene specifice sunt posibile. Fasciculul laser poate să fie absorbit în plasma arcului, împrăștiat sau defocalizat având ca rezultat o reducere a puterii fasciculului ce interacționează cu materialul de prelucrat. Pe de altă parte, fasciculul laser interacționează cu un material la temperaturi ridicate sau chiar topit. Din punct de vedere al arcului

electric, energia absorbită de la fasciculul laser în coloana de plasmă poate produce o modificare a structurii electrice, a curgerii și a temperaturii. De asemenea, radiația laser modifică emisia termoelectrică și distribuția energiei particulelor, mai ales în cazul în care piesa de lucru este conectată la catod. Interacțiunile sinergice dintre cele două procese, ce fac posibilă evitarea dezavantajelor celor două procedee și utilizarea avantajelor acestora, au loc doar pe un domeniu specific de distanță dintre cele două procese, distanță ce depinde în principal de caracteristicile geometrice ale arcului electric, dar și de cele ale fasciculului laser.

Pornind de la aceste fenomene posibile, cercetările [49,51,68] s-au axat pe evaluarea și modelarea absorbției și împrăștierii fasciculului laser în plasma arcului electric, utilizând diferite aproximații, pentru stabilirea unor coeficienți care să permită definirea unor surse termice echivalente.

Literatura studiată [26,27,44,62,63,79,90,123,124] arată un interes deosebit asupra acestui subiect, dar cu un număr relativ redus de lucrări ce abordează modelarea procedeele de sudare hibride, dintre acestea, majoritatea se concentrează asupra interacțiunii laser - plasmă sau discută influența surselor combinate pentru a determina o sursă termică echivalentă utilizabilă la modelarea/simularea procesului de sudare cu element finit.

Un astfel de model, utilizează sursele necuplate/independente cu o reducere a razei arcului electric pentru a ține seama de influența fasciculului laser asupra arcului electric (fig. 2.22.).

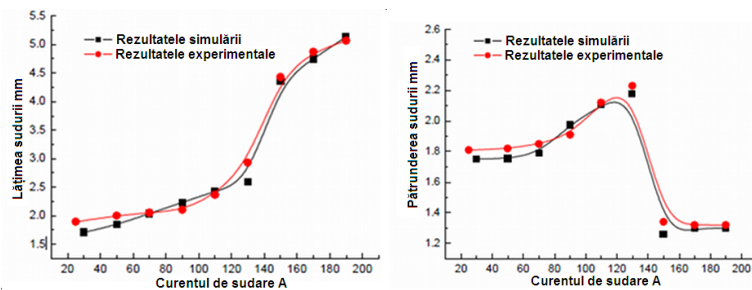


Fig. 2.22. Rezultatele simulate și experimentale ale modelării unei surse de căldură echivalente pentru sudarea laser-WIG [27]

Modelul necuplat [26,27] utilizează o distribuție de a energiei fasciculului

$$Q_{laser} = I_0 \exp\left(-2\frac{r^2}{r_b^2}\right) \exp(-k_v z)$$

laser în gaura de cheie de forma

$r^2 = (x - u_w t)^2 + y^2$ și respectiv o distribuție de suprafață a energiei arcului de forma

$$Q_{arc} = \frac{3\eta VI}{\pi r_a^2} \exp\left(-3\frac{r^2}{r_a^2}\right), \text{ unde:}$$

- u_w este viteza de sudare
- I_0 este maximul densității de putere în centrul fasciculului laser
- r_0 este raza fasciculului laser
- κ_v este coeficientul de absorbție radiativă
- V este tensiunea arcului electric
- I este curentul de sudare
- η este randamentul procesului

- r_a este raza arcului electric

Modelul elaborat explică fenomenele legate de creșterea pătrunderii la cuplarea hibridă a celor două procese, precum și modul de variație al acesteia funcție de curentul de sudare (creștere a pătrunderii cu creșterea curentului de sudare urmată de scăderea acesteia cu creșterea curentului, explicată prin lățirea arcului electric și absorbția / blocarea fasciculului laser.

Un studiu similar [90], a dezvoltat un model pentru o sursă termică echivalentă pornind de la evaluarea efectelor sinergice ce apar în procesul de sudare, utilizând simularea cu element finit, pentru a evalua efectul fiecărei surse asupra celeilalte. Modelele elaborate pentru fiecare sursă termică în parte au corespuns relativ bine cu măsurătorile experimentale, dar sursa combinată modelată nu a putut descrie cazul cuplării hibride, decât cu modificarea distribuției parametrilor (fig. 2.23.) – observație ce relevă influența importantă a transferului termic de tip convecție în baia de metal topit.

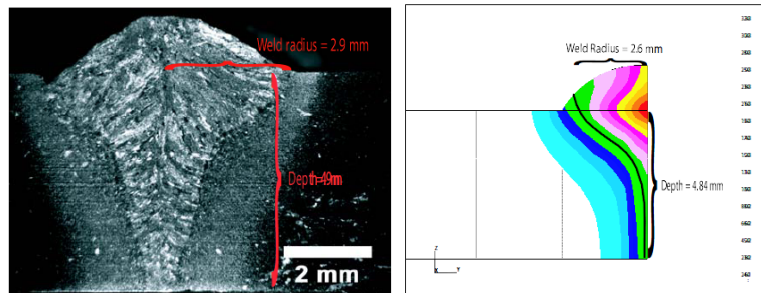


Fig. 2.23. Forma experimentală și prezisă a sudării după adaptarea modelului hibrid cuplat [90]

Un alt model matematic ce permite simularea dezvoltării băii de sudare și dinamica procesului laser-MIG în condiții staționare a fost dezvoltat de Gao et al. [44]. Modelul a permis calcularea curgerii materialului ținând cont de tensiunile superficiale, iar prin introducerea efectului de cuplare a celor două surse (lățimea plasmei) a fost posibilă simularea formei și caracteristicilor tranzitorii a băii de metal topit (fig. 2.25., fig. 2.26.), geometria pentru sudurile calculate / simulate fiind apropiate de valorile măsurate experimental (fig. 2.24.).

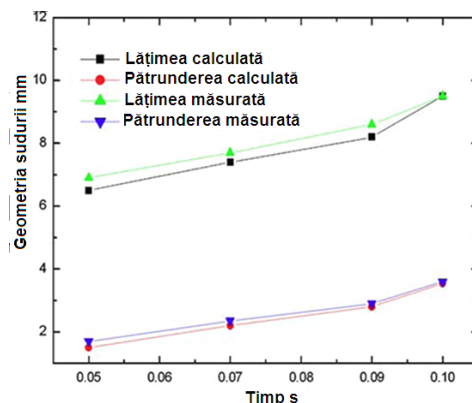


Fig. 2.24. Model matematic geometrie rost la sudarea hibridă laser-MIG [44]

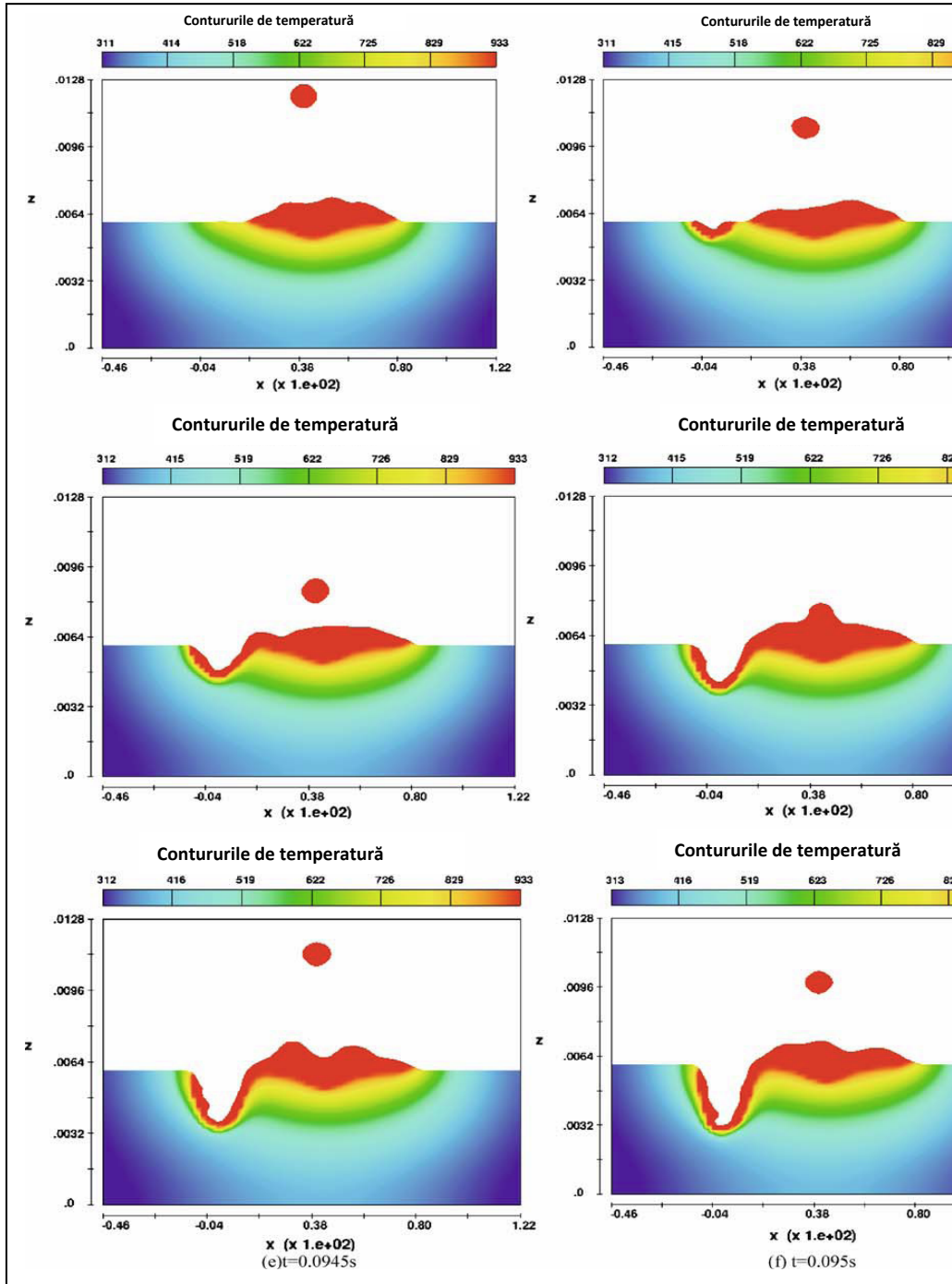


Fig. 2.25. Simularea evoluției procesului hibrid laser-MIG și profilele de temperatură [44]

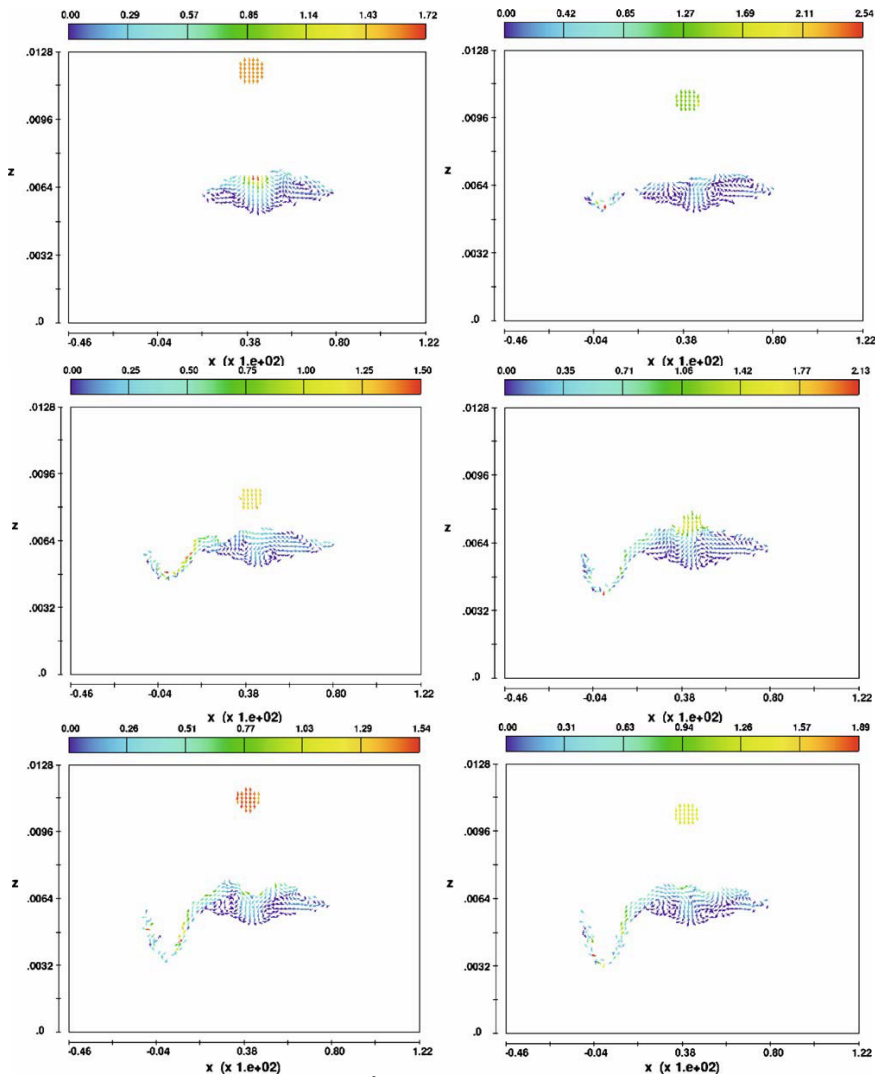


Fig. 2.26. Variația în timp a profilele vitezelor [44]

Modelul dezvoltat de Gao et al. [44] permite modelarea sudării în puncte pentru sudarea hibridă laser-MIG atât pentru cazul sudării laser prin conducție cât și pentru sudarea laser în gaură de cheie.

Un alt tip de modelare întâlnit în literatura studiată [25], utilizează analiza statistică a parametrilor de proces prin utilizarea programării experimentale, pentru determinarea factorilor cei mai importanți din punct de vedere a influenței acestora asupra caracteristicilor îmbinărilor sudate realizate, obținerea unor modele polinomiale ce descriu variația funcției/funțiilor obiectiv în domeniul investigat, precum și pentru determinarea zonelor de optim. O astfel de modelare reduce consumurile de materiale și timp pentru un proces atât de complex și cu un număr ridicat de parametri, dar rezultatele obținute, în cele mai multe cazuri, nu pot fi extinse în afara domeniului experimental investigat.

În același timp, literatura studiată arată interesul deosebit în studierea continuă [60–62] a fenomenologiei proceselor de sudare hibride laser-arc prin vizualizarea curgerii băii de sudare. Aceste modele au stat la baza stabilirii principalelor cauze în apariția unor imperfecțiuni, corectarea acestora și în evaluarea caracteristicilor geometrice ale sudărilor (fig. 2.27., fig. 2.28.).

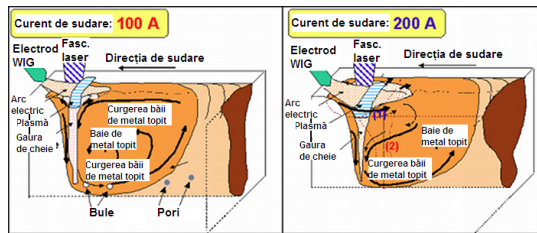


Fig. 2.27. Influența curentului asupra dinamicii băii de sudare la procesul laser-WIG [62]

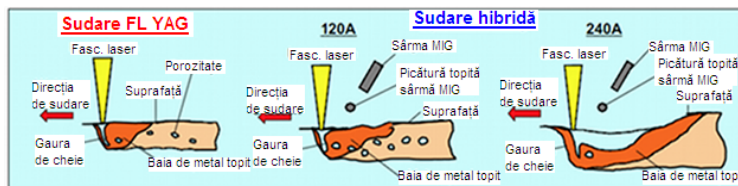


Fig. 2.28. Dinamica băii de sudare LASER-MIG funcție de curentul de sudare [60]

Pe baza fenomenologiei complexe (fig. 2.29.) și a unor studii anterioare [79,117] a fost realizat un model matematic (fig. 2.30.) pentru studierea curgerii gazelor în zona de prelucrare precum și pentru studierea influenței geometriei rostului asupra caracteristicilor îmbinărilor sudate [117].

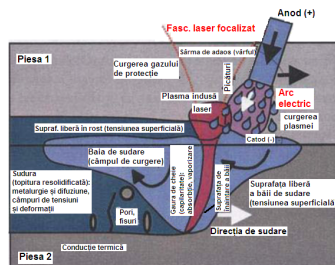


Fig. 2.29. Geometria și fenomenele fizice specifice sudării hibride laser-MIG [117]

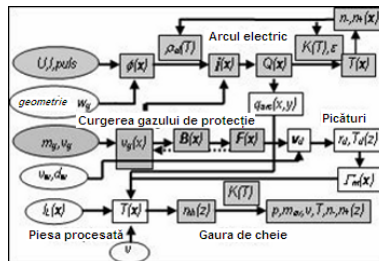


Fig. 2.30. Structura modelului matematic [117]

Modelul matematic elaborat a permis descrierea curgerii gazelor în zona de prelucrat în concordanță cu înregistrările vizuale ale procesului (fig. 2.31.) [79], dar și calcularea secțiunii transversale a sudurii funcție de lățimea rostului și de raportul viteză de sudare - viteza de avans a sârmei (fig. 2.32.).

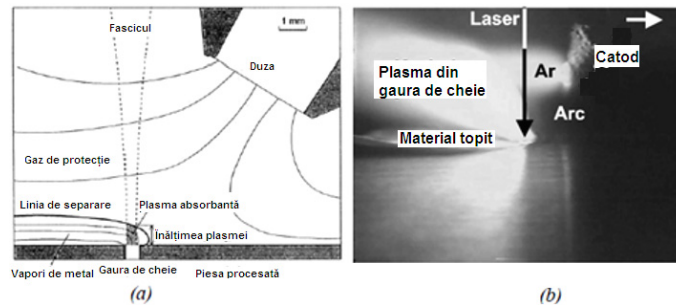


Fig. 2.31. Dinamica curgerii gazelor calculată (a) și înregistrată (b) [117]

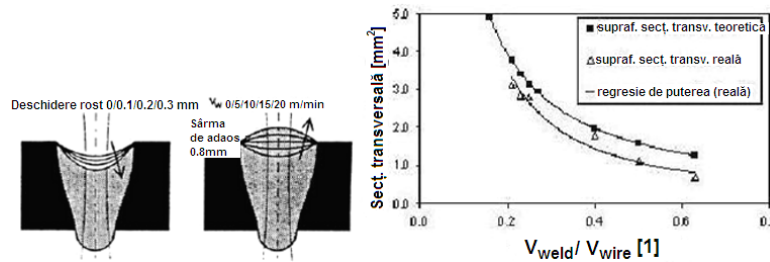


Fig. 2.32. Secțiunea transversală a sudurii funcție de deschiderea rostului și raportul viteza de sudare - viteza de avans a sârmei [117]

Având în vedere cele prezentate în prezentul sub-capitol se poate concluziona că modelarea proceselor de sudare hibride laser-arc prezintă un interes major, dar că în același timp rezultatele obținute sunt relativ limitate.

Deși interacțiunea fascicului laser cu materialul și structura arcului electric au fost explorate mai mult sau mai puțin în detaliu, înțelegerea interacțiunilor specifice proceselor de sudare hibride laser-arc, a influenței acestora asupra formării sudurii și a stabilității procesului este relativ la început. Deoarece modelarea statistică și studierea prin metode vizuale a dinamicii băii de sudare au dat rezultate deosebite în optimizarea procedeeleor hibride, aceste două metode au fost selectate, pentru studierea noii variante de procedeu hibrid laser-arc: procesul LASER-(micro)WIG pulsant, în cadrul studiului doctoral.

2.5. Elemente de modelare a modului de cuplare hibridă dintre fascicului laser și arcul electric

Pentru a fundamenta principalele diferențe dintre procesul combinat și respectiv cuplat (hibrid) **doctorandul a elaborat un model fenomenologic** bazat pe bilanțul puterilor din sistem. Deși modelul dezvoltat este pentru varianta laser-MIG, cu modificări minore poate fi adaptat și pentru celelalte variante existente sau altele noi dezvoltate.

În principiu, procedeul de sudare hibrid laser-arc se bazează pe combinarea și cuplarea acțiunii radiației laser (CO₂ sau Nd:YAG) cu procesul de descărcare electrică în arc (WIG, plasmă sau MIG/MAG) într-o singură zonă de procesare (plasmă și material topit) ceea ce duce la apariția unor fenomene sinergice. Acest procedeu poate fi considerat un caz particular al procedurii de combinare radiație laser – arc electric (radiația laser și arcul electric acționează separat, în timp și spațiu, fără a se influența reciproc), cele două procese fiind cuplate într-unul singur (radiația laser și arcul electric acționează în același timp și în aceeași zonă de interes) influențându-se reciproc.

Influențele reciproce exercitate de cele două procese pot varia în intensitate și formă în funcție de arcul electric utilizat sau de procedeul laser și de parametrii de proces. Cantitatea de energie introdusă la care sudura este expusă ca rezultat al procedurii hibrid poate fi menținută scăzută comparativ cu cea introdusă de procedeul de sudare cu arc electric. În același timp, caracteristicile îmbinării prin sudare cu fascicul laser sau cu arc electric pot fi predominante în funcție de factorii de putere aleși (de raportul dintre energiile de ieșire a celor două procese).

Unul dintre fenomenele prin care sunt emiși electroni, în cazul procedurii de sudare cu arc electric este termoemisii. În cazul sudării hibride laser - arc, arcul electric se află în imediata vecinătate a plasmei induse de fasciculul laser, iar o parte din căldura emisă participă cu un aport de energie calorică la fenomenul de termoemisii. Cantitatea de căldură primită de electrod prin radiație de la plasma indusă este dependentă de puterea fasciculului laser, proprietățile materialului de prelucrat, de materialul electrodului precum și de geometria și configurația spațială a fasciculului laser față de capul de sudare clasic.

Tensiunea în zona catodului este neliniară, are valoare relativ redusă (3...5 V) și poate fi determinată din bilanțul energetic local:

$$P_K = P_{\text{emisie electronica}} + P_{\text{topire electrod}} - P_{\text{bombardare K}} \quad (2.14)$$

unde:

- P_K – puterea la nivelul catodului;
- $P_{\text{emisie electronica}}$ - puterea consumată pentru emisii termoelectronice;
- $P_{\text{topire electrod}}$ – puterea consumată pentru topirea sârmei electrod;
- $P_{\text{bombardare K}}$ – puterea primită în urma bombardării catodului de către ionii accelerați în câmpul electric.

În cazul sudării hibride laser – arc bilanțul energetic este modificat în urma aportului suplimentar de energie (termică) de la plasma indusă de fasciculul laser, prin preluarea acesteia în circuitul electric și inerenta scădere a rezistivității mediului ($P_{\text{plasmă indusă laser}}$ – atât energie termică cât și energie electrică datorată creșterii numărului de sarcini în circuitul electric), conform relației 2.15.

$$P_K = P_{\text{emisie electronica}} + P_{\text{topire electrod}} - P_{\text{bombardare K}} - P_{\text{plasmă indusă laser}} \quad (2.15)$$

Efectul acestei modificări este scăderea $P_{\text{topire electrod}}$, puterea crescând astfel, în principal, datorită termenului $P_{\text{bombardare K}} + P_{\text{plasmă indusă laser}}$.

Temperatura coloanei arcului electric este, în general, cuprinsă în intervalul $T = 8000...10000\text{K}$ ($7727,85...9727,85^\circ\text{C}$), fiind mai ridicată în cazul sudării hibride, datorită existenței într-o vecinătate de dimensiune redusă a mai mult de o sursă termică. Aportul termic determinat de existența surselor termice vecine (fasciculul laser) coloanei de arc poate fi controlat printr-un program de start special ales.

De asemenea, importantă din punct de vedere tehnologic, în cazul procedeeleor de sudare cu arc electric, este lungimea arcului de sudare, mărime direct proporțională cu căderea de tensiune pe coloana arcului.

În cazul sudării hibride laser - arc, datorită plasmelor induse de fasciculul laser și temperaturii mai ridicate a petei focale, arcul electric este deviat de la direcția sa către pata focală a fasciculului laser determinând astfel modificarea modului și direcției de introducere a energiei termice în piesă precum și a lungimii acestuia.

Temperatura în gaura de cheie produsă de fasciculul laser este mai scăzută decât în cazul fasciculului de electroni (de aici și o penetrare mai scăzută), iar aceasta este datorată unei presiuni de fascicul mai scăzute precum și absorbției mai scăzute a radiației laser de către material, dar și fenomenului de obturare datorat plasmelor induse laser la suprafața materialului (mai critic în cazul sudării cu fascicul laser CO₂).

În cazul sudării hibride laser - arc, plasma indusă este diluată, prin preluarea acesteia în circuitul arcului electric, ceea ce duce la creșterea eficienței celor două procedee. Astfel conductivitatea mediului arcului electric crește, iar adâncimea de pătrundere crește datorită diluării plasmelor. De asemenea, în cazul procesului hibrid temperatura băii de sudare este crescută semnificativ, datorită prezenței în aceeași zonă de prelucrare și în același timp a arcului electric, ceea ce face posibilă utilizarea unor laseri de putere mai scăzută pentru atingerea unor adâncimi de pătrundere comparabile.

Un model de arc sau de interacțiune a fasciculului laser cu materialele nu este utilizabil dacă nu prezice comportamentul acestora cu o precizie relativ ridicată, iar efectele produse de modificarea parametrilor de proces pot fi verificate empiric. Pentru mărirea acestei precizii trebuie transpuse nu numai fiecare fenomen în parte, dar și interacțiunea acestora. Dificultatea și complexitatea modelării fenomenelor și a interacțiunilor acestora sunt însoțite adesea și de dificultățile teoretice care se opun modelării complete a arcului electric. Este cu atât mai dificil realizarea unui model al procesului hibrid deoarece procesele fizice ale fiecărui procedeu de sudare în parte se influențează reciproc, iar numărul de parametri de proces crește.

În continuare este abordat un *model energetic (fenomenologic)* al proceselor care apar atunci când fasciculul laser interacționează cu arcul electric pentru varianta laser-MIG. Modelul are în vedere evidențierea bilanțului energetic și a efectelor sinergice ale celor două procedee de sudare. Se vor arăta mecanismele prin care bilanțul energetic al procesului hibrid diferă de bilanțul energetic al celor două procese luate independent, pentru a susține relația (2.2). Modelul este unul simplificat față de bilanțul puterilor din sistem.

Model energetic proces hibrid laser - MIG

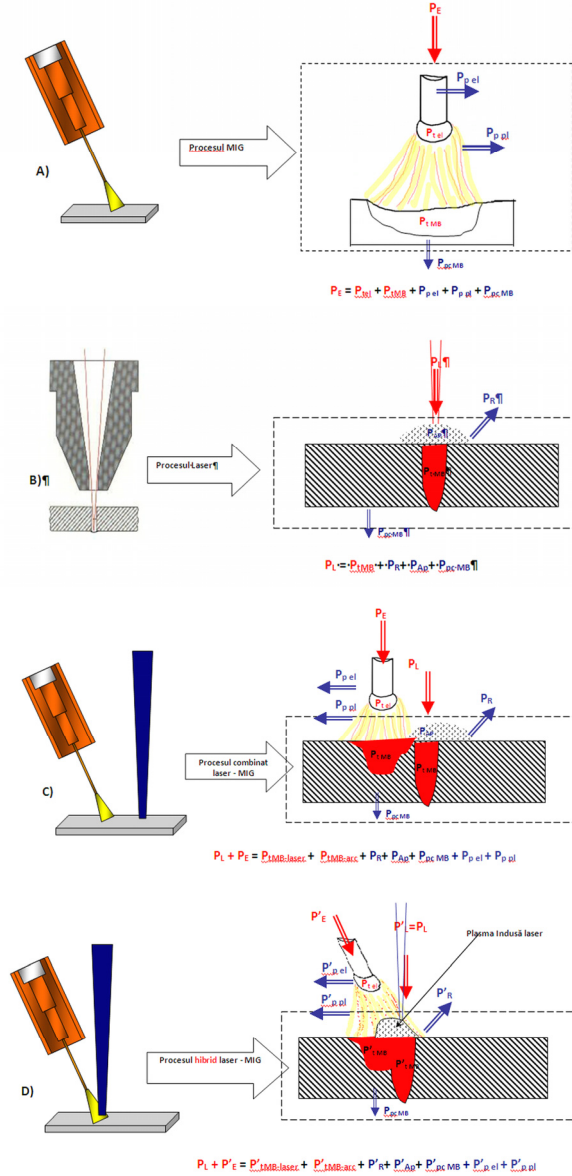


Fig. 2.33. Modelul simplificat al bilanțurilor energetice pentru procesele de sudare

Modelul de cuplare hibridă dezvoltat este unul simplificat și are la bază bilanțul puterilor în proces.

Se va evalua bilanțul puterilor în cazul sudării cu arcul electric și al sudării cu fascicul laser, iar cele două procese vor fi aduse în contact prin micșorarea distanței ce le separă.

După cum se observă în fig. 2.33. A.:

$$P_E = P_{tel} + P_{tMB} + P_{p\ el} + P_{p\ pl} + P_{pc\ MB} \quad (2.16)$$

adică puterea electrică (P_E), introdusă în proces, se împarte în: puterea consumată pentru topirea electrodului (P_{tel}), puterea consumată pentru topirea materialului de bază (P_{tMB}), puterea disipată prin răcirea electrodului (P_{pel}), puterea pierdută prin radiația plasmei arcului (P_{ppl}) și puterea disipată în materialul de bază prin convecție ($P_{pc\ MB}$).

După cum se observă, doar doi termeni participă în mod util la procesul de sudare – puterea consumată pentru topirea electrodului și puterea consumată pentru topirea materialului de bază, ceilalți reprezintă pierderi.

În cazul sudării cu fascicul laser, după cum se observă în fig. 2.33. B.: o parte din puterea incidentă este absorbită de material, o parte reflectată, iar în momentul formării găurii de cheie, o parte este absorbită în plasma indusă – efectul de obturare a radiației (mai critic caz fiind la utilizarea radiație laser CO_2).

Bilanțul puterilor poate fi deci scris:

$$P_L = P_{tMB} + P_R + P_{Ap} + P_{pc\ MB} \quad (2.17)$$

unde:

- P_L este puterea laser incidentă;
- P_{tMB} este puterea absorbită în materialul de bază și utilizată la topirea acestuia;
- P_R este puterea reflectată;
- P_{Ap} este puterea absorbită în plasma indusă
- $P_{pc\ MB}$ este puterea disipată în material prin fenomene de conducție - convecție;

Pornind de la fig. 2.33. C. – cazul în care cele două procese sunt separate de o distanță apreciabilă "a" și nu se influențează reciproc – puterea totală din materialul de bază este egală cu diferența dintre puterea totală intrată în sistem ($P_E + P_L$) și suma pierderilor. Putem să scriem următorul bilanț:

$$P_L + P_E = P_{tMB-laser} + P_{tMB-arc} + P_R + P_{Ap} + P_{pc\ MB} + P_{p\ el} + P_{p\ pl} \quad (2.18)$$

Un singur efect poate să apară și anume – absorbția fascicului laser de către materialul de bază poate crește (mai mult sau mai puțin funcție de variația coeficientului de absorbție al materialului cu temperatura) datorită încălzirii materialului de bază de către arcul electric.

Această variație poate fi folosită ca și procedeu dintr-o singură trecere („one shot process”) utilizând procedeul laser pentru sudarea rădăcinii îmbinării și procedeul MIG pentru realizarea umplerii.

Micșorând parametrul "a" (distanța dintre cele două procese – distanța dintre proiecția capătului liber al sârmei de sudare pe piesa de prelucrat și spotul fascicului laser), puterea efectivă transferată materialului de bază rămâne aceeași până când cele două procese se cuplează hibrid (fig. 2.33. D.). Distanța la care cele două procese se cuplează hibrid poate fi măsurată empiric prin măsurarea curentului de sudare care trebuie să crească datorită fenomenelor sinergice prezentate anterior. Astfel ecuația bilanțului termic se modifică:

$$P_L + P'_E = P'_{tMB-laser} + P'_{tMB-arc} + P'_R + P'_{Ap} + P'_{pc\ MB} + P'_{p\ el} + P'_{p\ pl} \quad (2.19)$$

În momentul cuplării hibride, puterea introdusă în material începe să crească datorită următoarelor fenomene:

- plasma indusă laser este preluată în circuitul electric și deci puterea electrică totală crește (datorită creșterii densității de electroni, curentul va crește) deci $P'_E > P_E$;
- puterea totală laser rămâne aceeași, dar datorită diluării plasmei induse laser crește absorbția în material a radiației laser (arcul electric are efect de "potențare" asupra fasciculului laser) $P'_{tMB-laser} > P_{tMB-laser}$;
- încălzirea semnificativă a materialului de bază și respectiv topirea acestuia produce o creștere semnificativă a coeficientului de absorbție a radiației laser.

Are loc astfel, nu doar o redistribuire a puterilor în sistemul hibrid, ci și o potențare – a procesului de sudare cu arc electric de către fasciculul laser și invers.

Se poate observa că distanța dintre cele două procese nu poate deveni oricât de mică sau zero datorită posibilității interacțiunii radiației laser cu picăturile de metal topit, caz în care cuplarea ar avea efecte nefavorabile procesului – absorbția de către picături a radiației laser (cu efect de obturare) și explozia acestora cu instabilitate a procesului de sudare cu arc electric și stropiri necontrolate, distrugerea opticii de focalizare etc. De asemenea, se poate observa că parametrul „ a_{hibrid} ” nu este unul constant pentru o situație dată, ci depinde atât de parametrii utilizați pentru cele două procese constitutive, de configurația geometrică a sistemului, dar și de materialele de bază și respectiv de adaos.

Grafic puterea utilă procesului de sudare funcție de parametrul „ a ” trebuie să arate conform celei din fig. 2.34.

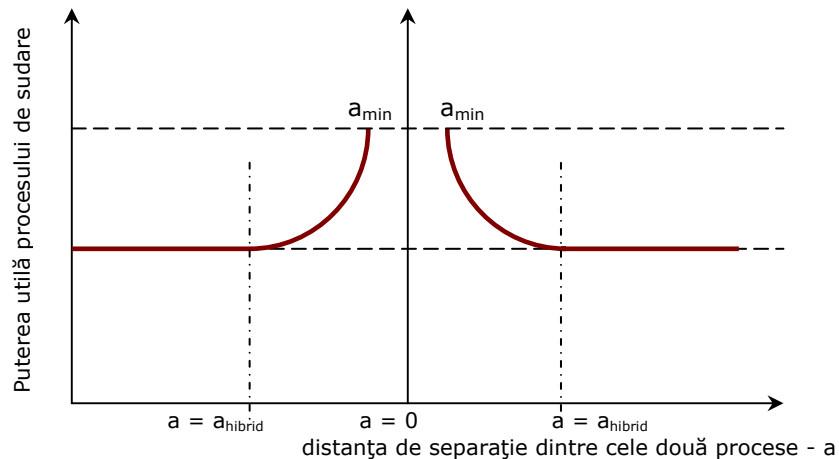


Fig 2.34. Variația puterii efective utilizate în procesul de sudare cu distanța de separație dintre procese

Funcția după care variază creșterea de putere efectivă poate avea diferite forme și poate fi determinată prin măsurători empirice sau simulări ce necesită modelarea matematică a procesului.

Modelul fenomenologic dezvoltat, bazat pe bilanțului energetic al procesului hibrid poate fi dezvoltat, în sensul determinării unor condiții la limită, prin utilizarea de ecuații matematice care să cuprindă parametrii de proces. Prin realizarea unui model matematic care să exprime bilanțurile energetice din acest model fenomenologic se pot determina influența parametrilor de proces asupra stabilității procesului hibrid și asupra caracteristicilor îmbinărilor sudate.

Astfel, utilizând un model „fizic” al sudării cu fascicul laser – modele în care se presupune că sursa termică din interiorul piesei de sudat este asimilată cu un cilindru subțire de exemplu [7] și modelele arcului electric se pot face estimări asupra lățimii sudurii și adâncimii de penetrare, etc.

2.6. Aspecte tehnologice

Având la bază literatura de specialitate studiată sunt prezentate în continuare câteva aspecte tehnologice la sudarea hibridă LASER-WIG și laser-MIG/MAG, două dintre variantele cele mai utilizate în aplicații industriale.

În cazul procedurii de sudare hibridă LASER-WIG variația adâncimii de penetrare funcție de viteza de sudare este prezentată în fig. 2.35. [79].

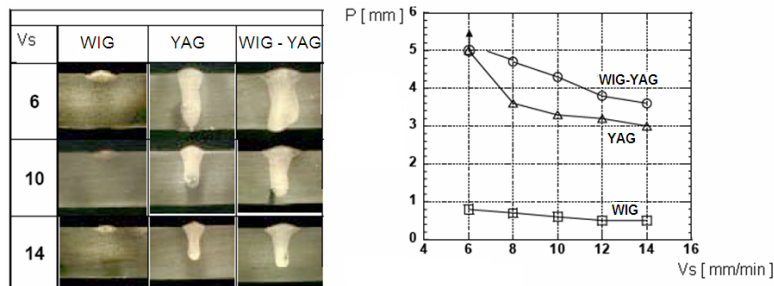


Fig. 2.35. Dependenta pătrunderii funcție de viteza de sudare, procedeu WIG-LASER (WIG-YAG), $P_L = 1,7 \text{ kW}$, curent de sudare $I_s = 100 \text{ A}$, gaz de protecție Argon [79]

Se poate observa că lățimea sudurii este mai mare pentru procedeu hibrid, adâncimea de penetrare mai mare, dar că odată cu creșterea vitezei de sudare eficiența procedurii hibrid devine aproape egală cu cea a procedurii laser.

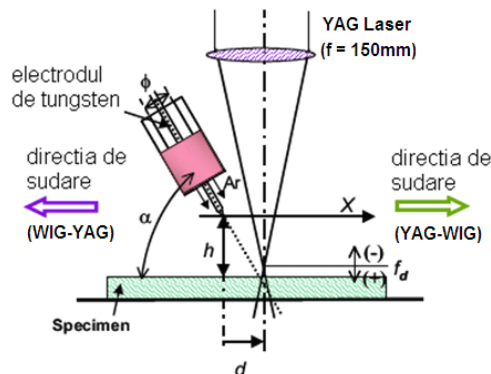


Fig. 2.36. Variantele laser-WIG și respectiv WIG-laser [79]

Referitor la variantele sub-procesului de sudare hibrid, aceiași autori [79] prezintă influența procesului conducător asupra adâncimii de pătrundere, în fig. 2.36. fiind prezentate cele două situații distincte, influența distanței dintre cele două procese („parametrul hibrid” [14]) asupra acesteia, precum și elaborate explicații fenomenologie ale rezultatelor obținute (fig. 2.37. - 2.38.).

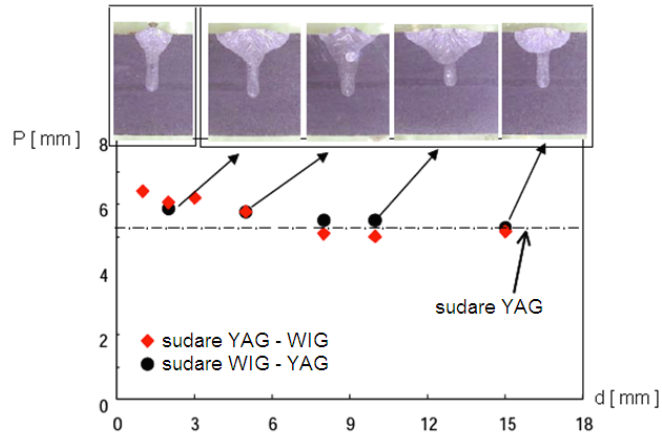


Fig. 2.37. Comparație între sudarea WIG – YAG și YAG – WIG (după [79])
 $P_L = 4 \text{ kW}$, curentul de sudare: $I_s = 200 \text{ A}$, viteza de sudare
 $v_s = 1000 \text{ mm/min}$, gaz de protecție Argon cu debit de 5 l/min , unghiul electrodului - 55°

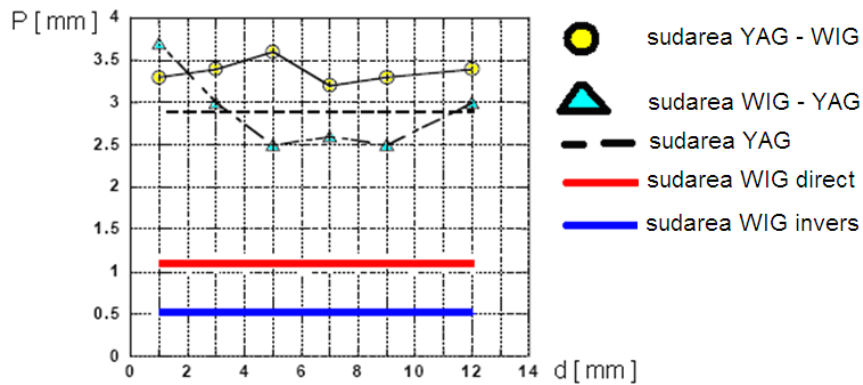


Fig. 2.38. Studiu comparativ al pătrunderii în funcție de distanța dintre electrod și fascicul laser [79]

Observațiile legate de rezultatele obținute sunt următoarele:

- pătrunderea este mai mare atunci când procedeul de sudare este de tip WIG – YAG (aproximativ $P = 5 - 7 \text{ mm}$), respectiv mai mică atunci când procedeul este de tip YAG – WIG (aproximativ $P = 5 - 6 \text{ mm}$)
- sudarea hibridă laser arc este eficientă în condițiile în care distanța dintre electrodul de wolfram și fasciculul laser nu depășește 5 mm , peste această valoare conform fig. 2.38. sudarea hibridă prezintă o pătrundere egală cu cea de la sudarea laser YAG – practic cele două

procese sunt decuplate și nu mai avem de-a face cu un procedeu hibrid

- odată cu creșterea distanței dintre electrod și fasciculul laser pătrunderea scade, iar sudura are o geometrie mai lată, în special în cazul YAG – WIG

Explicațiile fenomenologice, elaborate prin utilizarea unei camere CCD pentru vizualizarea procesului de sudare, sunt următoarele [79]:

- în cazul variantei WIG-YAG, arcul electric se extinde mult înspre fasciculul laser (baia de metal topit apare imediat în spatele fasciculului laser), arcul electric având o comportare dinamică în jurul găurii de cheie
- în cazul YAG-WIG, baia de metal topit este direcționată către pata focală, iar arcul electric se comportă dinamic în exteriorul găurii de cheie
- distanța realizată pe axa X a băii de material topit, în cazul WIG – YAG este de 2 - 8 mm, iar distanța realizată pe axa X a băii de material topit în cazul YAG – WIG este de 1 - 3 mm.

Referitor la gazul de protecție utilizat, cercetări actuale au relevat faptul că este posibilă creșterea adâncimii de pătrundere prin utilizarea unui amestec de gaz Ar+5%H₂ [5], iar o altă lucrare [108], prezintă rezultatele experimentale asupra influenței gazului de protecție (amestec Ar-He-O₂ în concentrații diferite și debit) asupra stabilității procesului de sudare și asupra caracteristicilor dimensionale ale sudurii pentru varianta laser-MIG. Rezultatele obținute [108] au arătat că:

- utilizarea a cel puțin 30% He este necesară pentru a limita formarea plasmei ce blochează radiația laserului cu CO₂
- utilizarea peste 40% He în amestecul de gaze duce la instabilități ale descărcării arcului și nu influențează în mod semnificativ adâncimea de pătrundere
- debitul de gaz poate fi păstrat în limitele 10 – 30l/min pentru reducerea costurilor.

Pentru procedeul de sudare laser-MAG, literatura de specialitate menționează, în cazul sudării oțelurilor moi, o creștere cu până 20% față de sudarea cu fascicul laser [64], în cazul variantei MAG-YAG, în condițiile unei distanțe între procese de 1 – 3 mm. Comparativ, în cazul procedurii LASER-WIG, parametrul hibrid poate avea valori de până la 5 mm, deci plaja de reglare este mai mare pentru acest procedeu.

Referitor la unghiul de înclinare a arzătorului MIG/MAG, literatura [117], menționează, că în cazul sudării hibride cu laser cu CO₂, adâncimea de penetrare crește cu creșterea valorii unghiului de înclinație, deoarece gazul de protecție difuzează plasma indusă laser și că valoarea uzuală a acestuia este între 40° și 50°.

La sudarea aliajelor de aluminiu, o problemă importantă o reprezintă imperfecțiunile de tip porozitate (cauzate în principal de vitezele de sudare mari specifice sudării cu fascicul laser), iar cercetările actuale vizează identificarea unor metode pentru reducere a acestora [62]. Astfel, influența curentului de sudare asupra aspectului vizual al îmbinării și porozității este prezentată în fig. 2.39.

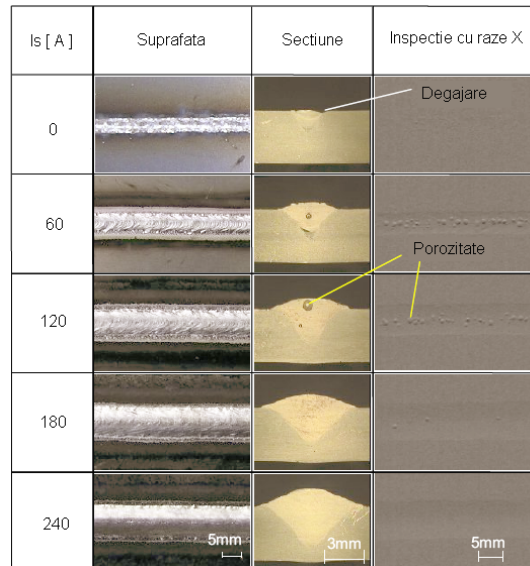


Fig. 2.39. Influența I_s la sudarea YAG – MIG asupra aspectului sudurii [62]

Se poate observa că porozitatea scade odată cu creșterea curentului de sudare (creșterea raportului de putere proces arc electric – proces laser), simultan cu creșterea lățimii sudurii. De asemenea, reducerea porozității îmbinărilor sudate, s-a obținut prin utilizarea unor amestecuri de gaze Ar+25%He, rămânând de studiat influența utilizării He în amestec cu Ar asupra adâncimii de penetrare [62].

O altă lucrare [88] tratează influența parametrilor procesului hibrid asupra geometriei sudurii având la bază dimensiunile caracteristice prezentate în fig. 2.40., principalele concluzii fiind:

- creșterea puterii arcului electric duce la creșterea lățimii de suprafață a stratului depus (W) concomitent cu scăderea „pătrunderii arcului” (M) și a înălțimii supraînălțării depus (R)
- tipul transferului de metal joacă un rol important asupra valorilor M și L („pătrunderea laser”)
- puterea fasciculului laser și implicit vaporii de metal produși de acesta influențează transferul de metal, extinzând timpul de ardere a arcului cu scăderea frecvenței scurtcircuitelor.

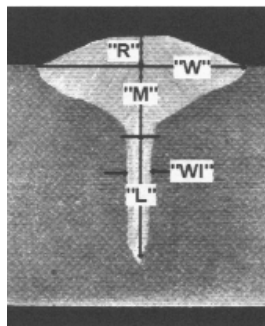


Fig. 2.40. Parametrii geometrici ai sudurii [88]

Referitor la tipurile de materiale la care se aplică procedeul de sudare hibrid laser - arc, literatura studiată arată un interes deosebit pentru utilizarea acestui procedeu la realizarea îmbinărilor disimilare precum și la îmbinarea aliajelor ușoare, specifice industriei auto și aeronautice. [22,33,71-74,85,120]

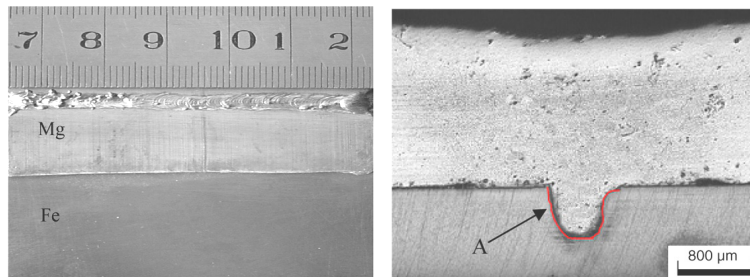


Fig. 2.41. Îmbinare aliaj Fe – aliaj Mg (suprafața) [72] Fig. 2.42. Îmbinare aliaj Fe – aliaj Mg (secțiune transversală) [72]

Astfel, [72] prezintă experimentările de sudare LASER-WIG a aliajului de magneziu AZ31B cu oțel 304 ce au putut fi îmbinate prin suprapunere (fig. 2.41. – 2.42.).

Analizele efectuate [72] pe îmbinările realizate au relevat o zonă de tranziție la interfața aliaj Mg – aliaj Fe cu difuzia magneziului în matricea de Fe însoțite producerea de oxizi, oxizi ce par a fi motivul rezistenței reduse a îmbinării la teste de forfecare.

Aceeași autori [73], prezintă rezultatele unor îmbinări sudate cu procedeul hibrid LASER-WIG a unui aliaj pe bază de magneziu (AZ31B) cu un aliaj de aluminiu (6061) utilizând un strat intermediar din folie de Ce (fig. 2.43.).

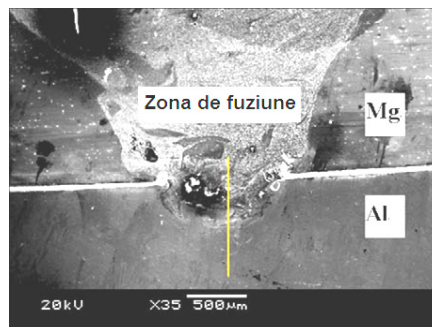


Fig. 2.43. Îmbinare aliaj Mg – aliaj Al (secțiune transversală) [73]

Utilizarea foliei de Ce la interfața dintre două materiale a permis realizarea unei îmbinări fără fisuri în zonele critice, cu efect de uniformizare și reducere a grăunților în microstructura îmbinării sudate, prin evitarea apariției de compuși intermetalici fragili [73].

Rezultate remarcabile la îmbinarea aliaj de aluminiu – oțel prin suprapunere sunt prezentate de [100] pentru reducerea masei autovehiculelor. Deși sudarea a fost efectuată cu fascicul laser, sudarea hibridă laser-MIG este o variantă ce poate fi investigată pentru creșterea productivității, dar și pentru controlul difuziei materialelor.

2.7. Procedeele de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat

Studiul literaturii de specialitate referitor la procedeele de sudare hibrid laser-arc relevă următoarele:

- procedeele de sudare hibride laser-arc sunt în plină dezvoltare din punct de vedere al interesului arătat de cercetători pe plan internațional, dar, în același timp, sunt implementate cu succes în diferite domenii industriale datorită caracteristicilor sale speciale și a avantajelor oferite;
- cercetările actuale vizează atât studiarea fenomenologiei procesului cât și limitele de aplicabilitate ale procedeei, dar și dezvoltarea de aplicații noi;
- numărul mare de parametri de proces implică un volum relativ ridicat de experimentări pentru optimizare și/sau implementarea în situații specifice, soluția reducerii volumului de muncă și resurse poate fi simularea și/sau utilizarea experimentului de tip factorial;
- interesul deosebit față de optimizarea procesului și dezvoltarea de noi aplicații este susținut de cercetări ce vizează dezvoltarea de modele mai mult sau mai puțin simplificate care să permită prezicerea rezultatelor obținute;
- rezultatele deosebite obținute în cazul variantei laser-WIG recomandă studiarea cuplării hibride pentru laseri de putere redusă și procedeele (micro)WIG și respectiv microplasmă;
- deși principalele aplicații industriale și direcțiile de dezvoltare a procesului de sudare hibrid laser-arc sunt focalizate pe macro-procesare datorită eficienței ridicate și productivității mărite a procedeei, utilizarea combinației fascicul laser – arc electric este de interes și în domeniul microsudării, de ex. pentru sudarea tablelor subțiri [67] în principal datorită faptului că procedeul permite utilizarea unor puteri laser reduse, dar cu utilizarea unor viteze de sudare mari;
- combinațiile cu laserii de putere redusă nu sunt suficient studiate în ceea ce privește varianta hibridă ci doar pentru amorsare facilă a arcului electric și respectiv creșterea stabilității sudării cu arc electric, iar modul de funcționare al laserilor utilizați este în marea majoritate continuu (cw) nu și pulsant (pw).

Urmând tendințele internaționale în ceea ce privește îmbunătățirea noilor procedee de sudare și dezvoltarea procedeei de sudare hibride, dar mai ales nișa de cercetare – dezvoltare în ceea ce privește utilizarea laserilor de putere relativ redusă cu funcționare în regim pulsant, cu aplicabilitate în domeniul micro-sudării, a fost propus și dezvoltat [15,16,18,19,78] un nou procedeu hibrid de sudare laser-arc: procedeul de sudare hibrid *LASER-(micro)WIG pulsant (LmWP, în Engleză PLmT - Pulsed Laser microTIG)*, bazat pe combinarea și cuplarea fasciculului laser cu funcționare în regim pulsant și respectiv procedeul de sudare cu arc electric (micro)WIG pulsant.

2.7.1. Fondul de dezvoltare al noului procedeu de sudare hibrid

Procesul de sudare cu fascicul laser în regim pulsant este caracterizat de obținerea unei pătrunderi efective a sudurii ce depinde în principal de gradul de suprapunere a pulsurilor laser utilizate pentru obținerea sudurii (fig. 2.44.). De asemenea, experimentările de sudare cu fascicul laser în regim pulsant a materialelor compozite cu matrice metalică micro- și nanostructurate au relevat faptul că preîncălzirea duce la îmbunătățirea stabilității procesului prin atenuarea gradientilor de temperatură specifici sudării cu fascicul laser, dar și prin compensarea parțială a direcțiilor de solidificare arbitrare a băii de metal topit cauzate de anizotropia materialului [21].

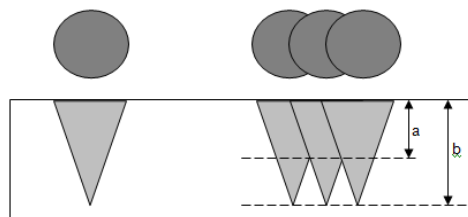


Fig. 2.44. Schema sudării cu fascicul laser în regim pulsant
a. – pătrunderea efectivă a sudurii b. – pătrunderea unui puls laser

Aceste două chestiuni au stat la baza propunerii unei noi variante a procedurii de sudare hibrid laser-arc ce utilizează combinarea sudării cu fascicul laser în regim pulsant cu procedeul de sudare WIG pulsant pentru a atenua variația pătrunderii sudurii (fig. 2.44.), în principal prin controlul parametrilor de sudare WIG. De asemenea, efectele sinergice ale cuplării celor două procese pulsate ar trebui să ducă la îmbunătățirea stabilității procesului de sudare, în principal devierea arcului WIG pe durata curentului de bază. În ceea ce privește prelucrarea materialelor compozite cu matrice metalică micro- și nanostructurate, procesul WIG poate fi folosit ca sursă locală de preîncălzire pentru reducerea gradientilor de răcire la sudarea acestora.

Investigațiile tehnologice inițiale au utilizat procesul de sudare WIG cc pentru determinarea influenței parametrilor de sudare asupra geometriei sudurii. Fig. 2.45. și fig. 2.46. prezintă influența vitezei de sudare și respectiv a distanței între procese asupra pătrunderii sudurii.

Principalele concluzii ale investigațiilor tehnologice efectuate cu această variantă au fost următoarele [21]:

- pătrunderea are valori mai mare pentru situația în care procesul conducător este WIG, dar cu impact asupra stabilității inițierii procesului de sudare
- eficiența procesului de sudare hibrid este crescută la valori relativ reduse ale vitezei de sudare; la creșterea vitezei de sudare pătrunderea scade către valoarea pătrunderii determinată de fasciculul laser
- pentru domeniul de experimentare investigat, se poate aproxima o scădere liniară a pătrunderii cu distanța hibridă
- distanța hibridă are o valoare limită după care cele două procese nu mai sunt cuplate (procesul nu mai este hibrid), iar valoarea pătrunderii este determinată de pătrunderea laser

- pentru creșterea productivității, procesul WIG ar trebui să fie procesul conducător combinat cu o valoare redusă a distanței hibride
- distanța hibridă este limitată de caracteristicile geometrice ale arzătorului WIG precum și de interacțiunea fasciculului laser cu baia de metal topită WIG pentru evitarea stropirilor

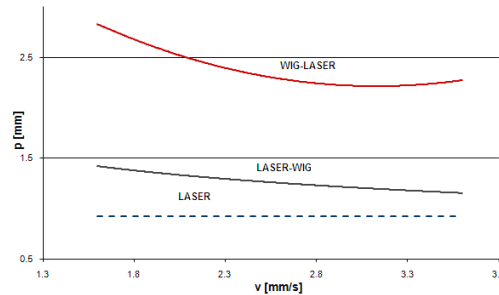


Fig. 2.45. Influența vitezei de sudare asupra pătrunderii [19]

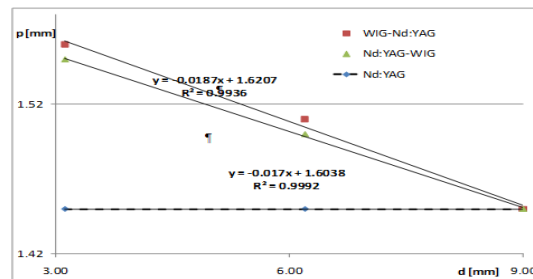


Fig. 2.46. Influența distanței între procese ("distanța hibridă") asupra pătrunderii

Deși, după cum se poate observa din fig. 2.46., varianta WIG-LASER prezintă o creștere sensibilă a pătrunderii, analizele macroscopice ale trecerilor realizate au arătat faptul că utilizarea procesului WIG cc conduce la obținerea unei secțiuni transversale a sudurii ce nu îmbunătățește pătrunderea efectivă (fig. 2.47.). Practic, în această situație principalul parametru de proces ce influențează pătrunderea efectivă este gradul de suprapunere a pulsurilor laser – combinația frecvența de repetiție a pulsurilor laser – dimensiunea spotului – viteza de sudare [21].

Fig. 2.47. Secțiunea transversală a sudurii laser pulsat – WIG cc [19]
a– laser-WIG; b.- WIG-laser

2.7.2. Principiul procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat

Principiul noului procedeu de sudare hibrid este prezentat în fig. 2.48. Similar cu alte variante hibride laser-arc, procedeul LmWP se bazează pe combinarea și cuplarea a două procedee de sudare într-o zonă de prelucrat comună, dar, în acest caz, atât fasciculul laser cât și procesul WIG funcționează în regim pulsat. Chiar dacă în fig. 2.47. forma pulsurilor este una dreptunghiulară – singura formă de puls utilizată de doctorand în cadrul cercetărilor referitoare la noul proces, sunt, de asemenea, posibile și alte variante cu diferite forme și combinații de pulsuri, variante ce pot fi realizate cu surse moderne de sudare ce oferă astfel de facilități.

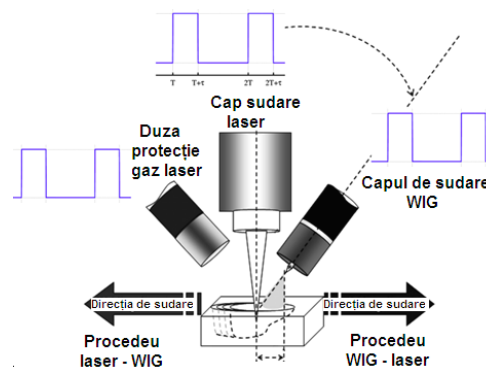


Fig. 2.48. Principiul procedurii de sudare hibrid LmWP / PLmT [16]

În funcție de procesul conducător/direcția de deplasare, avem de a face cu două variante: procedeul laser-(micro)WIG (dacă laserul este procesul conducător) și respectiv (micro)WIG-laser (dacă WIG-ul este procesul conducător).

Noul proces de sudare hibrid propus permite, pe lângă avantajele „clasice” ale procedeelelor hibride laser-arc, posibilități de control ale rezultatelor procesării prin intermediul combinațiilor frecvențelor utilizate pentru cele două procese componente. Pentru abordări mai avansate, sunt posibile și alte modalități de control, prin intermediul defazajului dintre cele două procese, pentru cazul în care cele două procese sunt sincronizate sau prin utilizarea unor forme speciale de puls, pentru unul sau ambele procese componente.

Cu toate că dinamica băii de sudare poate fi influențată prin intermediul parametrilor procesului WIG și prin intermediul diferitelor combinații ale parametrilor de proces, numărul ridicat de parametri de proces fac ca optimizarea procesului să fie relativ dificilă.

2.8. Obiectivele tezei de doctorat

Având în vedere cele prezentate, se poate sintetiza **motivația și scopul** tezei de doctorat: dezvoltarea unui nou proces de sudare hibrid bazat pe combinarea și cuplarea procesului laser pulsat (de putere relativ redusă) cu procesul (micro)WIG pulsat, în vederea atenuării variației de pătrundere specifică sudării cu fascicul laser în regim pulsat și obținerea astfel a unui nou fenomen sinergic.

Pentru atingerea scopului propus, au fost stabilite următoarele **obiective principale**:

- conceperea și dezvoltarea unui sistem experimental care să permită atingerea scopului propus
- caracterizarea noului proces de sudare hibrid prin: studierea dinamicii procesului, elaborarea unei metodologii și proiectarea unui plan experimental care să permită identificarea principalelor caracteristici ale noului proces de sudare și a influenței parametrilor de proces asupra sa, etc.
- stabilirea direcțiilor de dezvoltare și optimizare conform fondului de dezvoltare – atenuarea variației de pătrundere specifică sudării cu fascicul laser în regim pulsant
- dezvoltarea și optimizarea procesului hibrid LASER-(micro)WIG pulsant
- validarea rezultatelor obținute prin derularea unor experimentări de sudare pentru îmbinări concrete

De asemenea, s-a avut în vedere și derularea unor experimentări exploratorii de prelucrare MMC micro și nanostructurate pentru a verifica dacă noul proces de sudare aduce îmbunătățiri în ceea ce privește comportarea la sudare a acestor materiale, comparativ cu prelucrarea cu fascicul laser în regim pulsant.

Astfel, noul proces de sudare hibrid a fost studiat pentru evaluarea dinamicii de proces, caracterizat pentru a determina principalele diferențe față de procedeele de sudare hibride laser-arc, iar prin derularea unui program complex de experimentări au fost determinate modele ce fac corelații între unii parametri de proces și configurația geometrică a sudurii. Programul experimental a permis de asemenea determinarea direcțiilor de optimizare, dar și a condițiilor în care optimul poate fi atins. În același timp, procesul de cercetare experimentală a permis elaborarea unei metodologii pentru optimizare ce poate fi dezvoltată și aplicată pentru determinarea unor alte condiții necesare de optim, funcție de aplicațiile tehnologice la care noul procedeu este utilizat.

Pentru dezvoltarea noului procedeu de sudare hibrid a fost necesară conceperea și realizarea unui sistem experimental și a unor dispozitive pentru realizarea unor capete hibride de sudare, prezentate în capitolul următor.

3. STRATEGIA DE EXPERIMENTARE. SOLUȚIE CONSTRUCTIVĂ SISTEM EXPERIMENTAL PENTRU STUDIAREA ȘI DEZVOLTAREA PROCESULUI DE SUDARE HIBRID LASER-(micro)WIG PULSAT

3.1. Strategia de experimentare

Dezvoltarea unui nou procedeu de sudare hibrid implică un efort relativ important datorită complexității acestuia, iar pentru cazul procesului LmWP, situația a fost chiar mai complicată, datorită faptului că literatura de specialitate studiată nu prezintă cazuri în care s-au utilizat fie sudarea cu fascicul laser în regim pulsant, fie procedeul WIG pulsant.

Experiența anterioară a doctorandului, legată de combinarea și cuplarea sudării cu fascicul laser în regim pulsant cu sudarea WIG cc, nu a inclus suficiente date pentru a putea extrapola fenomenologia procesului pentru situația în care ambele procese sunt pulsante și, de aceea, prima etapă în dezvoltarea noului procedeu de sudare a inclus conceperea și realizarea unui sistem experimental care să permită studierea și caracterizarea procesului hibrid LmWP, corelat cu un experiment bazat pe o strategie Gauss-Seidl care să permită determinarea unui volum de informații cât mai cuprinzător legat de influența parametrilor specifici procesului WIG pulsant, dar și de influența geometriei hibride asupra dinamicii procesului de sudare hibrid LmWP.

Astfel, primul set de experimentări a inclus combinații ale parametrilor de proces WIG și a configurației geometrice a procesului de sudare hibrid reprezentative pentru a studia dinamica procesului de sudare LmWP:

- curenți medii de sudare cu valori comparative celor studiate anterior pentru varianta laser pulsant – WIG cc, dar și valori mai mici pentru a păstra un raport energetic similar
- frecvențe ale curentului WIG reprezentative celor utilizate în practică – valori reduse, valori apropiate de frecvența de repetiție a pulsurilor laser și valori ridicate (către WIG cc)
- valori diferite pentru rata / factorul de umplere WIG pentru a identifica modul de interacțiune arc – electric – fascicul laser în funcție de perioada și valorile curentului de vârf și respectiv de bază
- valori comparative cu cele utilizate pentru combinația laser pulsant – WIG cc pentru distanța dintre cele două procese pentru a putea pune în evidență modul de cuplare hibridă și interacțiune dintre cele două procese pulsante
- valori diferite ale unghiului dintre cele două procese pentru a pune în evidență influența curgerii gazelor asupra dinamicii procesului
- evidențierea principalelor diferențe între situațiile în care procesul WIG este procesul conducător și respectiv situația în care procesul laser este conducător

- evidențierea fenomenelor legate de posibila cuplare a frecvențelor celor două procese și a stabilității procesului la viteze crescute

Pentru completarea informațiilor calitative, obținute prin studierea înregistrărilor video și în IR a încercărilor efectuate, au fost selectate un set de mărimi specifice geometriei îmbinărilor sudate, ținând cont de specificul sudării cu fascicul laser în regim pulsant, prin prelevarea de epruvete transversate, dar și longitudinale și modelarea matematică experimentală pentru parametrii de proces identificați a avea o influență importantă asupra stabilității procesului.

Odată stabilite principalele caracteristici ale dinamicii noului proces de sudare s-a apelat la strategia de tip Box-Wilson de experimentare, bazată pe utilizarea experimentului de tip factorial [30,31,55,89], pentru a studia numărul mare de parametri specifici procesului hibrid de sudare LmWP, dar și interacțiunile dintre aceștia.

Pentru optimizarea procesului s-au urmat câțiva pași succesivi:

- proiectarea și derularea unui experiment factorial bazat pe matrice de tip Taguchi pentru a determina principalii factori de influență (FI) și modul în care aceștia influențează funcțiile obiectiv (FO) avute în vedere
- reducerea numărului de FI urmată de proiectarea și derularea unui experiment factorial fracționat (EFF) pentru a reduce numărul FI și a stabili direcția de deplasare către zona de optim
- proiectarea și derularea unui experiment factorial complet de ordinul doi pentru determinarea coeficienților de regresie a ecuațiilor de variație pentru FO avute în vedere, trasarea graficelor suprafețelor de răspuns și determinarea zonelor de optim pentru FO studiate, dar și zona de optim pentru o combinație în număr cât mai mare a FO importante

Rezultatele obținute au fost validate prin derularea unui set de experimentări tehnologice pentru realizarea unor îmbinări practice realizate cu procedeul de sudare hibrid LmWP. De asemenea au fost derulate experimente exploratorii pe materiale avansate noi din categoria materialelor compozite micro și nanostructurate.

3.2. Soluție constructivă sistem experimental pentru sudare hibridă LASER-(micro)WIG pulsant

Studierea și dezvoltarea noului procedeu de sudare hibrid laser-arc a necesitat conceperea și realizarea unor modificări ale infrastructurii existente de experimentare la ISIM Timișoara, dar și conceperea și realizarea de dispozitive noi (ansamble hibride LASER-WIG) care să permită controlul parametrilor de proces [18,19].

În continuare sunt prezentate variantele propuse pentru realizare, în două combinații: cu utilizarea unei celule flexibile pentru micro-prelucrare cu fascicul laser și robot cartezian și respectiv cu utilizarea unui robot antropomorf.

3.2.1. Soluție de principiu pentru montajul experimental

Pentru realizarea programului experimental de sudare prin procedeul laser-hibrid cu varianta laser-WIG/(micro)WIG pulsant, a fost conceput și realizat un

sistem experimental, prin ajustări constructive la echipamentele/componentele existente, compus în principal din următoarele componente, fig. 3.1.

- sursa fascicul laser
- sursă de sudare cu arc electric
- cap de sudare hibrid (1)
- poziționar cap de sudare hibrid, (2)
- robot cartesian pentru mișcarea probelor de sudat, (3)
- masă suport inertțială, (4)

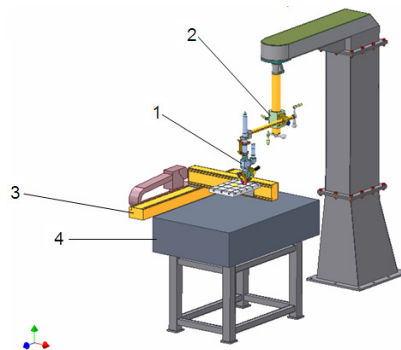


Fig. 3.1. Sistemul experimental

Capul de sudare laser-hibrid, fig. 3.2., se compune dintr-un cap de sudare cu fascicul laser tip TRUMPF 35001 (fig. 3.2., poz. 1), respectiv un pistol WIG, tip BINZEL ABITIG 17V (2), asamblate printr-un montaj care permite reglarea poziției reciproce a celor două capete și a unghiului dintre fascicul și electrod, în domeniul 30-70°.

Reglajele de poziționare a capului față de piesă se asigură printr-un poziționar, (fig. 3.3.), montat suspendat pe o coloană de susținere, (fig. 3.1.) și care permite reglarea manuală a poziției pe verticală (1), respectiv orizontală (2).

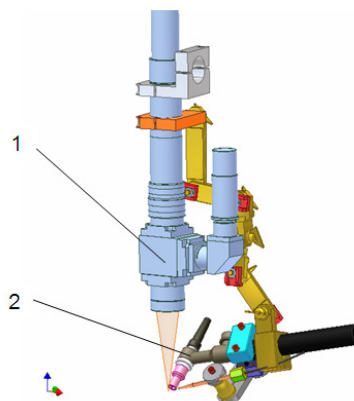


Fig. 3.2. Cap hibrid pentru procedeul LmWP varianta cu sârmă de adaos

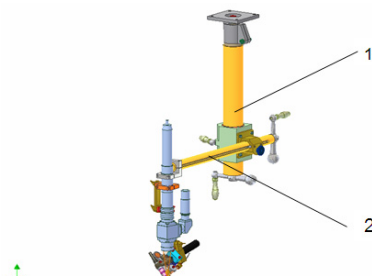


Fig. 3.3. Axele de poziționare cap hibrid

Piesele de sudat sunt așezate pe o masă de lucru (fig. 3.4, poz 1), care se află montat pe un robot cartezian (2), tip YAMAHA FXYx-A1, care asigură conducerea după program a piesei și rostului față de capul de sudare. Întregul ansamblu se află montat pe o masă suport masivă, pentru evitarea trepidațiilor.

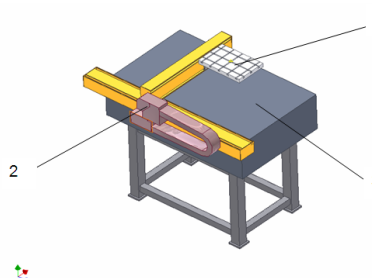


Fig. 3.4. Masa inerțială și robotul cartezian

Pentru asigurarea materialului de adaos la sudare, capul de sudare poate fi prevăzut cu o montură, (fig. 3.4.), pentru ghidarea și poziționarea sârmelor cu diametrul de 0,6-0,8 mm.

Capul de sudare este racordat la o sursă laser tip HL 124P LCU printr-un cablu cu fibră optică, iar pistolul de sudare la un echipament de sudare microplasmă WIG/microWIG tip CLOOS GL80I-H sau la un echipament de sudare Kemppi MASTERTIG 2500 AC/DC.

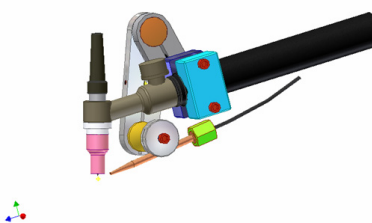


Fig. 3.5. Sistemul pentru poziționare sârmă de adaos

PRINCIPALELE CARACTERISTICI TEHNICE ALE COMPONENTELOR

Sursa de fascicul LASER:

- tipul	Nd:YAG,
pulsat	
- puterea maximă medie	150W
- puterea maximă în puls	5kW

Sursa de curent 1:		
- puterea instalată		5kVA
- curentul maxim de sudare	200A	
Capul de sudare LASER:		
- distanța focală		100 mm
- apertura		20 mm
Robotul cartezian:		
- tipul de comandă		robotizată
- cursa maximă, axa X		820 mm
- cursa maximă, axa Y		590 mm
- precizia de repoziționare		0,01 mm
- viteza maximă		6 m/min
Poziționare:		
- acționare		manuală
- cursa maximă pe verticală		420 mm
- cursa maximă pe orizontală		320 mm

3.3. Soluții realizate pentru studierea și dezvoltarea procesului LASER-(micro)WIG pulsat

3.3.1. Soluție de principiu pentru montajul experimental – robot cartesian YAMAHA FXYX-A1

Pentru realizarea programului experimental de sudare prin procedeul hibrid LASER – WIG/(micro)WIG pulsat s-au efectuat o serie de ajustări ce au permis utilizarea echipamentelor din cadrul laboratorului laser ISIM Timișoara, în mod eficient și flexibil, funcție de aplicația necesară (sudare FL, tăiere FL, sudare hibridă).

Soluția constructivă realizată, este prezentată în fig. 3.6. și este compusă în principal din următoarele componente:

- sursa fascicul laser (1)
- sursă de sudare cu arc electric tip GL 80 I-H MICRO PLASMA-WIG (2) / echipament Kemppi MASTERTIG 2500 AC/DC
- cap de sudare laser (3)
- masă suport inerțială (4)
- exhaustor tip KEMPER Dusty (5)
- poziționar cap de sudare (6)
- robot cartesian pentru asigurarea deplasării probelor de sudat

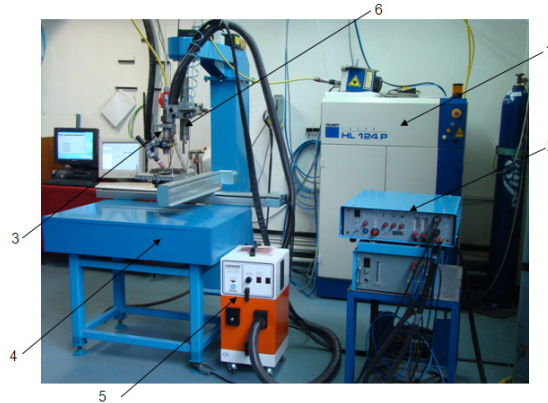


Fig. 3.6. Soluție de principiu pentru montajul experimental [18]

Capul de sudare experimental hibrid LASER – WIG prezentat în fig. 3.7. se compune dintr-un cap de sudare cu fascicul laser tip TRUMPF 35001, respectiv un pistol WIG, tip BINZEL ABITIG 17V, asamblate printr-un montaj care permite reglarea poziției reciproce a celor două capete și a unghiului dintre fascicul și electrod, în domeniul 30°-70°.

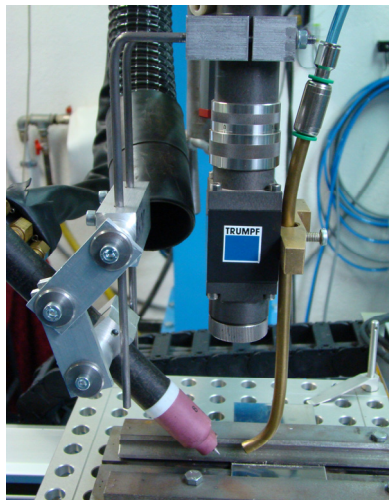


Fig. 3.7. Cap de sudare hibrid LASER - WIG

Reglajele de poziționare a capului față de piesă se asigură printr-un poziționar, (fig. 3.6. poziția 6), montat suspendat pe o coloană de susținere și care permite reglarea manuală a poziției pe verticală respectiv pe orizontală.

Piesele de sudat sunt așezate pe o masă de lucru (fig. 3.8., poziția 1), care se află montată pe un robot cartezian (2), tip YAMAHA FXYX-A1, care asigură conducerea programată sau manuală a piesei și rostului față de capul de sudare. Întregul ansamblu se află montat pe o masă suport masivă (3), pentru evitarea trepidațiilor.



Fig. 3.8. Masa de lucru

Controlul deplasării relative a fost efectuat prin intermediul unui software specializat pentru programare și control specific robotului cartesian FXYX (fig. 3.9.) instalat pe un PC, fie printr-o consolă de programare conectată la controller-ul de tip DRCX – 0505.

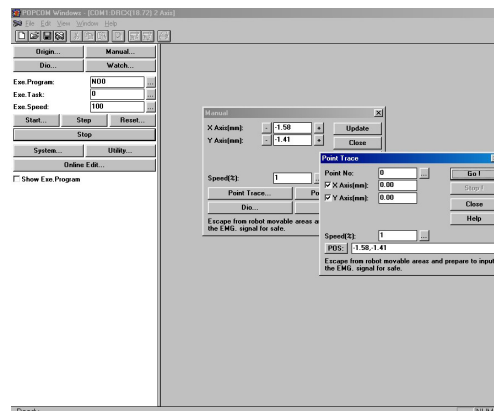


Fig. 3.9. Software programare și control robot cartesian FXYX

După execuția componentelor necesare realizării ajustărilor constructive conform desenelor tehnice, a fost realizat montajul experimental și au fost verificate principalele caracteristici tehnice necesare programului experimental de investigare a procesului de sudare hibrid LmWP.

Verificarea caracteristicilor tehnice necesare programului experimental a inclus:

- verificare nivel masă (riglă de nivel)
- verificare nivel sistem de deplasare (rigla de nivel, echer și comparator)
- verificare nivel masa de lucru
- verificare perpendicularitate cap de sudare laser (riglă de nivel)
- verificare reglaje cap experimental hibrid LASER – WIG:
 - prindere dispozitiv de ajustare (rigid)
 - verificare aliniere în plan cap WIG – cap Laser
- stabilirea unei puteri reduse, realizarea unei linii cu spoturi, coborâre ansamblu până în apropierea spoturilor și deplasarea pe aceeași direcție

- verificare / reglare unghi cap WIG – cap Laser ($30^\circ - 75^\circ$)
- verificare / reglare „parametru hibrid” (distanța dintre arcul WIG și spotul laser) (0,3 – 5 mm)

3.3.2. Soluție de principiu pentru montajul experimental - Robot FANUC ARC Mate 100 iC

Pentru varianta de deplasare robotizată prin montarea ansamblului hibrid pe un robot antropomorf, au fost concepute două soluții.

În fig. 3.10. se prezintă robotul FANUC ARC Mate 100iC, pentru care au fost dezvoltate cele două soluții tehnice.



Fig. 3.10. Robot FANUC ARC Mate 100 iC

Robotul a fost echipat cu un sistem de fixare a capului de prelucrare laser (varianta 1) prezentat în fig. 3.11.

Sistemul este reglabil la direcții de 0° , 45° , 90° față de axa nr 6 a robotului antropomorf.

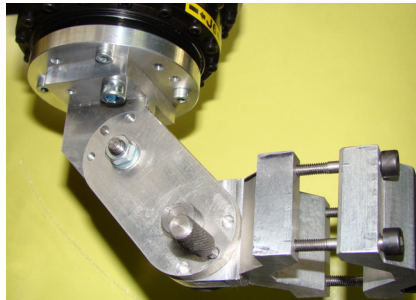


Fig. 3.11. Sistem de fixare cap de prelucrare (tăiere, sudare, cap hibrid)

O altă variantă mai complexă pentru sistemul de fixare a capului de prelucrare (varianta comercială) este prezentată în fig. 3.12. Aceasta este destinată montării capetelor de sudare și tăiere cu fascicul laser pe flanșa de prindere a robotului ArcMate 100iC, soluție ce crește flexibilitatea în utilizarea celor 3 tipuri de aplicații (sudare FL, tăiere FL, sudare hibridă).

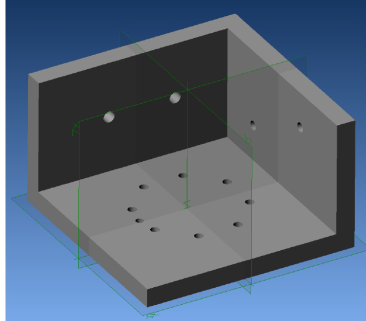


Fig. 3.12. Sistem de fixare cap de prelucrare

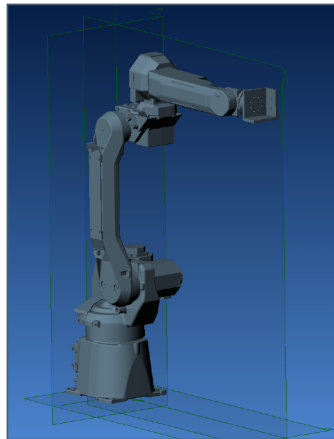


Fig. 3.13. Robot antropomorf cu sistem de fixare cap de prelucrare

Sistemul de fixare asigură susținerea și orientarea sigură a capetelor de prelucrare, în următoarele condiții:

- este montabil pe flanșa de prindere a robotului fără a se modifica sistemul sau flanșa robotului sau fără folosirea unei piese intermediare;
- unghiul de îndoire al capului utilizat va fi de 0° . Sistemul de fixare va avea o orientare fixă sau va dispune de posibilități de orientare după câteva direcții prestabilite (de ex, 45° și 90° , în trepte de 15° de la 0° la 90° , etc.).
- sistemul permite intercalarea unui senzor de coliziune între flanșa robotului și sistemul de fixare;
- sistemul de fixare trebuie să permită schimbarea rapidă a capetelor de sudare, chiar diferite dimensional, prin folosirea de bride, cleme, etc;
- execuție în construcție ușoară (aliaj de aluminiu);
- precizie înaltă de prelucrare.

Sistemul flexibil pentru susținerea capetelor de prelucrare prezentat în fig. 3.14. conține doi echilibrori cu capacități portante diferite.

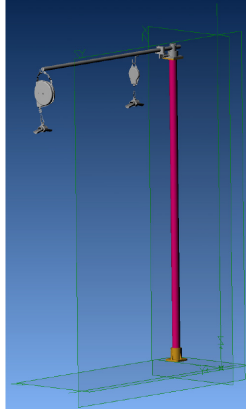


Fig. 3.14. Sistem flexibil pentru susținerea capului de sudare

Sistemul servește la compensarea greutății respectiv susținerea cablurilor flexibile de sudare.

Unul dintre echilibratoare va fi legat la cablul optic dintre sursa de fascicul laser și capul de tăiere/sudare laser montat pe robot, cel de al doilea va fi legat la cablul capului de sudare WIG atașat primului, la sudarea hibridă LASER-WIG.

3.3.3. Experimentări preliminare pentru testarea ajustărilor efectuate

Pentru a verifica dacă ajustările efectuate asigură modificarea parametrilor geometrici de proces, necesari a fi ajustați în cadrul programului experimental au fost efectuate o serie de experimentări preliminare:

- treceri cu fascicul laser în regim pulsat la putere medie de ieșire mică pentru verificarea alinierii în același plan a capului de sudare cu fascicul laser și a capului de sudare WIG
- experimentări cu procedeul hibrid LASER-WIG pentru verificarea posibilității reglării distanței dintre cele două procese precum și pentru verificarea reglării unghiului dintre capul WIG și capul de sudare laser.

Experimentările preliminare efectuate au relevat faptul că ajustările efectuate permit reglarea parametrilor geometrici în domeniile specificate și că sistemul poate fi utilizat în bune condiții pentru programul experimental. Aspectul vizual al materialului de bază afectat de astfel de treceri este prezentă în fig. 3.15.



Fig. 3.15. – Aspectul vizual al experimentărilor preliminare pentru verificarea soluției constructive (treceri cu fascicul laser și treceri laser-WIG pulsat)

4. PROCEDEUL DE SUDARE HIBRID LASER- (micro)WIG PULSAT

4.1. Sistemul experimental pentru studiul dinamicii procesului. Condiții generale de experimentare.

Pentru programul experimental necesar studiului dinamicii procesului de sudare hibrid LmWP a fost utilizat sistemul experimental conceput și realizat, varianta cu utilizarea robotului cartezian pentru deplasarea relativă piesă de prelucrat – cap hibrid și cu utilizarea sursei de sudare WIG KEMPPPI MASTERTIG 2500 AC/DC, sursă ce a putut asigura reglarea frecvenței pulsurilor WIG într-un domeniu larg de variație (inclusiv zona de variație a frecvenței de repetiție a pulsurilor laser).

Pentru studiul dinamicii procesului LmWP, la sistemul experimental utilizat au fost adăugate două sisteme de achiziție/înregistrare video (unul cu captură perpendiculară pe suprafața zonei de sudare, montat pe capul optic de sudare ce a inclus o cameră CCD și unul cu înregistrare perpendiculară față de direcția de sudare) pentru vizualizarea băii de sudare comune LASER – WIG.

Aceste sisteme de achiziție video au fost completate de înregistrări termografice în infraroșu ale zonei procesate cu camera termografică FLIR System A40, cu următoarele caracteristici principale:

- câmp vizual/min focus distance: 24° x 18° / 0.3 m
- rezoluție spațială (IFOV): 1.3 mrad
- sensibilitate termică la 50/60Hz: 0.08°C at 30 °C
- focus: Automat cu motor
- tip detector: „Focal Plane Array” (FPA), micro-bolometer nerăcit
- spectru radiații: de la 7.5 la 13 μm
- domeniul de temperatură: -40°C to +120°C; 300-2000°C
- precizia de măsură (% la citire): ± 2°C or ± 2%
- mod de măsură: Punct, **Zonă**, Linie, Diferențe
- corecție automată a emisivității: Variabilă de la 0.1 la 1.0

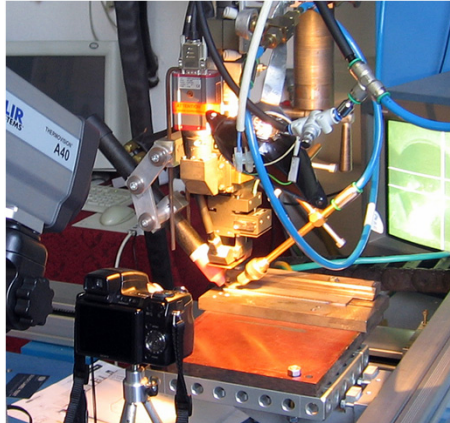


Fig. 4.1. Ansamblul experimental final cu 3 sisteme de achiziție video: CCD, camera video, camera termografică IR

Se precizează faptul că valoarea temperaturii monitorizate în zona băii comune a fost influențată de utilizarea unui jet de aer de presiune ridicată pentru protecția opticii de sudare laser ("crossjet"), pe toată durata experimentărilor, fapt ce a dus la scăderea valorilor înregistrate, dar că presiunea aerului a fost aceeași pe parcursul tuturor experimentărilor.

În cadrul primelor experimentări efectuate, sistemul a prevăzut și utilizarea unei camere cu filmare rapidă (până la 1000fps), dar la care s-a renunțat datorită influențelor electromagnetice inerente aprinderii arcului WIG, cu curent de înaltă frecvență. Montajul experimental final este prezentat în fig. 4.1., iar în fig. 4.2. este prezentată o imagine din timpul experimentărilor.

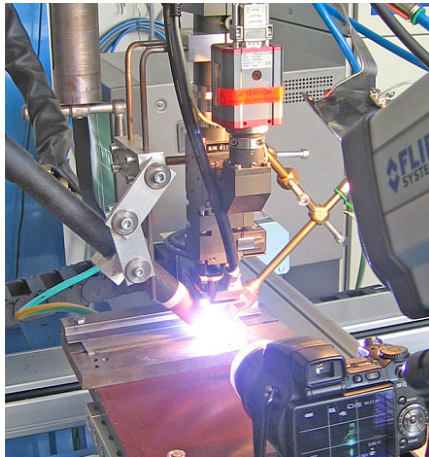


Fig. 4.2. Imagine din timpul experimentărilor

Pentru experimentări au fost decupate table din oțel aliat inoxidabil austenitic (DIN X5CrNi18-10 / EN 1.4301, livrat după EN 10088-3:2005) la dimensiunea de 150x35mm cu grosimi de 2 și respectiv 3 mm, utilizate în funcție de setul de parametri de proces pentru evitarea pătrunderii totale a materialului de

bază. Pe tablele decupate au fost efectuate treceri cu procedeul hibrid, marcate în funcție de varianta utilizată, de exemplu WL pentru varianta WIG-laser, LW pentru varianta laser-WIG, etc. pentru asigurarea trasabilității necesare efectuării analizelor și măsurătorilor. Pe fiecare probă au fost efectuate maxim 4 treceri, pentru a limita deformarea materialului de bază și influențarea caracteristicilor geometrice ale sistemului experimental. Pentru protecția băii de sudare a fost utilizat Ar 99%, atât pentru procedeul WIG cât și pentru procedeul de sudare cu fascicul laser în regim pulsat. Pentru toate experimentările distanța electrod WIG – piesă a fost 1.0mm, iar dimensiunea spotului laser 0.7mm.

4.2. Experimentări pentru studiul dinamicii procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat

Pe baza unor experimentelor anterioare cu procedeul hibrid laser pulsat – WIG în curent continuu, ce au demonstrat creșterea adâncimii pătrunderii pentru varianta WIG-laser (vezi fig. 2.45÷2.47), a fost utilizată următoarea logică de experimentare:

- experimentări preliminare pentru stabilirea zonei / punctului central de experimentare (parametri de proces laser, parametri de proces WIG, parametri specifici procesului hibrid)
- fixarea parametrilor fasciculului laser la valori convenabile din punct de vedere a stabilității procesului
- experimentări cu varianta WIG-laser pulsat – studierea unui număr mare de combinații pentru acumularea de informații asupra dinamicii procesului
- reducerea numărului de combinații experimentale pe baza observațiilor din experimentările cu varianta WIG-laser și derularea unor experimentări cu varianta laser-WIG pulsat
- experimentări WIG-laser pulsat și respectiv laser-WIG pulsat fără gaz de protecție laser
- experimentări cu varianta laser-WIG pulsat la viteze crescute de sudare
- experimentări WIG-laser pulsat / laser-WIG pulsat cu cuplarea frecvențelor (frecvența pulsurilor WIG multiplu al frecvenței de repetiție a pulsurilor laser)

4.2.1. Experimentări preliminare pentru stabilirea zonei de investigat

Pentru stabilirea zonei de experimentare a fost efectuată o serie de experimentări preliminare cu realizarea unor treceri cu fascicul laser și respectiv doar cu procedeul WIG, pentru verificarea parametrilor de proces, urmată de cuplarea celor două procese și stabilirea parametrilor de sudare pentru procedeul hibrid, dar și a vitezei de sudare pentru evitarea pătrunderii totale a probei.

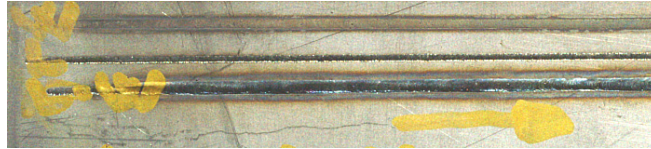


Fig. 4.3. Experimentări pentru stabilirea zonei de experimentare (W – trecere WIG; L – trecere laser; WL – trecere WIG-laser)

În fig. 4.3. sunt prezentate un set de treceri pentru stabilirea zonei de experimentare, în fig. 4.4., un detaliu al trecerilor respective, fig. 4.5. prezintă un cadru din timpul procesului hibrid laser-WIG în care se poate observa plasma generată de laser și devierea arcului WIG către aceasta, iar fig. 4.6. – 4.8. prezintă câteva cadre cu baia comună a procesului hibrid în care se poate observa devierea arcului WIG către zona fierbinte și modul cum această deviere influențează dinamica băii de sudare (curgerea, agitația și respectiv solidificarea).

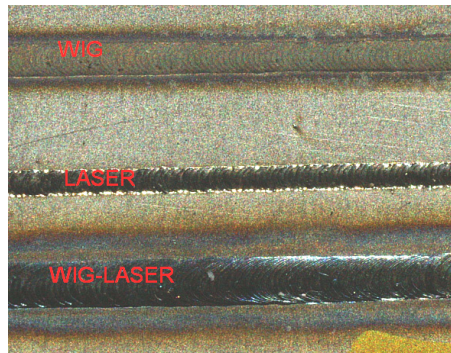


Fig. 4.4. Aspectul vizual al trecerilor pentru stabilirea zonei de experimentare (suprafață)



devierea arcului WIG
către spotul laser

Fig. 4.5. Detaliu plasmă generată de fasciculul laser și devierea arcului WIG către fasciculul laser [19]



Fig. 4.6. Creșterea curentului WIG și devierea către spotul laser

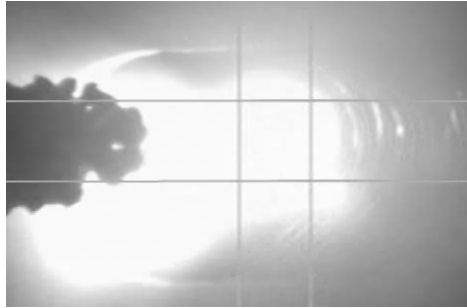


Fig. 4.7. Alungirea arcului WIG cu creșterea agitației băii de sudare

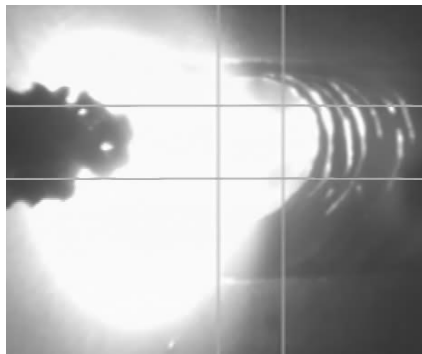


Fig. 4.8. Scăderea curentului WIG și reducerea dimensiunii băii de sudare comune (formarea solzilor sudurii)

Setul de experimentări preliminare a permis stabilirea zonei centrale de experimentare conform tabelului 4.1, iar variația temperaturii monitorizată în timpul procesului este prezentată în fig. 4.9.

Tabelul 4.1. – Zona centrală de experimentare

Vs [mm/s]	WIG			HIBRID		LASER				
	Imediu [A]	FrecvW [Hz]	ratWIG[%]	a [mm]	unghi [°]	Pp [W]	dp [ms]	FrecvL [Hz]	Ep [J]	PmedieL [W]
3.6	20	15	49	1.4	45	1400	3	15	4.2	63

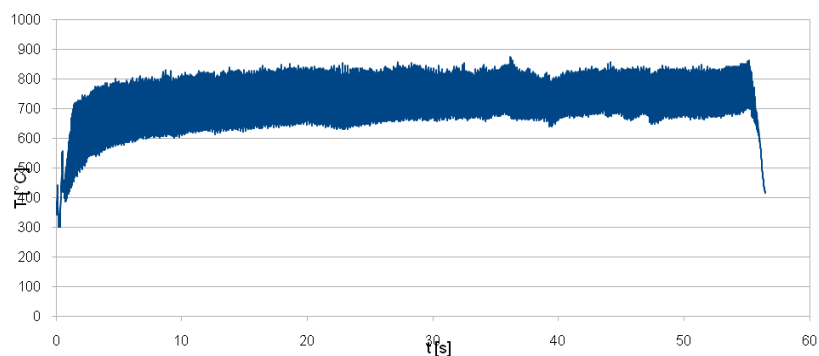


Fig. 4.9. Variația temperaturii zonei băii comune WIG-LASER

4.2.2. Influența parametrilor de proces asupra dinamicii procesului de sudare hibrid WIG-laser pulsant

După stabilirea punctului central, planul experimental a continuat cu studierea influenței parametrilor de proces asupra dinamicii variantei WIG-laser. Pentru aceasta, a fost elaborat un plan de experimentare care a păstrat la aceeași valoare parametrii laser (conform tabelului 4.1), dar cu modificarea parametrilor procedurii WIG și a configurației geometrice a procesului hibrid conform tabelului 4.2.

Tabelul 4.2. – Parametrii de proces investigați

WIG	CONFIGURAȚIA GEOMETRICĂ
Imediu / Iav: 15; 20; 28 A	"distanța hibridă" a / ahibrid: 1.4; 3; 6mm
FrecvW/FrecvWIG.: 1;15; 150 Hz	Unghi FL-WIG: 39, 45, 60 grade
Rata/factorul de umplere (ratWIG/ratW): 40; 60%	

Din combinația de parametri prezentați în tabelul 4.2 a reieșit un volum de peste 140 de încercări necesare ($3 \times 3 \times 3 \times 2 = 162$ încercări) pentru studiul dinamicii variantei (micro)WIG-laser. Reducerea numărului de încercări efectuate a fost cauzată de ne-derularea unor încercări în unele dintre punctele extreme ale spațiului multidimensional de experimentare, la care instabilitățile au fost extreme (fie stingerea arcului WIG, fie stropiri extreme ce puteau duce la deteriorarea capului optic de sudare laser).

După studierea capturilor video efectuate în cadrul programului experimental, au putut fi stabilite principalele observații, asupra influenței parametrilor investigați asupra dinamicii procesului hibrid LmWP, varianta WIG-laser pulsant:

- stabilitatea procesului scade la valori reduse ale curentului de sudare și a frecvenței pulsurilor WIG, dar și cu creșterea distanței dintre cele două procese datorită scăderii gradului de cuplare hibridă a celor două procese și tranziția către un proces ce nu mai e hibrid ci unul asistat
- odată cu scăderea gradului de cuplare și tranziția către un proces ce nu mai este hibrid are loc separarea băilor de sudare chiar și la distanțe mici între cele două procese deși se poate observa o deviere redusă a arcului WIG către spotul/plasma generată laser.
- în condițiile în care scade cuplarea celor două procese, asimetria magnetică a sistemului experimental utilizat (aparitia suflajului magnetic), dar și gazul de protecție laser au dus la apariția unor devieri/pendulări ale arcului WIG față de direcția de sudare mai ales în zona curentului de bază (fig. 4.11.) ce pot fi atenuate prin reducerea distanței dintre cele două procese corelată cu creșterea frecvenței WIG și ratei de umplere (fig. 4.10.)

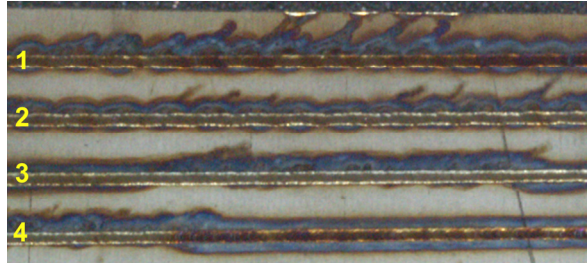


Fig. 4.10. Stabilizarea procesului la curenți mici (15A) și distanță redusă între procese prin creșterea ratei de umplere (de la 40% la 60%), a frecvenței pulsurilor WIG (1H la 15Hz) și combinarea celor două (15Hz cu 60%) [16]
1 - ratWIG=40%, FrecvW=1Hz; 2 - ratWIG=60% FrecvW=1Hz; 3 - ratWIG=40%, FrecvW=15Hz; 3 - ratWIG=60%, FrecvW=15Hz



Fig. 4.11. Devierea arcului WIG datorită suflajului magnetic și a gazului de protecție laser în zona curentului de bază și stabilizarea acestuia prin creșterea ratei de umplere procesului WIG

- fenomenul de deviere a arcului dispare la utilizarea valorilor mari ale curentului mediu (fig. 4.12.) datorită creșterii dimensiunii băii de sudare, dar și la valori diferite de 45° ale unghiului dintre FL și arzătorul WIG datorită modificării curgerii gazelor de protecție în zona băii de sudare (fig. 4.13.)

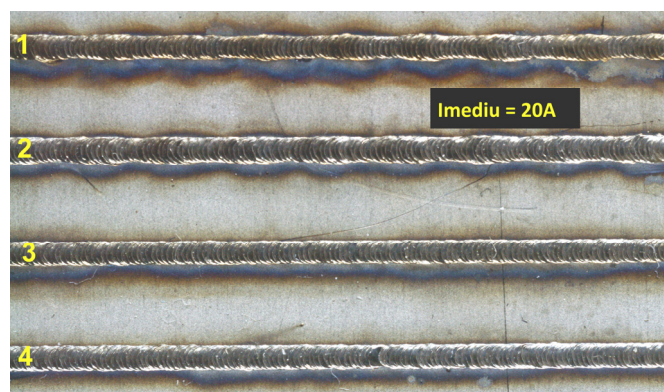


Fig. 4.12. Lipsa suflajului magnetic la curenți mici și unghi FL-WIG 39° (stabilitatea crește cu creșterea frecvenței și ratei de umplere WIG)
1 - ratWIG=40%, FrecvW=1Hz; 2 - rat=60%, FrecvW=1Hz; 3 - rat=40%, FrecvW=15Hz; 4 - rat=60%, FrecvW=15Hz

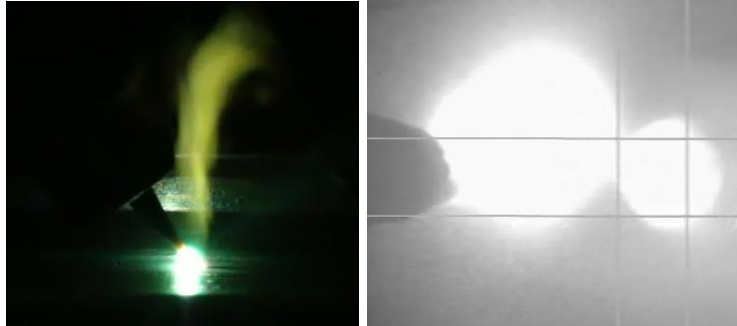


Fig. 4.13. Stabilizarea procesului datorită modificării curgerii gazelor de protecție la valoarea unghiului FL-WIG 39°

- la distanță redusă între cele două procese (1.4mm), creșterea curentului mediu, în combinație cu frecvențe mici (1Hz) sau medii și rate de umplere mici pentru curentul WIG, produce acumulări de metal topit și creșterea dimensiunii băii de sudare la intervale regulate (fig. 4.14.), fenomen ce scade în intensitate cu creșterea ratei de umplere (fig. 4.15.), dar și la frecvențe mari (150Hz) indiferent de valoarea ratei de umplere (fig. 4.15.); înregistrările cu camera ccd au relevat faptul că dimensiunea băii de metal topit crește în zona curentului de vârf (fig. 4.16.) fapt ce este evidențiat și de monitorizarea efectuată cu camera termografică (fig. 4.17.)

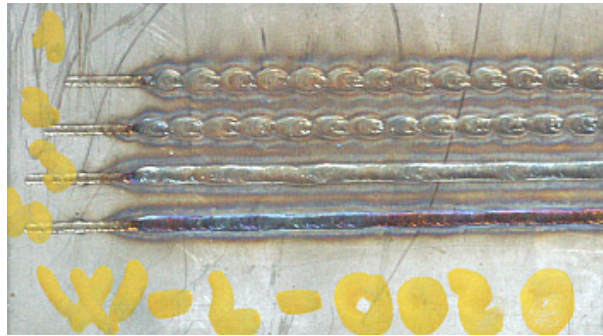


Fig. 4.14. Creșterea dimensiunii băii de sudare la curenți mari (28A) și frecvențe mici (1Hz: 1 și 2) și atenuarea fenomenului prin creșterea frecvenței pulsurilor WIG (15Hz: 3 și 4); (rata de umplere: 40% - 1 și 3; 60% - 2 și 4)

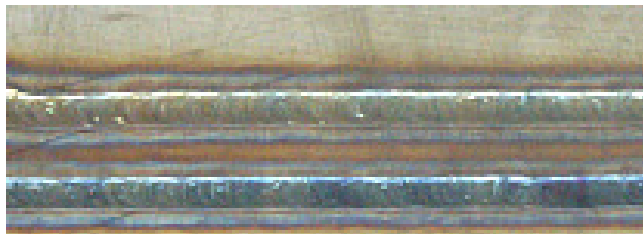


Fig. 4.15. Lipsa variației dimensiunilor băii topite la curenți mari (28A) și frecvențe mari (150Hz)
ratWIG: 40% (trecerea superioară) și 60% (trecerea inferioară)

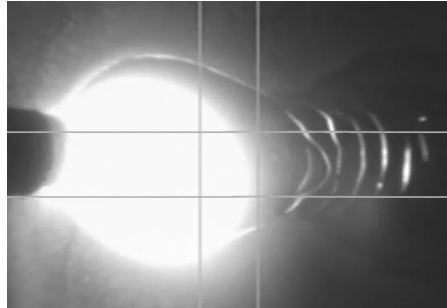


Fig. 4.16. Creșterea dimensiunii băii de sudare la distanța redusă între procese în zona curentului de vârf

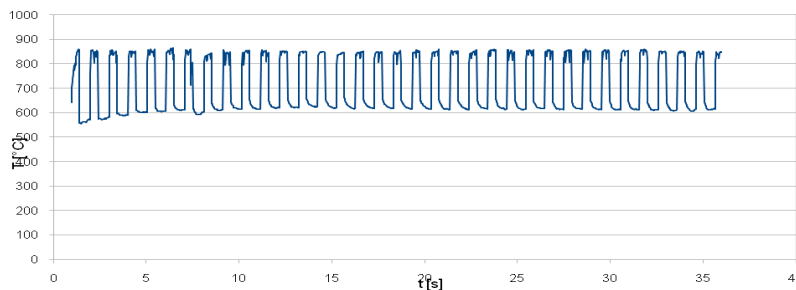


Fig. 4.17. Variația temperaturii în zona monitorizată, la distanță redusă între procese (1.4mm), curent de valoare relativ mare (28A) și frecvență mică (1Hz); $T_{max}=865.263^{\circ}\text{C}$; $T_{min}=591.807$; Amplitudinea= 273.456°C

- fenomenul de creștere regulată a dimensiunii băii de sudare la creșterea curentului mediu de sudare, scade în intensitate cu creșterea distanței între procese (scăderea gradului de cuplare hibridă între procese)
- la valori mici (15A) ale curentului mediu de sudare și frecvență mică, cele două procese au fost decuplate la distanță de 3mm, rezultatul procesării fiind influențat doar de fasciculul laser, arcul WIG producând doar topiri superficiale ale materialului (fig. 4.18, fig. 4.19) deși în zona curentului de vârf a fost observată devierea arcului spre zona spotului laser (fig. 4.20)

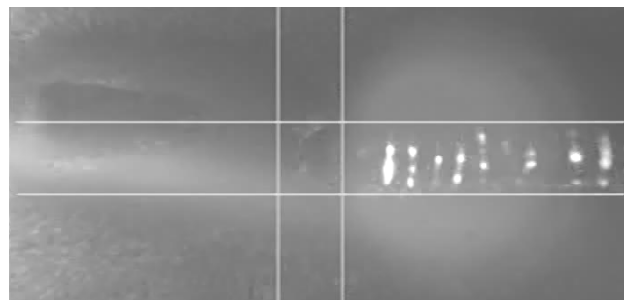


Fig. 4.18. Decuplarea proceselor la curent mediu de sudare 15A și $a=3\text{mm}$

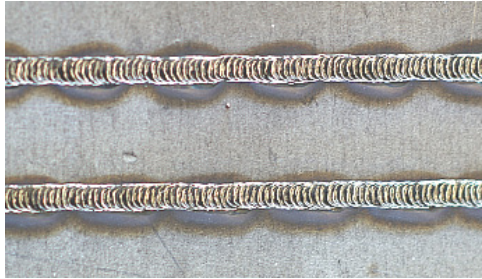


Fig. 4.19. Aspectul suprafeței sudurii la curent mediu 15A și $a=3\text{mm}$, rata de umplere 40 (trecerea superioară) și respectiv 60% (trecerea inferioară)



Fig. 4.20. Devierea arcului WIG spre plasma generată laser în zona curentului de vârf ($I_{\text{med}}=15\text{A}$, $a=6\text{mm}$, $\text{ratWIG}=40\%$)

- diferența maximă de temperatură în zona monitorizată, la aceeași configurație a cuplării celor două procese de sudare (unghi FL-WIG și distanță între procese) depinde de frecvența pulsurilor WIG și de factorul de umplere: cu cât frecvența pulsurilor și factorul de umplere sunt mai mari, cu atât variația de temperatură este mai mică (fig. 4.21. – 4.24.)

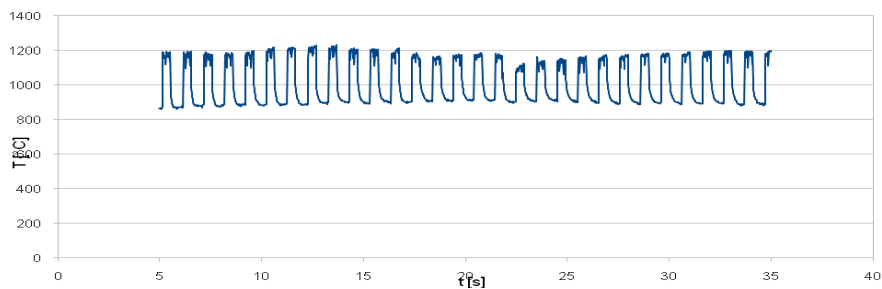


Fig. 4.21. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență mică WIG ($I_{\text{med}}=28\text{A}$, $\text{FrecvWIG}=1\text{Hz}$, $\text{ratWIG}=40\%$)

Temp. MAX	1234.663	[°C]	Amplitudinea	373.755	[°C]
Temp. MIN	860.908	[°C]			

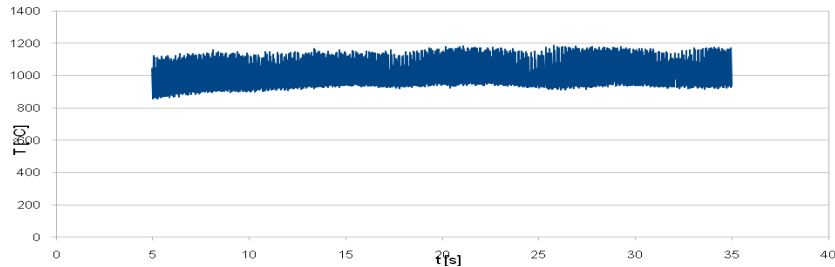


Fig. 4.22. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență medie WIG (Imed=28A, FrecvWIG=15Hz, ratWIG=40%)

Temp. MAX 1185.223 [°C] Amplitudinea 330.132 [°C]
Temp. MIN 855.091 [°C]

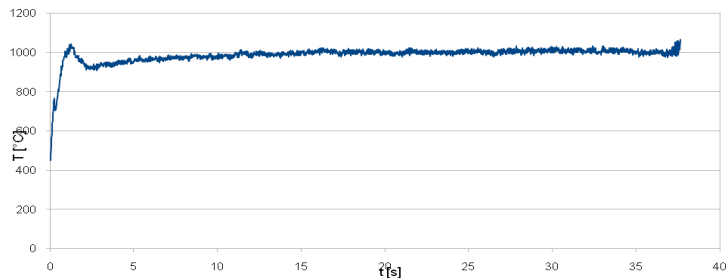


Fig. 4.23. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență mare WIG (Imed=28A, FrecvWIG=150Hz, ratWIG=40%)

Temp. MAX 1033.814 [°C] Amplitudinea 85.847 [°C]
Temp. MIN 947.967 [°C] [Tmax - Tmin]

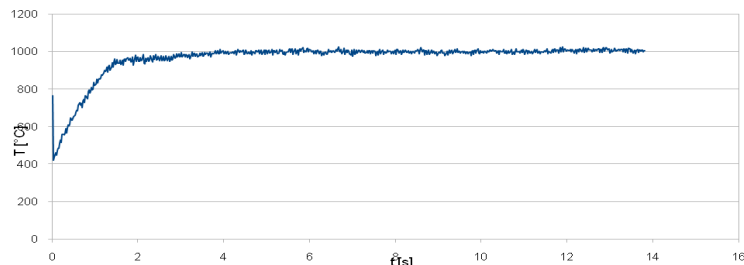


Fig. 4.24. Variația temperaturii în zona monitorizată la frecvență mare WIG cu reducerea amplitudinii prin creșterea ratei de umplere WIG (Imed=28A, FrecvWIG=150Hz, ratWIG=60%)

Temp. MAX 1025.171 [°C] Amplitudinea 49.534 [°C]
Temp. MIN 975.637 [°C] [Tmax - Tmin]

- fenomenul de reducere a amplitudinii variației temperaturii monitorizate a fost observat și la creșterea sau scăderea valorii unghiului FL-WIG (reducerea unghiului WIG-piesă), dar la valori reduse ale temperaturilor maxime și minime înregistrate (fig. 4.25.) cauzate de modificarea curgerii gazelor de protecție în zona prelucrată și răcirea mai rapidă a băii de sudare

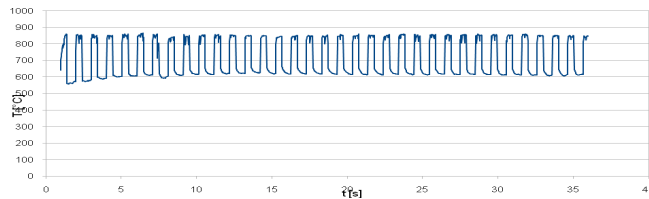


Fig. 4.25. Variația temperaturii monitorizate la unghi FL-WIG 55°
($I_{med}=28A$, $FrecvWIG=1Hz$, $ratWIG=40\%$)

Temp. MAX	865.263 [°C]	Amplitudinea	273.456 [°C]
Temp. MIN	591.807 [°C]	[Tmax - Tmin]	

- amplitudinea (determinată ca diferența dintre maximum și minimum temperaturii înregistrate pe zona procesului considerată stabilă) a avut valori minime pentru unghiul FL-WIG de 45°

4.2.3. Influența parametrilor de proces asupra dinamicii procesului de sudare hibrid laser-WIG pulsant

Pentru varianta laser-WIG pulsant (fasciculul laser ca proces conducător), pe baza experimentărilor efectuate cu varianta WIG-laser și a rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor anterioare, a fost selectat un set de 18 combinații a variabilelor de proces studiate, pentru stabilirea de corelații între acestea și caracteristicile geometrice ale trecerilor realizate.

Pentru aceasta, curentul mediu de sudare a fost păstrat la valoarea de 20A, distanța dintre cele două procese la 3mm și au fost variați următorii parametri:

- unghiul FL-WIG: 39, 45 și 60°
- frecvența pulsurilor WIG: 1, 15 și 150Hz
- rata de umplere WIG: 40 și 60%

Principalele observații asupra dinamicii procesului, pentru varianta LASER-WIG pulsant au fost următoarele:

- comparativ cu varianta WIG-laser procesul a fost mai stabil cu mai puține stropiri, instabilități fiind observate la frecvență mică a curentului pulsant WIG, cauzate, în principal de gazul de protecție laser
- fenomenul de creștere a dimensiunii băii de sudare a fost prezent, dar mai puțin vizibil chiar la frecvență și rată de umplere mică a curentului pulsant WIG (fig. 4.26.)
- devierile arcului WIG cauzate de gazul de protecție laser sunt corectate de pulsurile laser atât în zona curentului de vârf cât și în zona curentului de bază (fig. 4.27. și fig. 4.28).

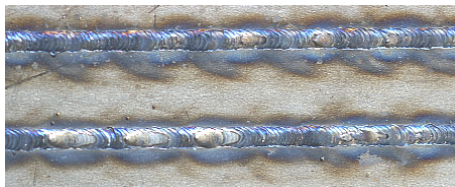


Fig. 4.26. Creșteri ale dimensiunii băii de sudare la frecvențe mici ale curentului pulsant WIG (rata de umplere 40 - sus și respectiv 60% - jos; $I_{av}=20A$)

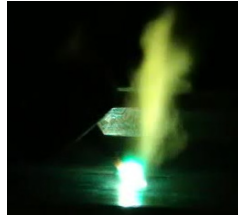


Fig. 4.27. Atenuarea devierii arcului WIG de către pulsul laser în zona curentului de bază (Iav=20A, rataWIG=40%)

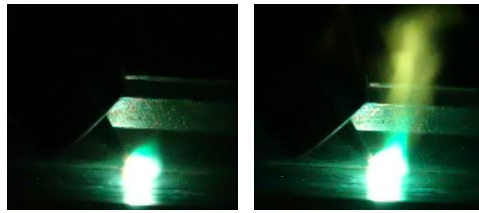


Fig. 4.28. Creșterea volumului arcului WIG datorită plasmei generate laser și devierea către spotul laser (Iav=20A, rataWIG=40%, FWIG=1Hz)

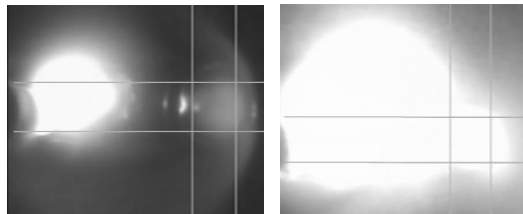


Fig. 4.29. Corectarea devierii arcului WIG pulsat în prezența pulsului laser (în zona de bază a curentului și respectiv în zona curentului de vârf) Iav=20A, rataWIG=40%, FWIG=1Hz

- creșterea unghiului FL-WIG pare să influențeze fenomenul de creștere a dimensiunii băii de sudare; astfel, cu cât unghiul FL-WIG este mai mare cu atât fenomenul este mai atenuat la valori identice pentru restul parametrilor de proces, datorită modificării modului de curgere a gazelor de protecție ale celor două procese
- variația de temperatură se manifestă similar cu situația WIG-laser pulsat, cu precizarea că are loc la valori mai mari, iar în zona experimentată, amplitudinea variației are valori mai mari inclusiv la frecvența de 150Hz a curentului WIG (fig. 4.30.)

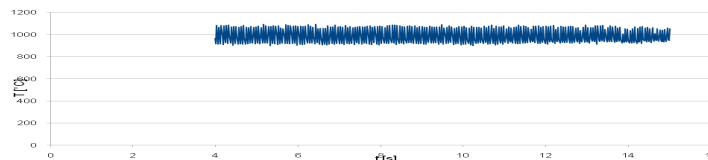


Fig. 4.30. Domeniul de variație a temperaturii pentru varianta laser-WIG pulsat (unghi FL-WIG 39°, a=3mm) Imed=20A, FrecvWIG=50Hz, ratWIG=40%)

Temp. MAX	1093.728	[°C]	Amplitudinea	194.281	[°C]
Temp. MIN	899.447	[°C]			

4.2.4. Experimentări fără gaz de protecție laser

Datorită faptului că înregistrările video efectuate au demonstrat o influență puternică a gazului de protecție laser asupra dinamicii procesului de sudare hibrid WIG-laser/laser-WIG pulsat ce pot duce la stingerea arcului WIG în anumite situații, a fost efectuat un set de experimentări fără gaz de protecție laser, aspectul vizual al trecerilor realizate fiind prezentat în fig. 4.31. și respectiv fig. 4.32. Parametrii de proces variabili utilizați în cadrul setului de experimentări sunt prezentați în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. - Parametrii de proces pentru experimentările fără gaz de protecție

MARCAJ	WIG			GEOMETRICI	
	<i>Imediu</i>	<i>Frecv</i>	<i>ratWIG</i>	<i>a</i>	<i>unghi</i>
WL-ng					
0001-1	28	15	60	1.4	45
0001-2	28	15	40	1.4	45
0001-3	28	1	60	3	45
LW-ng					
0002-1	20	15	40	3	45
0002-2	20	1	60	3	45
0002-3	20	150	60	3	45

Experimentările cu varianta WIG-laser pulsat fără gaz de protecție laser (fig. 4.31) au pus în evidență apariția unor oxidări superficiale mai intense, asociate unei distanțe reduse între cele două procese, comparativ cu aspectul vizual al trecerilor similare la care s-a utilizat și gaz de protecție laser. Înregistrările video au relevat că procesul este de asemenea însoțit de stropiri (fig. 4.33.) – stropi cu dimensiune relativ redusă, comparativ cu situația în care este utilizat gazul de protecție laser.



Fig. 4.31. Treceri WIG-laser pulsat fără gaz de protecție laser – aspect vizual (de sus în jos trecerile WL-ng 0001-1 la 0001-3)

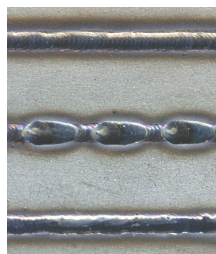


Fig. 4.32. Treceri laser-WIG pulsat fără gaz de protecție laser – aspect vizual (de sus în jos trecerile: LW-ng 0002-1 la 0002-3)



Fig. 4.33. Stropiri in cazul WIG-laser pulsat fără gaz de protecție laser

În cazul variantei laser-WIG pulsat (fig. 4.32) s-a observat lipsa oxidărilor datorită protecției de gaz asigurată de arzătorul WIG în urma fasciculului laser și a fost pus în evidență fenomenul de creștere a dimensiunii băii de metal topit în zona curentului de vârf. De asemenea, la frecvență mare a pulsurilor WIG au fost observate instabilități ce au fost susținute și de modul de variație a temperaturii zonei monitorizate (fig. 4.34.).

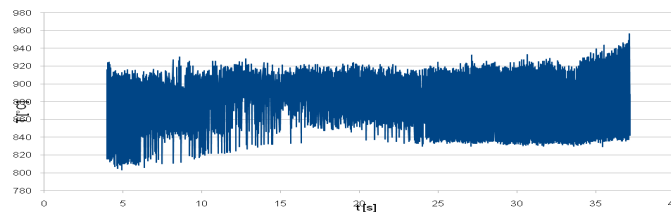


Fig. 4.34. Variația temperaturii în zona monitorizată pentru varianta laser-WIG pulsat fără gaz de protecție la frecvență mare (150Hz) a pulsurilor WIG

4.2.5. Experimentări cu modificarea vitezei de sudare și a frecvenței de repetiție a pulsurilor laser

Pentru evaluarea situației în care se poate obține cuplarea frecvenței de repetiție a pulsurilor laser cu frecvența curentului WIG a fost efectuat un set de experimentări cu variantele WIG-laser și respectiv laser-WIG la valori ale frecvenței pulsurilor WIG de 15 și 30Hz, însoțită și de o variație a vitezei de sudare (tabel 4.4).

Aspectul vizual al trecerilor realizate în aceste condiții este prezentat în fig. 4.35. – 4.37.

Vizualizarea înregistrărilor video a relevat apariția stropirilor la creșterea vitezei de sudare atât pentru varianta WIG-laser cât și pentru varianta laser-WIG (mai puțin intense) pentru ambele frecvențe ale pulsurilor WIG investigate (fig. 4.35).

Aceste instabilități au putut fi corelate cu scăderea gradului de acoperire/suprapunere a pulsurilor laser odată cu creșterea vitezei de sudare și deci în variații ale intensității cuplării fascicul laser – material, în timpul procesului. Stropirile observate au fost asociate de asemenea procesului WIG ceea ce explică scăderea gradului de cuplare hibridă între cele două procese, datorită reducerii gradului de suprapunere a pulsurilor laser și deci de apariția unor răcirii intermediare mai pronunțate. Răcirile intermediare mai pronunțate au dus la reducerea în intensitate a influențelor specifice ale procesului laser asupra arderii arcului electric din imediata vecinătate mai ales în timpul curentului de bază.

Tabelul 4.4. – Setul de experimentări pentru verificarea cuplării frecvențelor cu variația vitezei de sudare

Marcaj	I_{mediu} [A]	FrecvWIG [Hz]	ratWIG %	a [m m]	Unghi FL- WIG [°]	Vs [mm/ s]
WIG-LASER pulsat						
WLV-0001-1	20	15	60	2.4	45	3.6
0001-2		30				3.6
0001-3		15				5.4
0001-4		30				5.4
0002-1		15				7.2
0002-2		30				7.2
LASER-WIG pulsat						
LWV-0002-3	20	15	60	2.4	45	3.6
0002-4		30				3.6
0003-1		15				5.4
0003-2		30				5.4
0003-3		15				7.2
0003-4		30				7.2

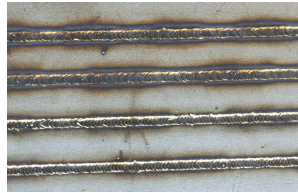


Fig. 4.35. Aspectul vizual al trecerilor pentru verificarea cuplării frecvențelor de repetiție la creșterea vitezei (de sus în jos: WLV-0001.1-1.4)



Fig. 4.36. Aspectul vizual al trecerilor pentru verificarea cuplării frecvențelor de repetiție la creșterea vitezei (de sus în jos: WLV-0002.1-2.2; LVW0002.3-2.4)

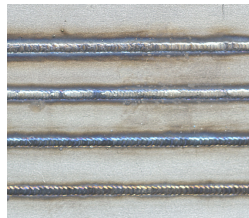


Fig. 4.37. Aspectul vizual al trecerilor pentru verificarea cuplării frecvențelor de repetiție la creșterea vitezei (de sus în jos: LVW0003.1-3.4)

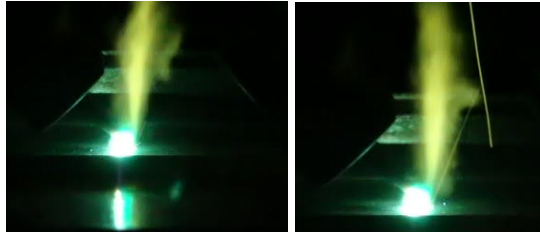


Fig. 4.38. Stropiri la creșterea vitezei de sudare datorate scăderii gradului de cuplare FL arc WIG

Observațiile calitative asupra dinamicii procesului de sudare laser-WIG pulsat, obținute în cadrul programului experimental au fost, de asemenea, completate de analize pentru modelarea procesului cu stabilirea unor relații între variabilele de proces și caracteristicile geometrice ale trecerilor realizate.

4.3. Caracterizarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat

Utilizând înregistrările video și termografice efectuate au putut fi identificate principalele fenomene ce caracterizează procedeul de sudare hibrid laser-WIG pulsat comparativ cu varianta laser-pulsat-WIG cc, dar și cu celelalte procedee hibride laser-arc.

Dacă pentru cazul procedeului WIG cc fenomenele tranzitorii sunt influențate doar de frecvența de repetiție a pulsurilor laser corelate cu viteza de sudare și dimensiunea spotului laser (rata de suprapunere a spoturilor) – fenomenul de creare și închidere a găurilor de cheie, iar cuplarea hibridă depinde în principal de distanța dintre procese, în cazul procedeului laser-WIG pulsat (laser pulsat cuplat hibrid cu WIG pulsat), deși a fost pus în evidență principalul fenomen caracteristic procedeelor de sudare hibride laser-arc (devierea arcului electric către plasma generată de laser – fig. 4.39.), pot fi distinse trei situații tranzitorii:

- cuplarea laser-arc electric pe perioada curentului de bază (fig. 4.40.a.)
- cuplarea laser-arc electric pe perioada curentului de vârf (fig. 4.40.b.)
- cuplarea laser-arc electric pe perioada tranziției curent de bază – curent de vârf și respectiv curent de vârf – curent de bază (fig. 4.40.c.)

Mai mult, aceste cuplări tranzitorii, sunt influențate de combinația frecvența de repetiție a pulsurilor laser – frecvența pulsurilor WIG și rata curentului de sudare WIG ce determină durata și amplitudinea curentului de bază și curentului de vârf, fenomen pus în evidență de experimentările în care s-a observat creșterea dimensiunii băii de sudare la intervale regulate.

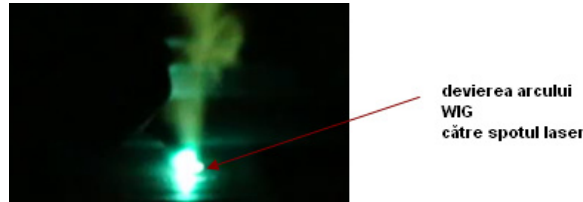


Fig. 4.39. Fenomenul de deviere a arcului WIG către spotul laser

Deoarece, pe lângă dependența de puterea fasciculului / energia pulsului laser și respectiv curentul de sudare, intensitatea cuplării hibride fascicul laser – arc electric depinde de configurația geometrică a sistemului hibrid (distanță hibridă și respectiv unghi fascicul laser – cap de sudare WIG) este de așteptat ca aceste fenomene tranzitorii să aibă o influență asupra stabilității procesului hibrid și respectiv asupra caracteristicilor geometrice și metalurgice ale sudurii, chiar și pentru situația în care cuplajul este hibrid, comparativ cu varianta în care se utilizează procedeul WIG cc la un curent de aceeași valoare cu curentul mediu al procesului WIG pulsant. Acest lucru a fost pus în evidență atât prin studierea înregistrărilor video ce au permis vizualizarea unor situații în care cuplajul hibrid este aproape insesizabil (fig. 4.41.a.) sau nu mai are loc (fig. 4.41.c.) (distanță relativ mare între arc electric și spotul / plasma generată laser), fig. 4.41., dar și de variațiile de temperatură în zona monitorizată cu camera termografică, fig. 4.41.-1.

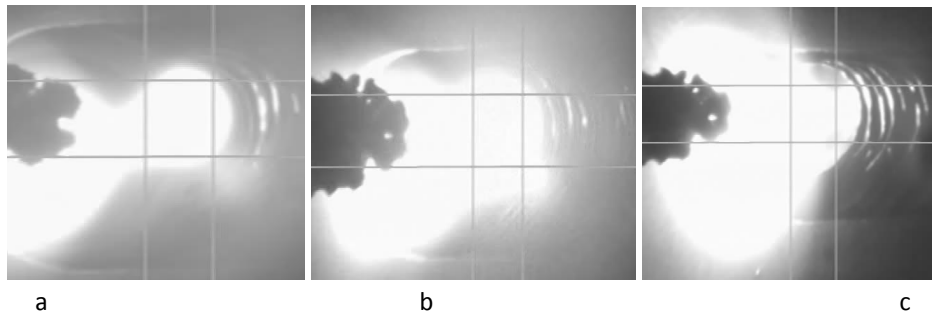


Fig. 4.40. Fenomenele tranzitorii de cuplare fascicul laser – arc WIG pulsant
a – pe durata curentului de bază; b – pe durata curentului de vârf; c – la tranziția curent de vârf – curent de bază

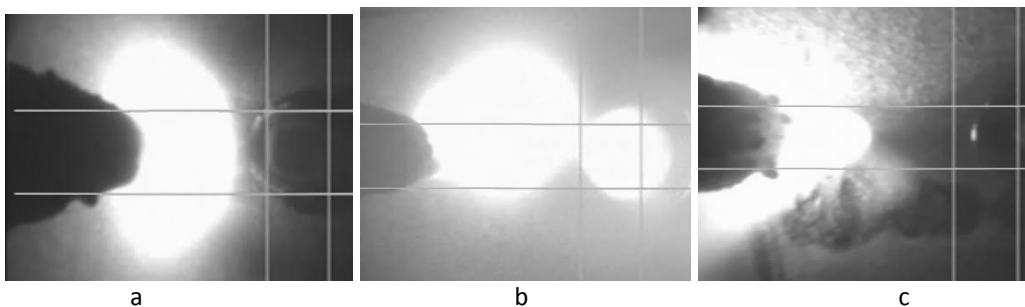


Fig. 4.41. Situații tranzitorii de cuplare fascicul laser – arc WIG
a, b – cuplare hibridă scăzută și apariția suflajului magnetic; c – lipsa cuplării hibride

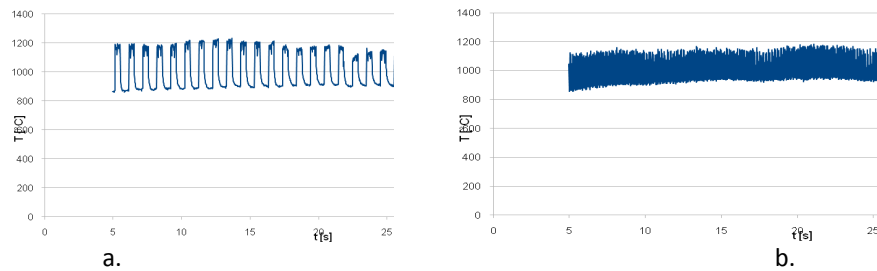


Fig. 4.41.-1. Variația temperaturii în zona monitorizată
 a. 1Hz, 40%WIGrat; $I_{av}=28A$; diferența maximă: 373°C, b. 15Hz, 40%WIGrat; $I_{av}=28A$;
 diferența maximă: 330°C

Rezultatul acestor fenomene tranzitorii asupra stabilității procesului au putut fi evidențiate atât de prezența unor stropiri în timpul experimentărilor de sudare, dar și de aspectul vizual al suprafeței cusăturilor realizate (fig. 4.42.) precum și de aspectul macroscopic transversal (fig. 4.43.) și respectiv longitudinal (fig. 4.44.), unde au putut fi observați pori de dimensiuni relativ mari, dar și variații ale pătrunderii sudurii.

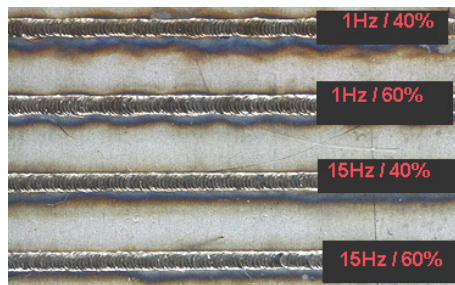


Fig. 4.42. Aspectul vizual al suprafeței sudurilor
 $I_{av}=20A$ (ratWIG: 40% la 60%; frecvența WIG: 1-15Hz)

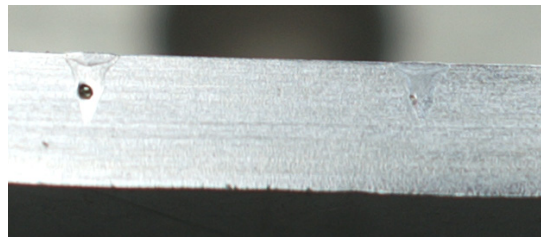


Fig. 4.43. Pori vizibili în secțiunea transversală



Fig. 4.44. Secțiune longitudinală – variații de pătrundere

Un alt efect al scăderii tranzitorii a cuplării hibride și implicit al efectului de stabilizare a arcului electric a fost pus în evidență de aspectul macroscopic al unor secțiuni transversale ale sudurilor realizate la care s-a observat o topire asimetrică (fig. 4.45.) la frecvență medie (15Hz) a curentului WIG deși la frecvență redusă (1Hz) sudura a fost simetrică (fig. 4.46.).

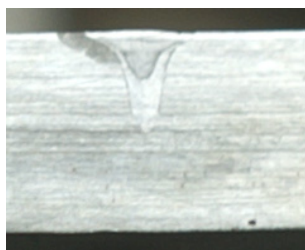


Fig. 4.45. Sudură asimetrică (WIG: 20A, 15Hz, 60%)



Fig. 4.46. Sudură simetrică (WIG: 20A, 1Hz, 60%)

La creșterea curentului mediu de sudare ($I_{av}=20A$), variația curentului electric de sudare în combinație cu repetiția pulsurilor laser duc la o creștere a agitației băii de sudare, având ca efect diferențierea mai clară a zonelor băii solidificate WIG și respectiv laser (fig. 4.47.). Utilizarea unei frecvențe mari pentru curentul WIG (150Hz), la aceeași configurație geometrică a sistemului de sudare hibridă și la aceeași parametri de sudare nu a avut ca efect creșterea pătrunderii, ci doar a dus la o zonă influențată termic mai pronunțată (fig. 4.47.b.) ceea ce permite stabilirea zonei de interes a frecvenței pulsurilor WIG în domeniul de valori apropiate de frecvența de repetiție a pulsurilor, pentru dezvoltarea a procedeeului.

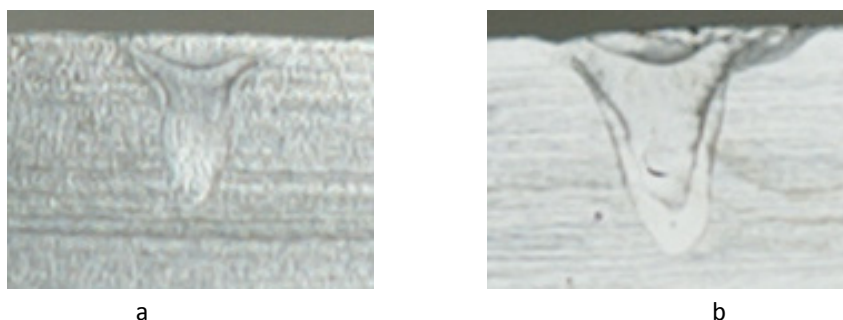


Fig. 4.47. Aspect macroscopic transversal
WIG: a - $I_{av}=20A$, 15Hz; b - $I_{av}=20A$, 150Hz

Comparativ, pentru varianta laser pulsat – WIG cc, forma sudurii obținute este similară cu cele prezentate în literatura de specialitate, iar varianta recomandată pentru utilizare este cea WIG-laser deoarece pătrunderea sudurii este sensibil mai mare (fig. 4.48., fig. 4.49.).

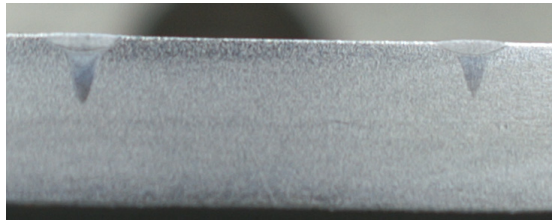


Fig. 4.48. Forma trecerilor cu varianta laser-WIG cc



Fig. 4.49. Forma trecerilor cu varianta WIG cc-laser

Pe baza celor prezentate se poate concluziona că la cuplarea celor două procese pulsate, apariția fenomenelor tranzitorii fac procedeul mai dificil de controlat, dar că efectul de cuplare poate fi utilizat pentru controlul pătrunderii efective specifice procesului de sudare laser pulsat și respectiv pentru controlul agitației băii de sudare. Zona recomandată a frecvențelor pulsurilor WIG este domeniul de frecvențe apropiat de valorile frecvențelor de repetiție a pulsurilor laser, domeniu în care a fost observată o creștere a pătrunderii, dar și o stabilizare mai pronunțată a arderii arcului WIG. Pe de altă parte, aceste fenomene tranzitorii permit utilizarea unor regimuri de sudare care fac posibil controlul pătrunderii efective (vezi fig. 2.44.), precum și obținerea unei agitații a băii de sudare comune având ca efect creșterea pătrunderii efective a sudurii.

De asemenea prin cuplarea frecvențelor de repetiție a pulsurilor celor două procese este posibilă obținerea unui nou efect sinergic – atenuarea variației pătrunderii sudurii. Problema de rezolvat, din punct de vedere tehnologic, ține de sincronizarea pulsurilor celor două procese care în principiu poate fi realizată printr-o conexiune între cele două echipamente: generatorul WIG master comandă, după amorsarea arcului electric, pornirea pulsurilor laser deși pornirea procesului laser înaintea amorsării arcului WIG ar avea ca efect o amorsare mai rapidă și stabilizarea arcului WIG, fenomene observate în cadrul programului experimental derulat.

4.4. Modele pentru fundamentarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat

După caracterizarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat, prin studiul dinamicii, pentru studiul influenței parametrilor de proces asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii și modelarea fenomenologică a procesului au fost derulați următorii pași:

- pe baza observațiilor calitative au fost selectate trecerile de interes pentru decelare de probe și analiza acestora
- din trecerile selectate au fost decelate probe pentru a fi efectuate secțiuni transversale și respectiv longitudinale
- probele au fost supuse analizelor macroscopice pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale sudurilor realizate.
- datele obținute au fost interpolate pentru determinarea unor modele de variație experimentale care să fundamenteze procedeul de sudare hibrid LmWP

4.4.1. Selectare treceri sudate. Mod de prelevare epruvete

Pe baza observațiilor anterioare au fost selectate pentru prelevare următoarele treceri:

- varianta WIG-laser pulsant: unghi 45°, distanța hibridă 1.4 și respectiv 3mm, rata curentului WIG 60% pentru 3 valori ale curentului mediu de sudare – experimentări care au relevat stabilitate și nu au prezentat variații ale dimensiunii băii de sudare
- varianta laser-WIG pulsant: toate trecerile efectuate
- WIG-laser și respectiv laser-WIG pulsant cu variația vitezei de sudare și frecvențe ale curentului WIG 15 și respectiv 30Hz

Secțiunile longitudinale (fig. 4.50) au fost utilizate pentru stabilirea influenței parametrilor de proces studiați asupra pătrunderii efective (determinată în principal de zona de suprapunere a pulsurilor laser, iar secțiunile transversale pentru determinarea influenței parametrilor de proces asupra geometriei sudurii realizate.

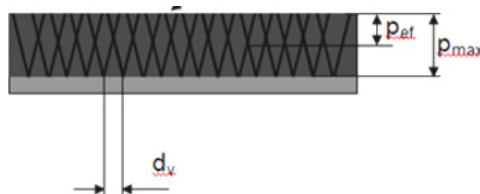


Fig. 4.50. Secțiunea longitudinală și măsurile măsurate

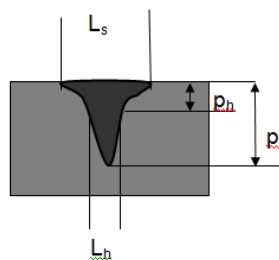


Fig. 4.51. Elementele caracteristice geometriei sudurii realizate cu procedeul hibrid laser-WIG-laser pulsant (secțiune transversală)

Geometria secțiunii transversale a sudurii a fost împărțită în patru elemente specifice (similar cu [88]): lățimea la suprafață (L_s), pătrunderea - p , lățimea

specifică procedului WIG (L_h) – lățimea în zona de gătuire și respectiv adâncimea specifică procesului WIG (p_h), elemente ce au putut fi identificate în probele studiate.

4.4.2. Influența parametrilor de proces asupra geometriei sudurii pentru varianta laser-WIG pulsat

Pentru trecerile laser-WIG pulsat parametrii studiați sunt prezentați în tabelul 4.5, iar influența acestora asupra caracteristicilor geometrice ale sudurilor realizate în fig. 4.52. – 4.55.

Tabelul 4.5 - Parametrii specifici probelor laser-WIG pulsat

WIG			Geometrici	
<i>I</i> mediu	<i>F</i> recvWIG	<i>r</i> atWIG	<i>a</i> hibrid	<i>u</i> nghi
[A]	[Hz]	[%]	[mm]	[°]
20	1	60	3	39
20	15	60	3	39
20	150	60	3	39
20	1	60	3	45
20	15	60	3	45
20	150	60	3	45
20	1	60	3	60
20	15	60	3	60
20	150	60	3	60

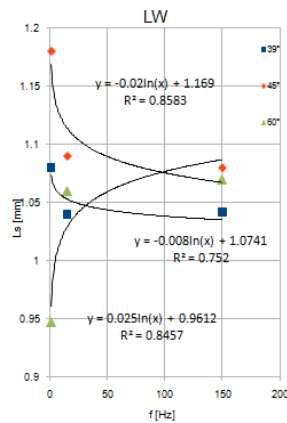


Fig. 4.52. Variația lățimii la suprafață a sudurii funcție de frecvența pulsurilor WIG (f) și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG

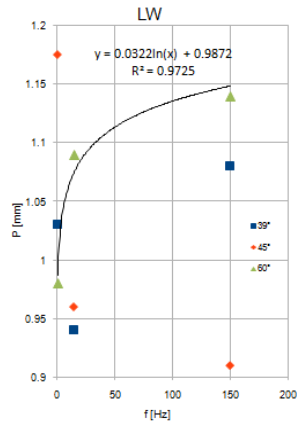


Fig. 4.53. Variația pătrunderii funcție de frecvența pulsurilor WIG și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG

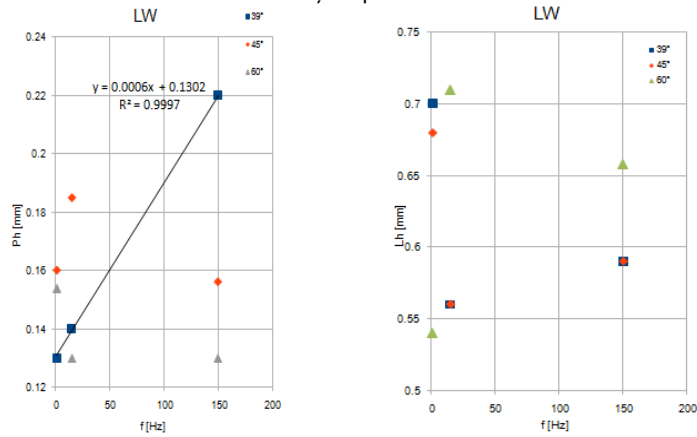


Fig. 4.54. Variația parametrilor Ph și respectiv Lh funcție de frecvența pulsurilor WIG și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG

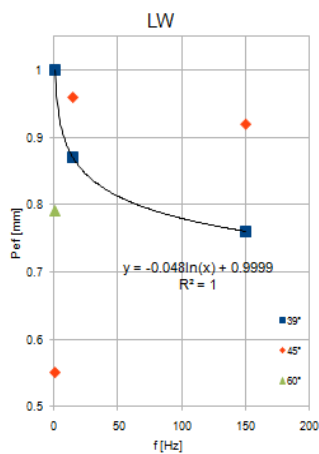


Fig. 4.55. Variația pătrunderii efective funcție de frecvența pulsurilor WIG și unghiul dintre fasciculul laser și capul WIG

Din prelucrarea datelor experimentale au putut fi sintetizate următoarele:

- variația lățimii la suprafață cu frecvența pulsurilor WIG a putut fi interpolată cu o funcție logaritmică care își schimbă tendința în scădere la valoarea unghiului de 60°
- variația pătrunderii a putut fi interpolată cu o funcție logaritmică doar pentru valoarea unghiului de 45° (scăzătoare) și 60° (crescătoare), pentru unghi mic între fascicul laser și capul de sudare WIG poate fi observată o scădere la trecerea în domeniul frecvențelor medii
- pătrunderea specifică procesului WIG are o variație liniară la valori reduse a unghiului hibrid, își schimbă forma și sensul de variație cu creșterea la valori mari; se observă că la valori ridicate ale unghiului hibrid variația tinde către o limită inferioară
- pătrunderea efectivă prezintă valori mari la frecvențe WIG mici și valori reduse ale unghiului dintre cele două procese; datele pot fi interpolate cu o funcție logaritmică cu schimbarea sensului de variație odată cu creșterea unghiului hibrid

4.4.3. Influența vitezei de sudare asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii

Pentru studierea influenței vitezei de sudare asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii au fost măsurăți aceiași parametri geometrici pentru trecerile WIG-laser pulsat și respectiv laser-WIG pulsat la valori de 15 și respectiv 30Hz ale frecvenței curentului WIG. Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în fig. 4.56. – 4.60.

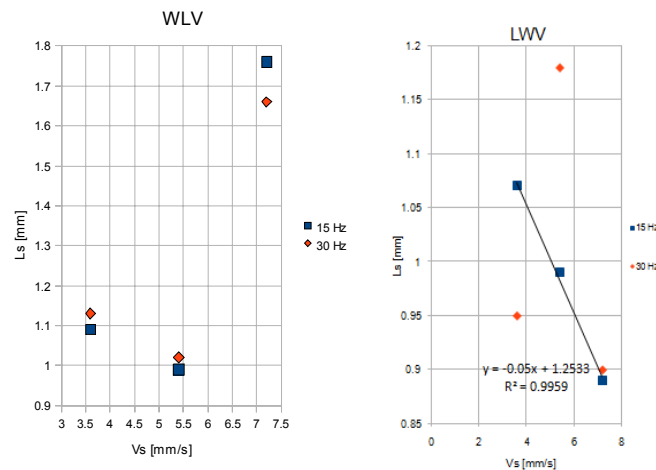


Fig. 4.56. Variația lățimii la suprafață funcție de viteza de sudare

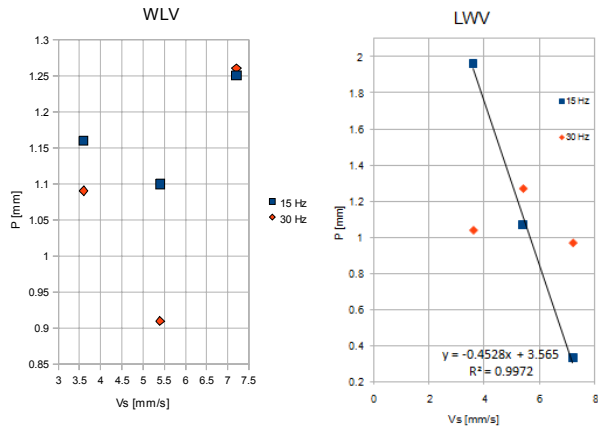


Fig. 4.57. Variația pătrunderii cu viteza de sudare

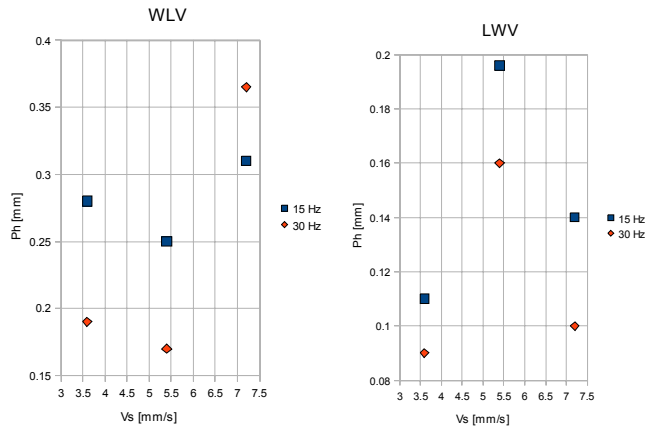


Fig. 4.58. Variația pătrunderii specifice WIG cu viteza de sudare

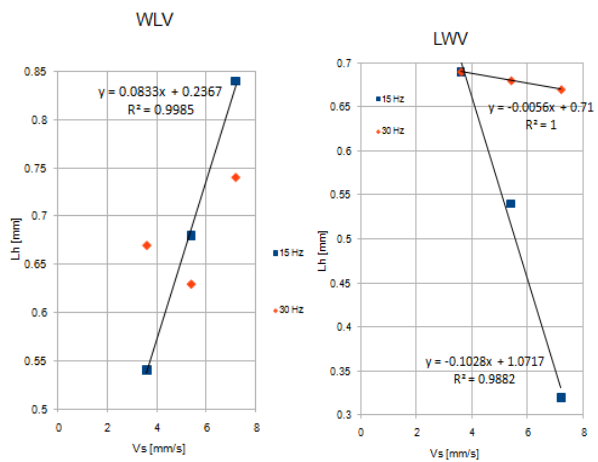


Fig. 4.59. Variația parametrului Lh funcție de viteza de sudare

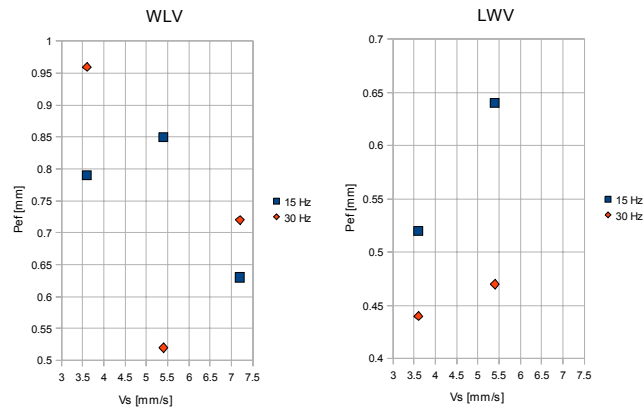


Fig. 4.60. Variația pătrunderii efective funcție de viteza de sudare

Din graficele trasate se pot observa următoarele:

- L_s prezintă variație liniară față de viteza de sudare la frecvența de 30Hz a pulsurilor WIG în cazul variantei laser-WIG pulsat
- pătrunderea prezintă o variație liniară față de viteza de sudare la frecvența de 15Hz pentru varianta laser-WIG pulsat
- deși măsurătorile efectuate pe probele transversale au arătat o valoare mai mare a pătrunderii pentru varianta laser-WIG, această discrepanță este explicabilă datorită zonei de prelevare și prelucrarea probelor; acest lucru este susținut de măsurătorile pătrunderii efective efectuate pe secțiunea longitudinală care relevă faptul că pătrunderea are valori mai mari pentru varianta WIG-laser pulsat
- L_h , prezintă o variație liniară descrescătoare cu viteza de sudare la ambele frecvențe ale pulsurilor WIG pentru varianta laser-WIG pulsat și respectiv crescătoare la 15Hz pentru varianta WIG-laser
- schimbările sens a variației la valoarea de mijloc a vitezei este explicabilă prin creșterea instabilității procesului de sudare laser pulsat (fenomene tranzitorii) datorită reducerii gradului de acoperire a pulsurilor laser
- pătrunderea efectivă are valori maxime pentru varianta WIG-laser și viteză redusă, în același timp lățimea la suprafață având valori reduse
- variația liniară a parametrului L_h pentru varianta L-W este consistentă cu observațiile asupra dinamicii procesului și tine de o scădere mai lentă a cuplării hibride odată cu creșterea vitezei de sudare

4.4.4. Influența parametrilor de proces asupra geometriei sudurii pentru varianta WIG-laser pulsat

Deoarece varianta WIG-laser pulsat prezintă avantajul obținerii unor pătrunderi cu valori mai mari, dar și o influență mai ridicată a situațiilor tranzitorii, analizele au vizat și studierea influenței curentului mediu de sudare (15, 20 și

respectiv 28A) asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii, dar și a distanței dintre cele două procese (1.4 și respectiv 3mm) pentru valori ale unghiului dintre cele două procese de 45°.

Variația parametrilor studiați sunt prezentate în fig. 4.61. – 4.65.

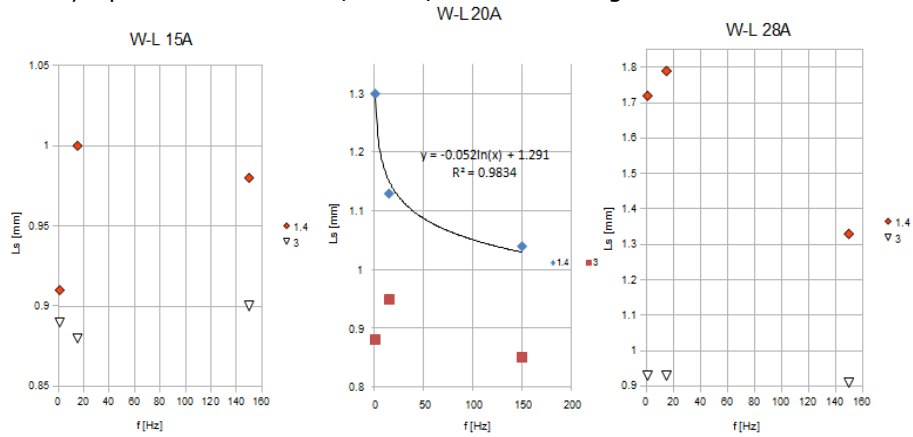


Fig. 4.61. Variația L_s cu frecvența pulsurilor WIG

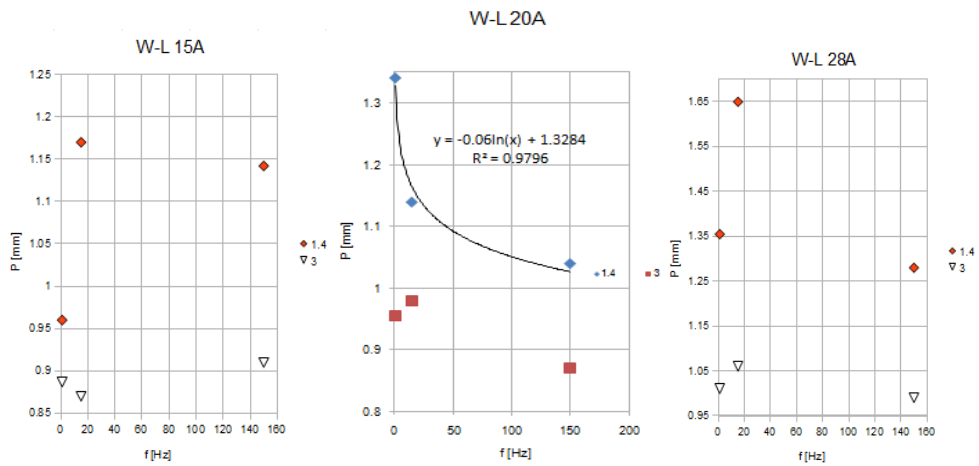


Fig. 4.62. Variația p cu frecvența pulsurilor WIG

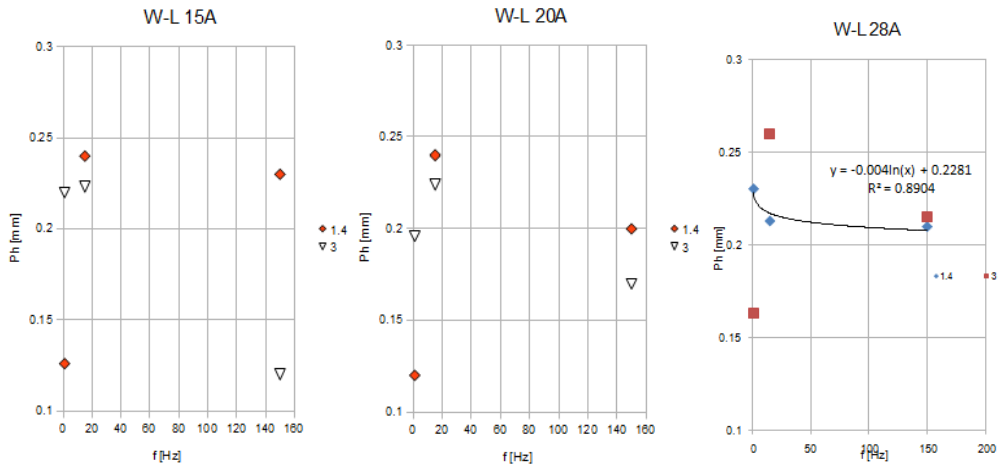


Fig. 4.63. Variația p_h cu frecvența pulsurilor WIG

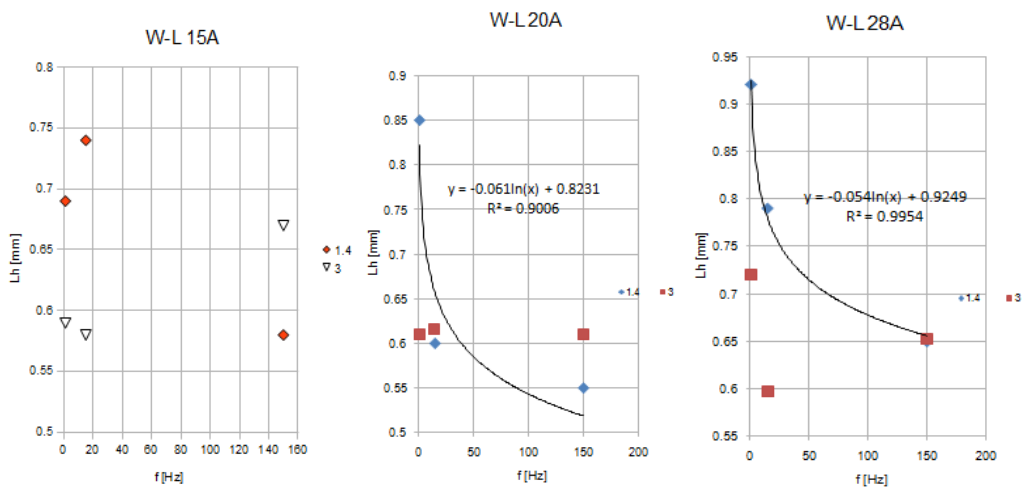


Fig. 4.64. Variația L_h cu frecvența pulsurilor WIG

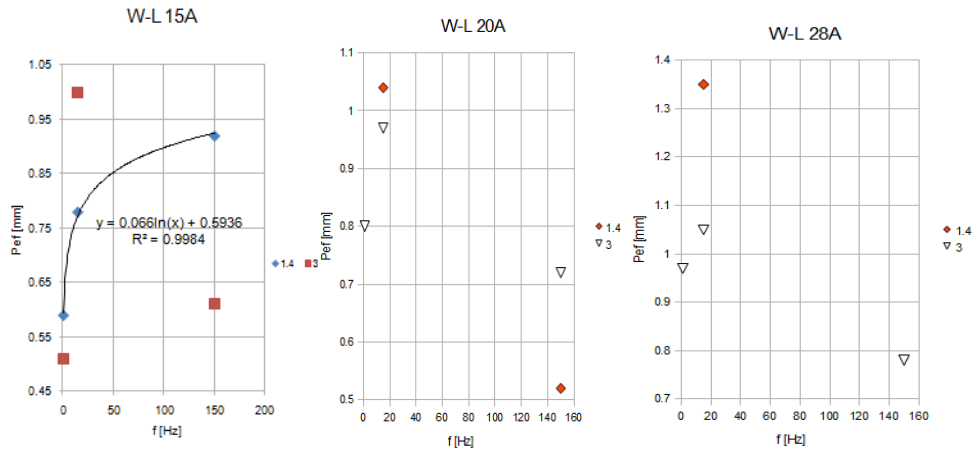


Fig. 4.65. Variația pătrunderii efective cu frecvența pulsurilor WIG

Din variația parametrilor studiați pentru varianta WIG-laser pulsant se pot observa următoarele:

- pătrunderea efectivă are valori maxime în zona domeniului de frecvențe medii WIG (frecvențe cu valori apropiate de frecvența de repetiție a pulsurilor laser) odată cu creșterea curentului de sudare mediu la ambele valori ale distanței dintre procese cu excepția situației distanță redusă între procese – curent de valoare relativ mică unde tendința este crescătoare cu creșterea frecvenței pulsurilor WIG
- pentru 3mm distanță între procese, odată cu creșterea curentului mediu de sudare la 28A variația lățimii la suprafață a sudării cu frecvența devine liniară
- pătrunderea specifică procesului WIG are un maxim în domeniul de frecvențe medii a curentului de sudare pentru toate valorile de curent mediu la ambele valori ale distanței dintre procese cu excepția valorii de 28A a curentului mediu la distanță redusă între procese unde se observă o variație către o valoare limită inferioară
- variația L_s cu frecvența de pulsurilor WIG poate fi interpolată cu o funcție logaritmică la 20A curent mediu și distanța dintre procese de 1.4mm și devine exponențială cu o valoare limită la 28A în combinație cu o distanță de 3mm între procese
- parametrul P_h tinde logaritmic către o valoare limită cu variația frecvenței pentru o valoare de 1.4mm a distanței între procese
- L_h variază logaritmic cu frecvența de repetiție a pulsurilor WIG la valorile de 20 și 28A ale curentului mediu de sudare și 1.4mm distanță între procese
- datele disponibile din probele longitudinale au permis de asemenea interpolarea cu o funcție logaritmică a pătrunderii efective funcție de frecvența de repetiție a pulsurilor WIG pentru distanță și curent mediu de valori reduse (1.4mm și respectiv 15A)

Din prelucrarea datelor experimentale obținute în urma analizelor și măsurătorilor efectuate pe probe transversale și longitudinale pentru modelarea procesului pot fi trase următoarele concluzii principale:

- pătrunderea efectivă are valori mai mari pentru varianta WIG-laser în domeniul de frecvențe medii – prin cuplarea celor două procedee de sudare pulsate
- principalele elemente de caracterizare ale geometriei sudurii au putut fi modelate cu funcții matematice, dar nu pentru toate combinațiile de parametri de proces selectați, fie datorită interacțiunilor puternice dintre parametri de proces corelate cu instabilități ale procesului de sudare hibrid, fie datorită dificultăților de prelucrare a probelor prelevate
- chiar dacă pătrunderea sudurii a fost mai mare pentru varianta WIG cc – laser pulsat (la curent de sudare cu valoare apropiată și cu putere medie laser mai mare), forma secțiunii transversale a sudurii impune necesitatea utilizarea unor viteze de sudare reduse pentru a crește valoarea pătrunderii efective, prin creșterea gradului de acoperire a spoturilor laser; acest lucru însă implică creșterea instabilității procesului de sudare hibrid și reducerea productivității pentru situația în care pătrunderea efectivă este importantă pentru îmbinarea sudată
- modelele de variație obținute prin interpolarea măsurărilor efectuate vor permite estimarea parametrilor geometrici respectivi ai sudurii la valori specifice ale parametrilor de proces
- deoarece variația unor parametrii geometrici ai sudurii nu a putut fi modelată pentru regiunea de interes a frecvenței pulsurilor WIG, programul experimental a cuprins un set suplimentar de experimentări și analize pentru verificarea ipotezelor legate de instabilitatea procesului

4.4.5. Modelarea fenomenologică a procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat

Din punct de vedere fenomenologic noul proces de sudare hibrid constă în suprapunerea a două surse de energie pulsate ce interacționează și se influențează reciproc, principalele fenomene ce diferă de variantele nepulsate ale procedurii hibrid laser – arc fiind prezentate în subcapitolul 4.3.

Pe lângă fenomenele sinergice cunoscute la cuplarea hibridă a procedurii de sudare cu fascicul laser și cu arc electric, această nouă variantă prezintă câteva particularități legate de fenomenele tranzitorii prezentate în subcapitolul 4.3:

- dacă la utilizarea unui fascicul laser în regim continuu și respectiv a unui arc electric nepulsat, în funcție de parametri celor două surse energetice și de configurația geometrică, poate fi determinată, experimental, o distanță între procese la care cele două procese sunt cuplate hibrid, în cazul acestei noi variante distanța hibridă este influențată de modul de variație a celor două surse de energie în timp și spațiu, fiind puternic influențată de modul de variație al curentului de sudare
- interacțiunea dintre cele două procese de sudare este influențată de asemenea de modul de suprapunere a celor două variații temporale, funcție de frecvența de repetiție a pulsurilor laser și respectiv a pulsurilor WIG: pulsurile pot fi în fază sau decalate în timp, ceea ce modifică dinamica băii de sudare

- în cazul variantei WIG-laser pulsant, fasciculul laser interacționează cu o baie de metal topit agitată având ca efect o pătrundere mai mare a sudurii, însoțită de o lățire în zona inferioară și deci creșterea pătrunderii efective, în domeniul de frecvențe medii a procesului WIG (valori apropiate de frecvența de repetiție a pulsurilor laser)

Deoarece numărul mare de variabile de proces face ca modelarea experimentală să fie dificilă, un model ce utilizează experimentul de tip factorial este recomandat pentru a reduce volumul necesar de experimentări. Pe de altă parte, în lipsa unor alte date referitoare la această nouă variantă de proces, a fost necesară derularea programului experimental și determinarea unor modele de variație pentru parametri geometrici ai sudurii. Pe baza interpolărilor efectuate sunt prezentate în tabelele 4.6 - 4.11 modelele de variație obținute în urma analizelor și măsurătorilor efectuate.

Tabelul 4.6. - varianta laser-WIG pulsant

LW	I_{av} = 20A ratWIG = 60% a = 3mm v_s = 3,6 mm/s		P_p = 1400W d_p = 3ms F_L = 15Hz	
	y=L _s	x=f= 1...150 Hz θ = 39°	y=-0,008ln(x)+1.0741	R ² =
	x=f= 1...150 Hz θ = 45°	y=-0,02ln(x)+1,169	R ² =	0.8583
	x=f= 1...150 Hz θ = 60°	y=0,025ln(x)+0.9612	R ² =	0.8457
y=P	x=f= 1...150 Hz θ = 39°	NM	-	
	x=f= 1...150 Hz θ = 45°	NM	-	
	x=f= 1...150 Hz θ = 60°	y=0,0322ln(x)+0.9872	R ² =	0.9725
y=P _h	x=f= 1...150 Hz θ = 39°	y=0,0006x+0.1302	R ² =	0.9997
	x=f= 1...150 Hz θ = 45°	NM	-	
	x=f= 1...150 Hz θ = 60°	NM	-	
y=P _{ef}	x=f= 1...150 Hz θ = 39°	y=-0,048ln(x)+0.9999	R ² =	1
	x=f= 1...150 Hz θ = 45°	NM	-	
	x=f= 1...150 Hz θ = 60°	NM	-	

Tabelul 4.7. – Influența vitezei pentru WIG-laser pulsat

WLV	I_{av} = 20A ratWIG = 60% a = 2.4mm θ = 45°	P_p = 1400W dp = 3ms fl = 15Hz	
y=Ls	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	NM	-
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-
y=P	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	NM	-
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-
y=Ph	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	NM	-
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-
y=Pef	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	NM	-
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-

Tabelul 4.8. – Influența vitezei pentru laser-WIG pulsat

LWV	I_{av} = 20A ratWIG = 60% a = 2.4mm θ = 45°	P_p = 1400W dp = 3ms fl = 15Hz	
y=Ls	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	y=-0.05x+1.2533	R ² = 0.9959
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-
y=P	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	y=-0.4528x+3.565	R ² = 0.9972
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-
y=Ph	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	NM	-
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-
y=Pef	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 15Hz	NM	-
	x=vs = 3,6...7,2 mm/s f = 30Hz	NM	-

Tabelul 4.9. - Influența frecvenței WIG la curent mediu 15A

WL	I_{av} = 15A RAT = 60% vs = 3.6mm/s θ = 45°	P_p = 1400W dp = 3ms fl = 15Hz	
y=Ls	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=P	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=Ph	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=Pef	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	$y=0,066\ln(x)+0.5936$	R ² = 0.9984
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-

Tabelul 4.10. - Influența frecvenței WIG la curent mediu 20A

WL	I_{av} = 20A ratWIG = 60% vs = 3.6mm/s θ = 45°	P_p = 1400W dp = 3ms fl = 15Hz	
y=Ls	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	$y=-0,052\ln(x)+1.291$	R ² = 0.9834
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=P	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	$y=-0,06\ln(x)+1.3284$	R ² = 0.9796
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=Ph	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=Pef	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-

Tabelul 4.11. - Influența frecvenței WIG la curent mediu 28A

WL	I_{av} = 28A RAT = 60% vs = 3.6mm/s Θ = 45°	P_p = 1400W dp = 3ms fl = 15Hz	
y=Ls	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=P	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=Ph	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	$y=-0,004\ln(x)+0.2281$	R ² = 0.8904
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-
y=Pef	x=f = 1 ... 150 Hz a= 1,4mm	NM	-
	x=f = 1 ... 150 Hz a= 3mm	NM	-

Legenda:

NM - nu s-a putut modela

a - distanța hibridă

Θ - unghiul hibrid (unghiul între axa laser și axa WIG)

f - frecvența WIG

F_L - frecvența de repetiție a pulsurilor laser

P_p - puterea în puls

dp - durata pulsului

vs - viteza de sudare

5.DEZVOLTĂRI ȘI OPTIMIZĂRI ALE PROCESULUI DE SUDARE HIBRID LASER- (micro)WIG PULSAT

5.1. Dezvoltări funcționale și optimizare sistem experimental

5.1.1. Limite de control ale procesului hibrid LASER-(micro)WIG pulsant. Soluție tehnică pentru optimizarea funcțională a sistemului experimental.

În urma analizei înregistrărilor video efectuate în cadrul programul experimental derulat inițial, urmat de caracterizarea și modelarea fenomenologică a noului proces de sudare hibrid, dar și prin efectuarea unui nou set de experimentări, cu diferite combinații a parametrilor de proces WIG, LASER și respectiv specifici geometriei hibride, au fost relevate câteva aspecte importante cu privire la limitele de control ale procesului hibrid LmWP:

- varianta pe care s-a focalizat cercetarea este varianta WIG-laser pulsant, datorită faptului că această variantă a prezentat, cel mai pregnant, fenomenul de reducere a variației pătrunderii, specifice sudării cu fascicul laser în regim pulsant
- fenomenele tranzitorii de cuplare hibridă a celor două procese, specifice noului proces de sudare hibrid, pot duce la situații în care procesul nu mai este hibrid (devine WIG ajutat de laser) pe toată durata sa, pentru unele combinații extreme ale parametrilor de proces
- existența cuplării hibride pe tot parcursul procesului de sudare depinde atât de valorile parametrilor de proces (curent de bază – determinat de valorile stabilite pentru curentul mediu și ratei curentului mediu, puterea laserului în puls, durata pulsului laser, distanța dintre cele două procese, defazajul dintre cele două procese și respectiv valorile frecvențelor pentru cele două procese, unghiul dintre cele două procese), dar și de instabilitățile produse de efectele termice ale procesului hibrid asupra materialului de bază corelate cu o eventuală asimetrie a circuitului magnetic
- domeniul de frecvențe ale curentului de sudare WIG de interes pentru cercetare este domeniul de frecvențe medii (și eventual mici pentru agitarea băii de sudare) – cu valori corelate cu frecvența de repetiție a pulsurilor laser, utilizarea unor frecvențe ale curentului de sudare în domeniul de frecvențe ridicate tinde să se comporte similar cu varianta laser pulsant – WIG cc
- experimentările efectuate au relevat apariția unor instabilități pe durata procesului de sudare cauzate și de deformarea materialului de bază, dar și de uzura electrodului de sudare sau de acumularea stropilor pe acesta

- utilizarea domeniului de frecvențe reduse pentru procesul WIG poate permite obținerea unei agitații crescute a băii de sudare, dar nu poate fi studiat, în mod eficient, decât în condițiile în care poate fi controlată sincronizarea și respectiv defazajul dintre cele două procese pulsatorii

Datorită acestor fenomene complexe și a efectelor acestora asupra stabilității procesului precum și datorită existenței unui echilibru relativ fragil al cuplării hibride pentru situațiile în care valorile curentului de sudare mediu sunt reduse în combinație cu o rată a curentului redusă – necesare îmbinării unor materiale cu grosimi mici, grosimi ce necesită utilizarea unor regimuri cu energie liniară redusă, în combinație cu faptul că sistemul experimental dezvoltat nu permite reglarea defazajului între cele două procese s-a hotărât elaborarea unei soluții tehnice care să optimizeze funcțional sistemul experimental, în sensul reducerii erorilor de reglare a distanței hibride și respectiv a unghiului dintre cele două procese – parametri geometrici ce influențează relativ puternic stabilitatea procesului de sudare hibrid.

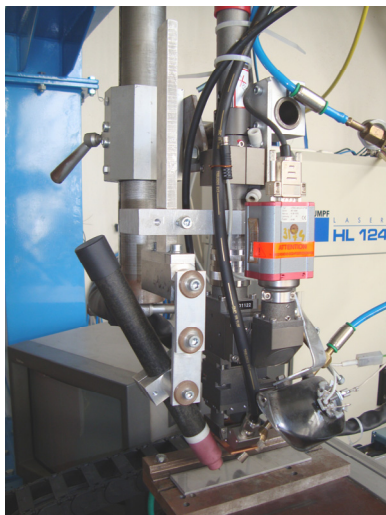


Fig. 5.1. Soluție constructivă de ajustare pentru montajul experimental

În fig. 5.1. se prezintă soluția constructivă concepută și realizată pentru sistemul experimental cap de sudare hibrid LASER – WIG optimizat.

Sistemul destinat reglării poziției capului WIG în raport cu capul de sudare laser, a fost astfel conceput și realizat încât să permită reglarea poziției capului WIG prin mișcări de translație și rotație, dar mai ales fixarea și strângerea cât mai rigidă a acestuia în zona de lucru prescrisă (dorită).

Principalele componente ale capului de sudare hibrid LASER – WIG optimizat, este prezentat în fig. 5.2.

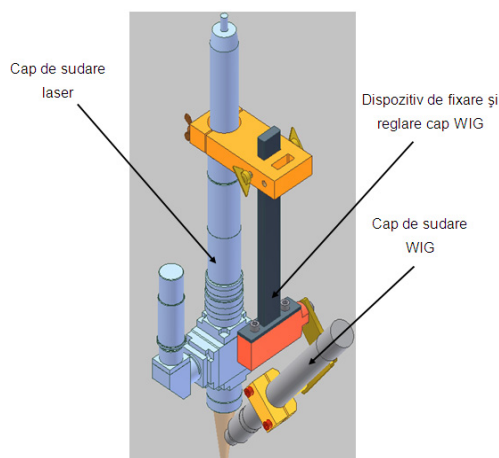


Fig. 5.2. Sistem experimental cap de sudare hibrid LASER -WIG optimizat

Dispozitivul de fixare și reglare cap WIG (fig. 5.3), este compus în principal din următoarele module / reperi:

- unitatea de translație 1 – asigură mișcarea liniară pe verticală (pe direcție paralelă cu axa capului de sudare laser) – fig. 5.3. Elementul în mișcare (ghidajul dreptunghiular, poziția 1) și totodată capul de sudare WIG, se deplasează în plan vertical prin culisa 4, realizată în brida de construcție specială fixată pe capul de sudare laser. Brida de construcție specială (culisa 4) este prevăzută cu două ghidaje dreptunghiulare pentru stabilirea cât mai precisă a distanței hibride (distanța dintre capul de sudare WIG și spotul laser). Fixarea ghidajului în poziția dorită se realizează cu elemente de strângere standardizate.

Cursa pe verticală este $c_1 = \max. 200 \text{ mm}$.

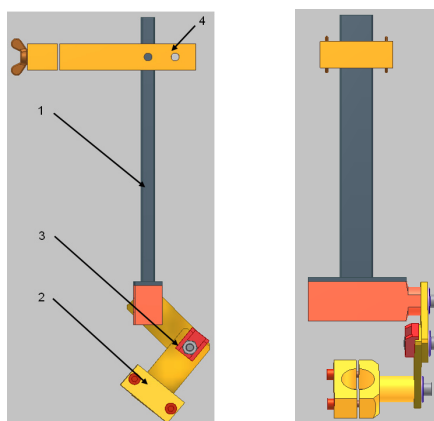


Fig. 5.3. Dispozitiv de fixare și reglare cap de sudare WIG

Soluția constructivă permite pe lângă reglajul liniar pe orizontală a axei capului de sudare WIG în raport cu axa capului de sudare laser și o mișcare de

rotație, prin intermediul căreia se poate stabili cât mai exact unghiul α dintre acestea.

- sistem mecanic dublu articulată (fig. 5.3., poziția 3) asigură reglaje grosiere combinate, liniare și unghiulare ale poziției senzorului într-un plan vertical care conține axa de simetrie a acestuia.

Spre deosebire de varianta utilizată anterior, sistemul experimental cap de sudare hibrid LASER – WIG optimizat permite în plus:

- autonomie mai mare de reglare a poziției capului WIG în raport cu capul de sudare laser, pe direcția axei de simetrie a acestuia;
- un reglaj mai fin, cu precizie îmbunătățită, în plan vertical, pe o direcție paralelă cu axa capului de sudare laser;
- un reglaj mai precis al unghiului dintre capul de sudare WIG și capul de sudare laser.

După efectuarea ajustărilor constructive, au fost verificate îmbunătățirile funcționale ale sistemului experimental, în ceea ce privește controlul reglajelor pentru valorile unghiului hibrid și a distanței hibride, prin efectuarea unui set de experimentări care au relevat îmbunătățirile funcționale aduse de această soluție tehnică.

5.2. Program experimental pentru stabilirea direcțiilor de optimizare a procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat

Programul experimental derulat inițial ce a utilizat o strategie de tipul *Gauss – Seidel* a permis caracterizarea noului proces de sudare hibrid precum și stabilirea unor relații care să descrie cantitativ influența parametrilor de proces asupra caracteristicilor geometrice ale îmbinării sudate, dar a fost focalizat asupra parametrilor de proces specifici procesului de sudare WIG pulsă și a configurației geometrice hibride, parametrii de proces laser fiind păstrați constanți.

Rezultatele, obținute în urma analizelor efectuate, au permis selectarea variantei ce răspunde la *obiectivul principal* al dezvoltării noului proces hibrid – atenuarea variației de pătrundere – varianta ce are procesul WIG pulsă ca proces conducător, precum și domeniul de frecvențe ale curentului WIG de interes – domeniul de frecvențe medii, în zona frecvenței de repetiție a pulsărilor laser.

Pe de altă parte, este de așteptat ca și parametrii de proces laser să influențeze procesul hibrid, dar și cuplările tranzitorii, cu impact atât asupra stabilității procesului cât și asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii. De aceea a fost conceput un nou program experimental care să completeze cercetările efectuate, pentru a detalia imaginea de ansamblu a noului proces de sudare hibrid și pentru a stabili direcțiile principale de optimizare a acestuia.

Montajul experimental utilizat pentru dezvoltarea și optimizarea noului proces de sudare hibrid LmWP este prezentat în fig. 5.4.

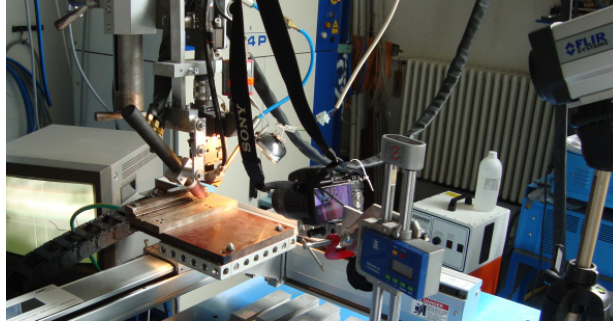


Fig. 5.4. Montajul experimental

5.2.1. Conceperea program experimental

Datorită numărului mare de parametri de proces, strategia experimentală utilizată pentru determinarea direcțiilor de optimizare s-a bazat pe programarea experimentală cu utilizarea experimentului de tip factorial – o strategie tip Box – Wilson.

Parametrii procesului de sudare hibrid pot fi grupați astfel:

- parametri WIG:
 - curent de sudare mediu (I_{med})
 - frecvența curentului de sudare WIG (F_{wig})
 - rata curentului WIG ($ratWIG$)
 - curentul de bază și respectiv curentul de puls – determinați de combinația I_{med} – rata
 - unghiul de înclinare al arzătorului – determinat de unghiul FL – WIG
 - debit gaz de protecție
- distanța electrod – MB
- parametri LASER:
 - putere în puls (P_p)
 - durata pulsului (dp)
 - frecvența de repetiție a pulsurilor laser (F_{pL})
 - *puterea medie – determinată de combinația P_p – dp – F_{pL}*
 - *energia pulsului laser (determinată de combinația P_p – dp)*
 - *debit gaz de protecție laser*
 - *diametrul petei focale*
 - *poziția focarului față de suprafața MB*
- parametri geometrici ai procesului hibrid
 - unghiul FL –WIG (α)
 - distanța hibridă (a) – distanța spot laser – arc WIG
- parametri generali:
 - viteza de sudare (v_s)
 - *defazajul dintre procese*

Pentru programul experimental bazat pe strategia de tip Box-Wilson, pentru dezvoltarea și optimizarea noului proces de sudare hibrid, au fost selectați un număr de 9 parametri (subliniați în lista ce grupează parametrii de proces LmWP) ca factori de influență (FI) pentru evaluarea efectelor acestora asupra funcțiilor obiectiv (FO)

și a stabilirii direcțiilor de optimizare a procesului. Selecția factorilor de influență a fost efectuată ținând cont de caracteristicile pe care aceștia trebuie să le îndeplinească - controlabili precis independent de restul parametrilor de proces.

Pentru asigurarea trasabilității experimentărilor, materialul de bază utilizat a fost același ca și în programul experimental anterior - tablă de oțel aliat inoxidabil austenitic, tip EN 1.4301 (DIN X5CrNi18-10), de 3mm grosime.

Chiar și în aceste condiții, numărul mare de factori de influență nu a permis efectuarea unui experiment factorial complet și de aceea s-a decis aplicarea unui experiment factorial parțial, prin utilizarea unei matrici de experimentare de tip Taguchi. O matrice de experimentare de acest tip permite reducerea numărului de încercări necesare (*de la 512 la 16*), având ca rezultat diagrama efectelor FI asupra FO și permite ierarhizarea factorilor de influență pentru determinarea direcțiilor de optimizare.

Matricea selectată [31] a fost de tipul $6 \times 2 + 3 \times 4$ - 6 factori de influență cu 2 nivele și 3 factori de influență cu 4 nivele este prezentată în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1. - Matrice program cuprinzând 6 factori de influență cu 2 nivele și 3 factori de influență cu 4 nivele

Nr. inc.	Factori de influență codificați								
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	1	2	3	3	3
4	1	1	1	2	2	1	4	4	4
5	1	2	2	1	1	1	2	3	4
6	1	2	2	1	2	2	1	4	3
7	1	2	2	2	1	2	4	1	2
8	1	2	2	2	2	1	3	2	1
9	2	1	2	1	1	1	3	4	2
10	2	1	2	1	2	2	4	3	1
11	2	1	2	2	1	2	1	2	4
12	2	1	2	2	2	1	2	1	3
13	2	2	1	1	1	1	4	2	3
14	2	2	1	1	2	2	3	1	4
15	2	2	1	2	1	2	2	4	1
16	2	2	1	2	2	1	1	3	2

Ordonarea factorilor de influență a fost efectuată de o așa manieră încât să fie reduse erorile de control a FI (x₁ - unghiul hibrid și respectiv x₂ - distanța hibridă) și să permită în același timp evaluarea unor parametri de proces și a combinațiilor acestora cele mai interesante. Corespondența FI codificați - FI reali este prezentată în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2. – corespondența FI codificați – parametri de proces

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
α [°]	a _{hibrid} [mm]	vs [mm/s]	Fwig [Hz]	dp [ms]	ratWIG [%]	I _{av} [A]	Pp[W]	FpL [Hz]
Nivele codificate FI								
	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2	2	2
	-	-	-	-	-	3	3	3
	-	-	-	-	-	4	4	4

5.2.2. Stabilire spațiu de experimentare. Experimentări pentru stabilirea direcțiilor de optimizare a procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat

După conceperea matricii de experimentare s-a trecut la stabilirea limitelor spațiului multi-factorial de experimentare, prin determinarea valorilor reale ale factorilor de influență. Pentru această, s-a ținut cont de rezultatele obținute anterior, au fost stabilite valori pentru factorii de influență și au fost testate experimental situații extreme: combinații cu valori reduse ale aportului energetic liniar (regimuri "slabe" – viteze de sudare mari) și respectiv cu valori ridicate ale aportului energetic liniar (regimuri "tari" – viteză de sudare redusă).

Testele efectuate au fost evaluate din punct de vedere a stabilității procesului de sudare, dar și prin inspecția vizuală a sudurilor realizate (de ex. ardere a suprafeței sau topire insuficientă), iar după mai multe iterații au putut fi stabilite nivelele extreme ale spațiului multi-factorial de experimentare, precum și valorile pașilor de variație. De asemenea, au fost studiate înregistrările video ale experimentelor de sudare pentru evaluarea intensității cuplării hibride dintre cele două procese, domeniul de interes fiind cel în care cele două procese sunt cuplate hibrid, rezultat prin stabilirea valorilor extreme ale distanței hibride și respectiv a curentului de sudare mediu.

Astfel, a putut fi determinată matricea cu valori reale de experimentare, prezentată în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3. – Matricea de experimentare de tip Taguchi

Nr. inc.	x1 α [°]	x2 a _{hibrid} [mm]	x3 vs [mm/s]	x4 Fwig [Hz]	x5 dp [ms]	x6 ratWIG [%]	x7 I _{av} [A]	x8 Pp[W]	x9 FpL [Hz]
1	38.5	1.4	2	15	2.6	36	15	1100	12
2	38.5	1.4	2	15	3.2	66	21	1200	15
3	38.5	1.4	2	21	2.6	66	27	1300	18
4	38.5	1.4	2	21	3.2	36	32	1400	21
5	38.5	2	3.6	15	2.6	36	21	1300	21
6	38.5	2	3.6	15	3.6	66	15	1400	18
7	38.5	2	3.6	21	2.6	66	32	1100	15

Nr. inc.	x1 α [°]	x2 a_{hibrid} [mm]	x3 vs [mm/s]	x4 Fwig [Hz]	x5 dp [ms]	x6 ratWIG [%]	x7 Iav [A]	x8 Pp[W]	x9 FpL [Hz]
8	38.5	2	3.6	21	3.2	36	27	1200	12
9	48.5	1.4	3.6	15	2.6	36	27	1400	15
10	48.5	1.4	3.6	15	3.2	66	32	1300	12
11	48.5	1.4	3.6	21	2.6	66	15	1200	21
12	48.5	1.4	3.6	21	3.2	36	21	1100	18
13	48.5	2	2	15	2.6	36	32	1200	18
14	48.5	2	2	15	3.2	66	27	1100	21
15	48.5	2	2	21	2.6	66	21	1400	12
16	48.5	2	2	21	3.2	36	15	1300	15

Din tabelul 5.3 se poate observa că au fost selectate combinații ale frecvențelor curentului WIG – frecvență de repetiție a pulsurilor laser care să compenseze faptul că sistemul experimental existent nu permite sincronizarea celor două procese și / sau controlul defazajului dintre acestea.

Parametri de proces păstrați constanți pe parcursul programului experimental, ce a utilizat matricea de tip Taguchi, au fost următorii:

- debit gaz de protecție laser (Ar99%): 12l/min
- debit gaz de protecție WIG (Ar99%): 12l/min
- presiune duză "cross-jet" laser: 2.5bar
- diametru petei focale laser: 0.6mm
- poziție pată focala laser: pe suprafața MB

Odată stabilită matricea de experimentare, s-a trecut la efectuarea încercărilor și la prelevarea de epruvete pentru analiza caracteristicilor geometrice ale sudurilor realizate. Pe parcursul derulării programului experimental au fost făcute observații cu privire la stabilitatea procesului de sudare, dar și prin monitorizarea tensiunii de sudare. Variația tensiunii de sudare și observațiile cu privire la stabilitatea procesului sunt sintetizate în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4. – Observațiile din timpul derulării programului experimental (matrice TAGUCHI)

Nr. inc.	WIG			Param laser calculați		Observații In timpul sudării + vizualizare înregistrări video + analize macroscopice probe transversale și longitudinale
	Iv [A]	Ib [A]	Us [V]	Ep [J]	Pm [W]	
1	31	6	9.0 - 11.3	2.86	34.32	mici stropiri
2	30	6	8.8 --- 10.7	3.84	57.6	fără stropiri
3	38	7	8.8 --- 10.3	3.38	60.84	stropiri intense, arcul WIG stabilizează laserul (baia), suprafață afumata, arderi reduse la suprafață
4	66	13	10 --- 11.8	4.48	94.08	stropiri intense, dar arc foarte stabil, explozii la impact FL – baie agitată; baie agitata intens.
5	43	9	9.8 - 10.5	3.38	70.98	laser intens – vaporizare material și stropi foarte intensi (laser + wig) - instabilitate parțială
6	22	4	9.5 -	5.04	90.72	stropiri reduse

Nr. inc.	WIG			Param laser calculați		Observații In timpul sudării + vizualizare înregistrări video + analize macroscopice probe transversale și longitudinale
	I_v [A]	I_b [A]	U_s [V]	E_p [J]	P_m [W]	
			12			
7	44	9	8.7 – 10.4	2.86	42.9	stropiri mai reduse comparativ cu T6
8	57	11	10.5 – 11.4	3.84	46.08	stropiri reduse; arcul WIG se deplasează către spatele băii la Ivârf; dezaliniere cu influențe asupra devierii arcului
9	57	11	10.8 – 12.4	3.64	54.6	stropiri intense, deplasare către spatele băii de sudare.
10	45	9	9.9 – 11.3	4.16	49.92	stropiri mai reduse comparativ cu T9, ușoară deviere arc
11	22	4	11.3 – 12.6	3.12	65.52	deviere arc datorata acumulării stropilor pe electrod exp. stabil în prima ½
12	43	9	10.4 – 11.7	3.52	63.36	stropiri reduse
13	66	13	10 – 11.3	3.12	56.16	stropiri minime
14	38	7	10.3 – 11.5	3.52	73.92	stropiri minime; stabilitate crescută
15	30	6	10.3 – 12.3	3.64	43.68	stropiri minime, arc foarte stabil, baie puțin agitată, instabilitate ușoară la mijlocul suduri
16	31	6	12.2 – 13.4	4.16	62.4	stropiri minime; întreruperi ale băii comune; dinamica redusa

Aspectul vizual al trecerilor realizate în cadrul programului experimental poate fi observat în fig. 5.5. – 5.9.

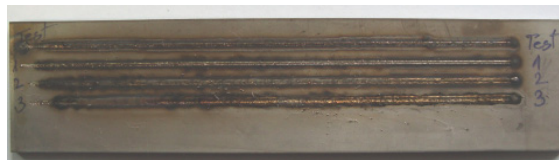


Fig. 5.5. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (1-3)

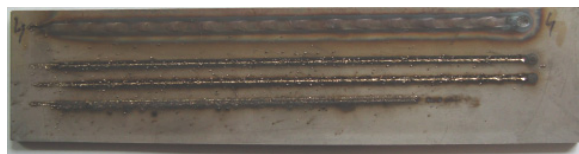


Fig. 5.6. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (4)



Fig. 5.7. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (5-8)



Fig. 5.8. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (9-12)



Fig. 5.9. Aspect vizual treceri exp. TAGUCHI (13-16)

Valorile funcțiilor obiectiv au fost determinate utilizând același mod de prelevare din programul experimental inițial, transversal și longitudinal precum și același mod de caracterizare geometrică a sudurilor realizate (fig. 4.50., 4.51.). Aspectul macroscopic al epruvetelor prelevate (secțiune transversală și respectiv longitudinală) pentru cele 16 încercări experimentale este prezentat în fig. 5.10. – 5.25.

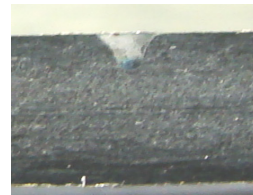
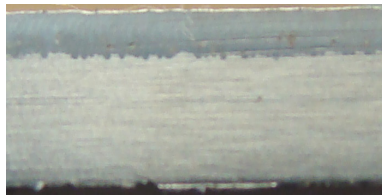


Fig. 5.10. T1



Fig. 5.11. T2

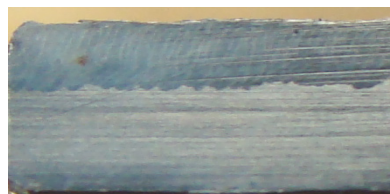


Fig. 5.12. T3

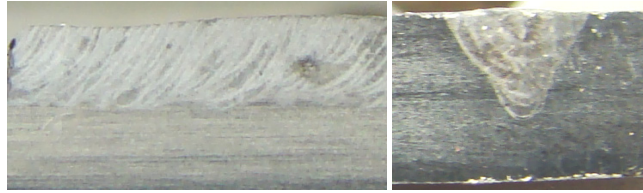


Fig. 5.13. T4

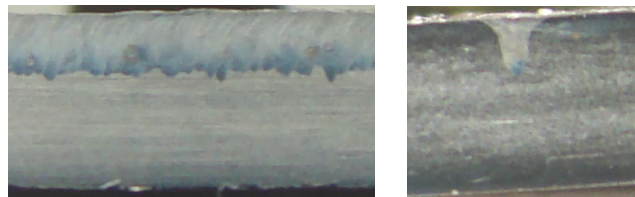


Fig. 5.14. T5

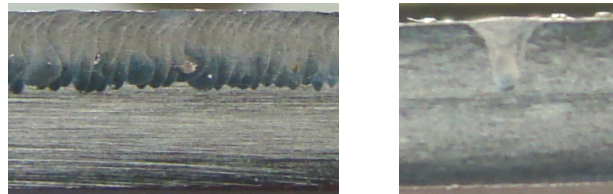


Fig. 5.15. T6



Fig. 5.16. T7



Fig. 5.17. T8



Fig. 5.18. T9



Fig. 5.19. T10



Fig. 5.20. T11

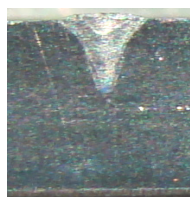


Fig. 5.21. T12

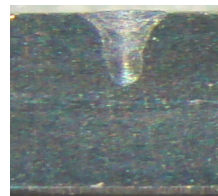


Fig. 5.22. T13

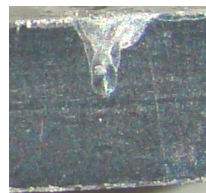


Fig. 5.23. T14

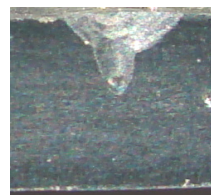


Fig. 5.24. T15





Fig. 5.25. T16

5.2.3. Evaluarea importanței factorilor de influență asupra funcțiilor obiectiv selectate

Prelucrarea datelor experimentale a fost efectuată cu un software specializat (Statistica) ce permite trasarea diagramei efectelor, valorile măsurate ale funcțiilor obiectiv fiind prezentate în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5. – Valorile măsurate ale FO

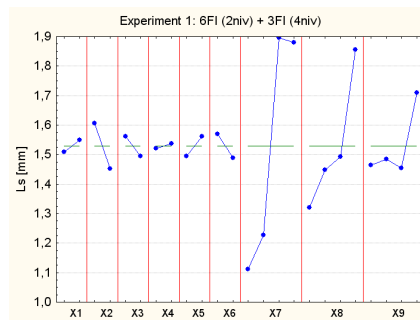
FO Nr. inc.	Probe transversale				Probe longitudinale			
	L_s	p	P_h	L_h	P_{max}	P_{ef}	dv	Obs:
1	0.93	0.76	0.26	0.57	0.81	0.7	0.16	fără pori
2	1.18	1.24	0.4	0.72	1.17	1.06	0.11	pori
3	1.81	1.49	0.56	1.13	1.16	1.02	0.14	fără pori
4	2.56	1.96	0.87	1.67	1.6	1.44	0.02(0)	pori relativ mari - sudură aprox. continuă
5	1.24	1.03	0.35	0.72	1.16	1.02	0.17	incluziuni
6	1.22	1.31	0.44	0.7	1.44	1.26	0.23	pori
7	1.43	1.11	0.57	0.78	1.16	0.91	0.26	pori
8	1.7	1.41	0.79	0.75	1.08	0.89	0.27	pori relativ mari
9	2.24	1.65	0.94	1.68	1.87	1.71	0.22	2 pori
10	1.83	1.56	0.67	1.16	1.49	1.34	0.16	2 pori
11	1.21	1.3	0.35	0.75	1.25	1.14	0.16	fără pori
12	1.09	1.24	0.37	0.86	1.46	1.19	0.23	fără pori
13	1.7	1.43	0.62	1.14	1.55	1.34	0.26	pori
14	1.83	1.4	0.44	1.25	1.53	1.4	0.3	pori
15	1.4	1.14	0.42	0.68	1.02	0.88	0.23	fără pori
16	1.09	1.17	0.31	0.69	1.28	1.11	0.15	pori

Pe lângă FO măsurate direct pe probele prelevate, a mai fost utilizată o funcție obiectiv calculată – *amplitudinea de variație a pătrunderii efective* determinată ca diferența dintre pătrunderea măsurată în secțiunea longitudinală și pătrunderea efectivă. De asemenea, a fost efectuată o evaluare a diferențelor dintre valorile măsurate pe secțiunile transversale și respectiv longitudinale pentru evaluarea dimensiunii erorilor sistematice cauzate de instabilitățile din timpul procesului de sudare, dar și de prelucrarea relativ dificilă a epruvetelor de dimensiuni reduse. Aceste date sunt prezentate în tabelul 5.6.

Tabelul 5.6. – Valorile amplitudinii de variație a Pef și evaluarea diferențelor valorilor măsurători longitudinale / transversale

	FO calculată Amplit. Pef	Evaluări măsurători trans. / longit.	Dif.	%
Nr. inc.	Pmax. - Pef. [mm]	$P_{med.} == (p + P_{max})/2$	Dif. măsurători "p" trans - longit. [mm]	diferențe % (Dif / Pmed)*100
1	0.11	0.785	-0.05	-6.369426752
2	0.11	1.205	0.07	5.809128631
3	0.14	1.325	0.33	24.90566038
4	0.16	1.78	0.36	20.2247191
5	0.14	1.095	-0.13	-11.87214612
6	0.18	1.375	-0.13	-9.454545455
7	0.25	1.135	-0.05	-4.405286344
8	0.19	1.245	0.33	26.5060241
9	0.16	1.76	-0.22	-12.5
10	0.15	1.525	0.07	4.590163934
11	0.11	1.275	0.05	3.921568627
12	0.27	1.35	-0.22	-16.2962963
13	0.21	1.49	-0.12	-8.053691275
14	0.13	1.465	-0.13	-8.873720137
15	0.14	1.08	0.12	11.11111111
16	0.17	1.225	-0.11	-8.979591837

Diagramele efectelor sunt prezentate în fig. 5.26. – 5.33., iar în fig. 5.34. – 5.40. sunt prezentate evoluțiile unor funcții obiectiv, dar și corelații între evoluția unor perechi de valori ale valorilor acestora.

Fig. 5.26. Diagrama efectelor asupra L_s

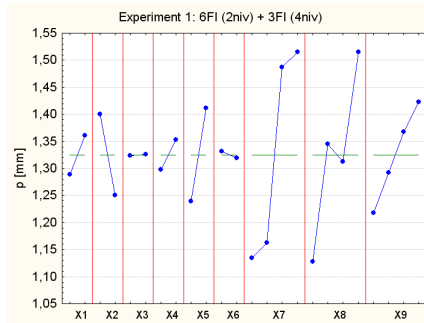


Fig. 5.27. Diagrama efectelor asupra p (transversal)

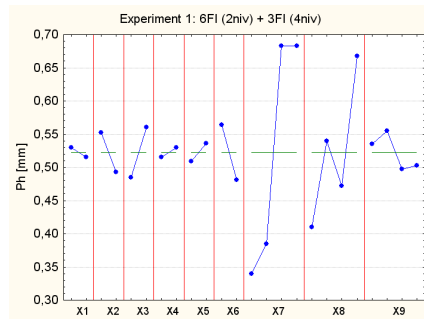


Fig. 5.28. Diagrama efectelor asupra Ph (transversal)

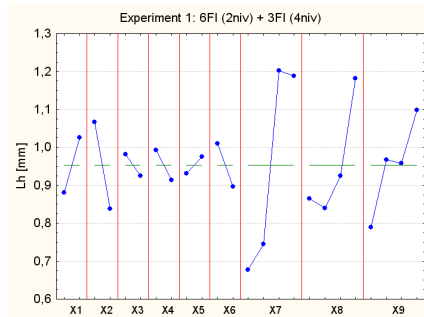


Fig. 5.29. Diagrama efectelor asupra Lh (transversal)

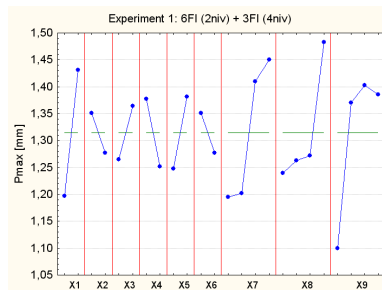


Fig. 5.30. Diagrama efectelor asupra Pmax (longitudinal)

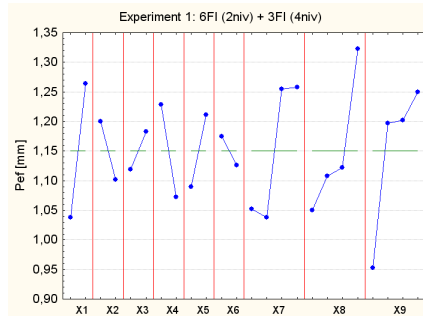


Fig. 5.31. Diagrama efectelor asupra Pef (longitudinal)

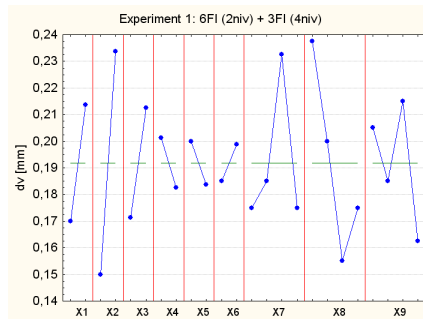


Fig. 5.32. Diagrama efectelor asupra dv (longitudinal)

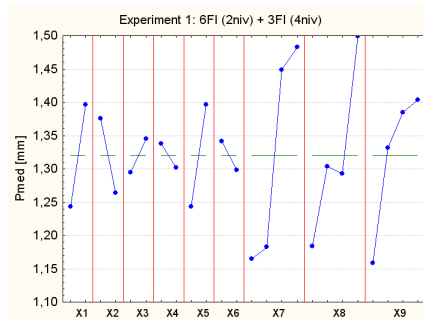


Fig. 5.33. Diagrama efectelor asupra Pmed (estimat)

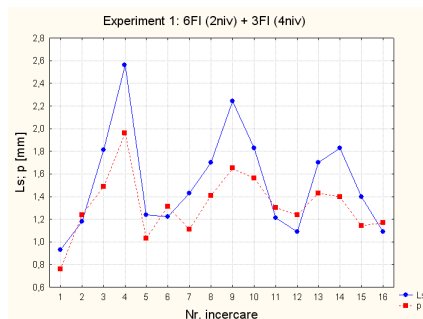


Fig. 5.34. Corelația evoluției L_s ; p

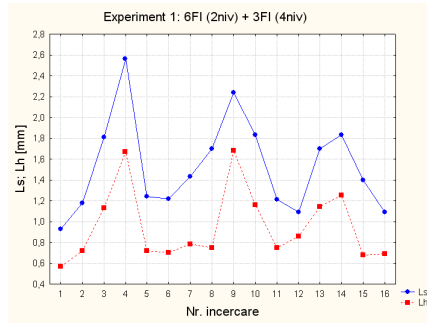


Fig. 5.35. Corelația evoluției L_s; L_h

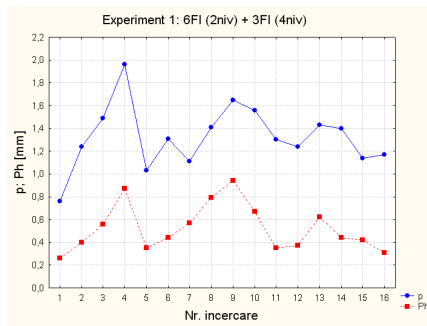


Fig. 5.36. Corelația evoluției p; Ph

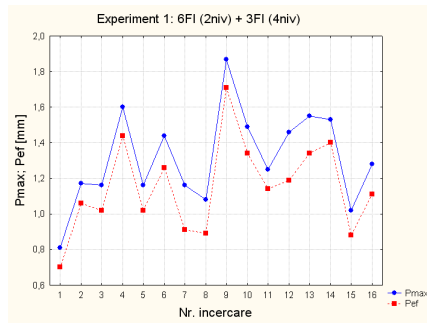


Fig. 5.37. Corelația evoluției Pmax; Pef

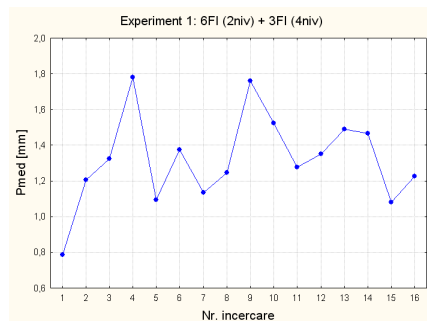


Fig. 5.38. Evoluția Pmed

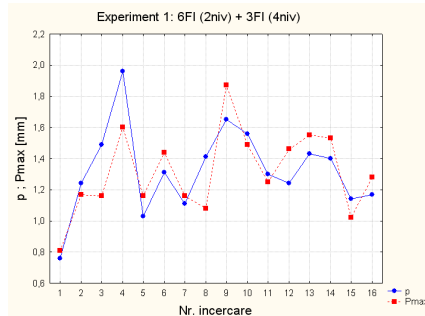


Fig. 5.39. Evoluția p; Pmax (transversal și respectiv longitudinal)

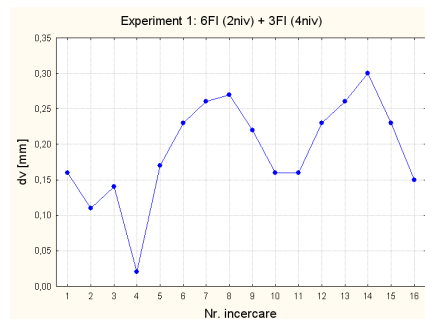


Fig. 5.40. Evoluția dv

Graficele evoluției perechilor de funcții obiectiv relevă existența unor corelații între evoluția valorilor acestora. De exemplu, se poate constata existența unei corelații între evoluția valorilor L_s și L_{hr} , pe de o parte și p și P_{hr} , pe de altă parte, deci, implicit, între oricare dintre cele 4 mărimi. Aceste corelații relevă faptul că matricea de experimentare utilizată este relevantă pentru spațiul multi-factorial investigat, iar rezultatele obținute pot fi utilizate pentru stabilirea parametrilor de proces mai importanți (semnificativi), dar permite și obținerea valorilor minime și respectiv maxime a valorilor funcțiilor obiectiv prin utilizarea combinațiilor de valori a factorilor de influență care să asigure acest lucru.

De exemplu, combinația estimată să conducă la cel mai mare L_s este: 3sau4(X7); 4(X8); 4(X9); 1(X2), respectiv la cel mai mare p , este: 3sau4(X7); 4(X8); 4(X9); 1(X2); 2(X5), iar pentru cel mai mic L_s este: 1(X7); 1(X8); 1sau 2 sau 3(X9); 2(X2).

Analizele macroscopice au relevat existența imperfecțiunilor de tip pori în sudură, fenomen specific sudării cu fascicul laser în regim pulsant cauzat de închiderea periodică a găurii de cheie, dar în număr relativ mic. Pe de altă parte, o parte din regimurile utilizate nu au produs pori vizibili în secțiunile transversale sau longitudinale ceea ce relevă efectul cuplării hibride a celor două procese asupra stabilității procesului de sudare corelat cu o agitație mai intensă a băii de sudare și o lățime crescută în zona inferioară a sudurii, deci a abilității îmbunătățite în ceea ce privește sudarea în rost deschis.

Se precizează că pentru încercarea 4, combinația de parametri de proces a produs o sudură aproximativ continuă, în limita erorilor de prelevare/prelucrare și a erorii de măsurare (0.02mm). Diferența de pătrundere a fost stabilită totuși pe spoturi cu o pătrundere mai mare decât majoritatea – cauzate probabil de

instabilități în timpul procesului de sudare sau de cuplări rezonante ale frecvențelor celor două procese.

Sintetic, factorii de influență semnificativi pentru funcțiile obiectiv avute în vedere sunt următorii:

- Ls: X7, X8, X9 și eventual X2
- p: X7, X8, X9, X5 și X2
- Ph: X2, X3, X6, X7, X8 și X9 (eventual X5)
- Lh: X1, X2, X6, X7, X8 și X9
- Pmax: X1, X4, X5, X7, X8, X9 (eventual X3)
- Pef.: X1, X4, X5, X7, X8 și X9
- Dv: X1, X2, X3, X7, X8, X9
- Pmed (calculat long.-transv.): X1, X2, X5, X7, X8 și X9

5.2.4. Direcții de optimizare ale procesului

Pe baza rezultatelor obținute în urma analizelor și măsurătorilor efectuate se pot stabili următoarele direcții de optimizare pentru funcțiile obiectiv avute în vedere, FI de influență mai importanți fiind:

- Pentru Pef:
 - unghiul dintre capul laser și capul WIG – α [°]
 - frecvența curentului de sudare WIG – Fwig [Hz]
 - durata pulsului – dp [ms]
 - Curentul mediu – Iav [A]
 - puterea în puls – Pp [W]
 - frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]
 - optimizare == maximizare valorii
- Pentru L_s:
 - Curentul mediu – Iav [A]
 - Puterea în puls – Pp [W]
 - Frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]
 - distanța hibridă – a [mm]
 - optimizare == minimizare sau maximizare funcție de aplicație
- Pentru Pmed (calculat long.-transv.):
 - unghiul dintre capul Laser și capul WIG – α [°]
 - distanța hibridă – a [mm]
 - durata pulsului – dp [ms]
 - Curentul mediu – Iav [A]
 - Puterea în puls – Pp [W]
 - Frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]
- Pentru p:
 - Curentul mediu – Iav [A]
 - Puterea în puls – Pp [W]
 - Frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]
 - durata pulsului – dp [ms]
 - distanța hibridă – a [mm]

Pentru P_h:

- distanța hibridă – a [mm]
- viteza de sudare – vs [mm/s]
- Rata curentului WIG – rat WIG [%]
- Curentul mediu – Iav [A]

- Puterea în puls – Pp [W]
- Frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]
- durata pulsului – dp [ms]
- Pentru L_h:
 - unghiul dintre capul Laser și capul WIG – α [°]
 - distanța hibridă – a [mm]
 - Rata curentului WIG – rat WIG [%]
 - Curentul mediu – Iav [A]
 - Puterea în puls – Pp [W]
 - Frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]
- Pentru Pmax:
 - unghiul dintre capul Laser și capul WIG – α [°]
 - Frecvența curentului de sudare WIG – Fwig [Hz]
 - durata pulsului – dp [ms]
 - Curentul mediu – Iav [A]
 - Puterea în puls – Pp [W]
 - Frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]
 - viteza de sudare – vs [mm/s]
- Pentru Dv:
 - unghiul dintre capul Laser și capul WIG – α [°]
 - distanța hibridă – a [mm]
 - viteza de sudare – vs [mm/s]
 - Curentul mediu – Iav [A]
 - Puterea în puls – Pp [W]
 - Frecvența de repetiție a pulsurilor laser – FpL [Hz]

Pentru optimizare pot fi avute în vedere atât combinații Pef mare și Ls mic, dar și Pef mare și Ls mare funcție de aplicația specifică la care se utilizează procedeul de sudare hibrid LmWP. Deoarece, rezultatele programul experimental ce a utilizat o matrice de experimentare de tip Taguchi a permis reducerea numărului de FI, dar nu suficient pentru reducerea volumului experimental, programul experimental pentru optimizarea procesului a utilizat aceeași strategie de experimentare de tip Box-Wilson, cu utilizarea unor experimente factoriale care să permită determinarea modelelor de variație a principalelor funcții obiectiv avute în vedere: pătrunderea efectivă, distanța dintre vârfuri și lățimea la suprafață a sudurii.

5.3. Dezvoltări funcționale și optimizare proces de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat

5.3.1. Optimizare funcțională proces de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsat

5.3.1.1. Sincronizarea pulsurilor și controlul defazajului. Mod de implementare

Pe baza rezultatelor obținute în programul experimental inițial, a fost propusă o direcție de optimizare a procesului hibrid LmWP, ce implică sincronizarea

pulsurilor celor două procese, dar și controlul defazajului dintre ele. Această sincronizare și programare a defazajului dintre cele două procese pulsate ar permite controlul agitației băii de sudare, dar mai ales controlul intensității cuplării hibride dintre cele două procese pentru a evita situațiile tranzitorii în care interacțiunea dintre cele două procese nu mai este hibridă, situație în care procesul ar fi unul "sudare WIG asistată laser". În urma studierii caracteristicilor celor două procese și a echipamentelor uzuale s-a stabilit ca procesul conducător să fie procesul WIG deoarece amorsarea cu înaltă frecvență implică instabilități la inițierea arderii arcului ce pot duce la desincronizarea celor două procese.

Sunt propuse două metode / proceduri prin care să se realizeze un sistem de sincronizare a pulsurilor celor două procese, soluțiile de implementare fiind:

A. cu fascicul laser pornit pentru amorsare facilă arc WIG

1. inițiere fascicul laser (frecvență + durata puls - factor de umplere prestabilite – eventual regim slab din punct de vedere energetic) pentru aprindere facilă WIG
2. amorsare WIG HF
3. timp pentru stabilizare arc WIG la frecvență și factor de umplere prestabilite
4. sesizare stabilizare arc WIG
5. oprire și pornire sincronă cu frecvența WIG a pulsurilor laser (cu / fără defazaj prestabilit)

B. cu pornire directă WIG

1. amorsare WIG cu frecvență și rată de umplere prestabilă
2. timp pentru stabilizare arc
3. sesizare stabilizare ardere arc WIG
4. pornire sincronă pulsuri laser (frecvență laser – frecvență WIG) cu / fără defazaj prestabilit

Ambele variante de sisteme pot include componente de sesizare a sincronizării celor două procese, de corecție și respectiv de control în timp real a defazajului dintre cele două procese, situație în care sistemul ar deveni extrem de complex, pentru aplicații industriale fiind suficiente doar sesizarea desincronizării și eventual avertizarea / oprirea procesului de sudare. Schema de funcționare a celor două soluții de implementare este prezentată în fig. 5.41.

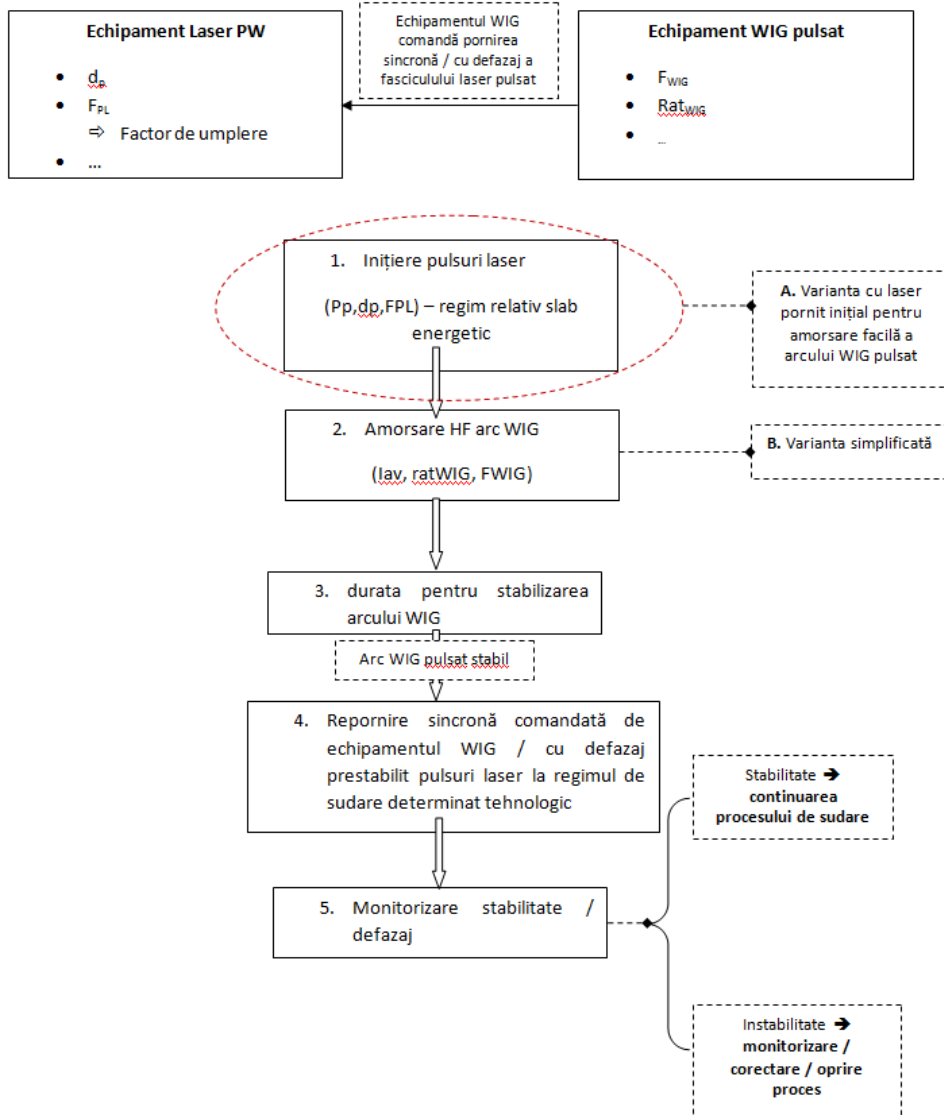


Fig. 5.41. Soluțiile de control a sincronizării pulsurilor

Cele două soluții de implementare trebuie să permită următoarele:

- selecția parametrilor de proces pentru cele două procese:
 - pentru procesul WIG: controlul frecvenței pulsurilor WIG și a ratei de umplere
 - LASER: controlul duratei pulsului și a frecvenței de repetiție, parametrii ce determină rata de umplere a pulsurilor laser (nu rata de acoperire/suprapunere a pulsurilor laser)
- selectarea combinațiilor de frecvențe optime / a defazajului dintre cele două procese pe baza investigațiilor tehnologice și a calculelor matematice

- pornirea procesului de sudare hibrid controlat de sistemul de sincronizare
- monitorizarea sincronizării celor două procese, eventual corectarea instabilităților, oprirea procesului în condițiile apariției unor instabilități cu durată mare.

În situația în care echipamentul laser permite controlul frecvenței de repetiție a pulsurilor laser printr-un generator de semnal extern și respectiv cu funcții de intrare / ieșire de tipul "laser ready to pulse", "laser pulsed", cazul laserului HL 124P LCU, sincronizarea și controlul defazajului pot fi efectuate prin corelarea frecvenței pulsurilor WIG cu frecvența de ieșire a semnalului unui generator de frecvență extern la care se poate aplica o întârziere pentru a controla defazajul dintre cele două procese.

Pe baza cerințelor prezentate și ținând cont de caracteristicile echipamentelor existente la ISIM Timișoara, utilizate în cadrul sistemului experimental pentru dezvoltarea procesului de sudare hibrid LmWP, a fost conceput, un sistem de control a sincronizării pulsurilor celor două procese (**cerere de brevetare înregistrată la OSIM**).

Realizarea acestui sistem se bazează pe utilizarea interfețelor existente la cele două echipamente utilizate pentru dezvoltarea procesului de sudare hibrid LmWP, pe soluția practică de control a puterii de ieșire medii la utilizarea fasciculului laser în regim pulsant prin controlul frecvenței de repetiție a pulsurilor [13], dar și pe realizarea unor noi componente electronice, care să asigure funcționalitățile prezentate în schema logică de funcționare din fig. 5.41.

5.4. Program experimental pentru optimizarea procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsant

5.4.1. Sinteză experimentări pentru stabilirea direcțiilor de optimizare. Stabilirea strategiei de experimentare

Programele experimentale derulate anterior ce au utilizat o strategie de tipul *Gauss – Seidel* au permis caracterizarea noului proces de sudare hibrid precum și stabilirea unor relații care să descrie cantitativ influența parametrilor de proces asupra caracteristicilor geometrice ale sudării sudate, au fost focalizate asupra parametrilor de proces specifici procesului de sudare WIG pulsant și a configurației geometrice hibride, parametrii de proces laser fiind păstrați constanți.

Rezultatele analizelor efectuate au permis selectarea variantei ce răspunde la obiectivul principal al dezvoltării noului proces hibrid – atenuarea variației de pătrundere – varianta ce are procesul WIG pulsant ca proces conducător precum și domeniul de frecvențe ale curentului WIG de interes – domeniul de frecvențe medii, în zona frecvenței de repetiție a pulsurilor laser.

Pentru stabilirea direcțiilor de optimizare a procesului a fost derulat un program experimental, ce a vizat un număr mare de parametri de proces – laser, WIG, dar și hibrid, bazat pe matrici de tip Taguchi, iar rezultatele au permis determinarea factorilor de influență principali și a direcției în care aceștia influențează valorile funcțiilor obiectiv avute în vedere.

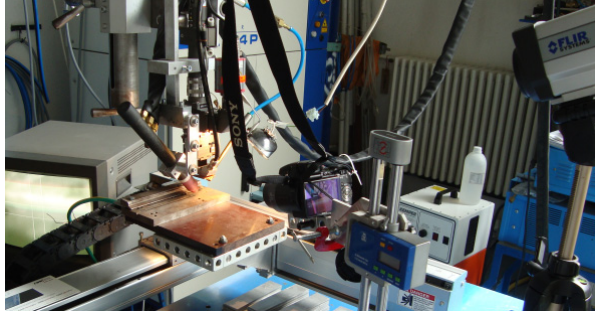


Fig. 5.42. Montajul experimental [16]

Pentru stabilirea strategiei de experimentare necesară optimizării noului proces de sudare hibrid a fost efectuată o sinteză a rezultatelor programului experimental Taguchi, imaginea de ansamblu a rezultatelor obținute fiind prezentate în tabelul 5.7., unde se pot observa relațiile FI important – FO.

Tabelul 5.7. – Matricea FO – FI a experimentului Taguchi

FO/FI	P _{ef}	p	Ph	P _{med}	D _v	L _h	L _s	P _{max}
x1 α [°]								
x2 ahibrid [mm]	?	?		?			?	?
x3 vs [mm/s]								?
x4 F _{wig} [Hz]	?				?			
x5 dp [ms]	?				?			
x6 ratWIG [%]					?	?		?
x7 I _{av} [A]								
x8 P _p [W]								
x9 F _{pL} [Hz]			?					

Lista factorilor ce influențează, la trecerea de pe un nivel pe altul, semnificativ funcțiile obiectiv avute în vedere este următoarea:

- L_s: X7, X8, X9 și eventual X2
- p: X7, X8, X9, X5 și X2
- Ph: X2, X3, X6, X7, X8 și X9 (eventual X5)
- P_{max}: X1, X4, X5, X7, X8, X9 (eventual X3)
- P_{ef}: X1, X4, X5, X7, X8 și X9
- P_{med} (calculat long.-transv.): X1, X2, X5, X7, X8 și X9

- Lh: X1, X2, X6, X7, X8 și X9
- Dv: X1, X2, X3, X7, X8, X9

Din matricea FO – FI prezentată, în tabelul 5.7., se poate observa faptul ca 3 FI influențează în mod semnificativ toate FO avute în vedere, precum și faptul că numărul de FI semnificativi pentru FO de interes sau combinații între acestea, în ceea ce privește atenuarea variației de pătrundere și implicit pătrunderea efectivă este încă relativ mare, pentru a efectua un experiment factorial complet care să permită stabilirea direcției de deplasare pentru determinarea zonei de optim.

În condițiile prezentate, strategia abordată pentru determinarea zonei de optim a procesului, specifice condițiilor experimentale în care s-au desfășurat primele două programe experimentale, a fost una în doi pași:

- Pasul 1: derularea unui experiment factorial de ordinul unu fracționar (EFF) care să studieze efectele a cât mai multor factori de influență și care să permită reducerea numărului de FI, pentru determinarea unei zone apropiate zonei de optim
 - introducerea în cadrul EFF a două funcții obiectiv care să reflecte calitatea sudurilor realizate și evaluate prin notare de la 1 la 10 de către un expert sudor
- Pasul 2: derularea unui experiment factorial de ordinul doi pentru determinarea zonei de optim pentru FO avute în vedere

5.4.2. Stabilire spațiu de experimentare. Experimentări de optimizare a procesului de sudare.

Pentru EFF spațiul experimental a fost stabilit în următorul mod:

- poziționarea FI care influențează relativ puțin variația FO principale pe nivelele favorabile:
 - maximizarea sau minimizarea efectelor – FO principală P_{ef}
 - *observație: din motive de stabilitate unghiul hibrid a fost poziționat la 45°, iar rată WIG la 50% - valori la care s-a observat o stabilitate ridicată a procesului hibrid*
- selectarea FI care vor fi studiați pe baza sintezei experimentului de tip Taguchi: F_{PL} , P_p , I_{av} , F_{WIG} , d_p și a_{hibrid}
- stabilirea punctului central și a domeniului de variație pentru FI studiați, pe baza rezultatelor experimentului Taguchi și a limitărilor impuse de echipamentele utilizate în ceea ce privește reglarea parametrilor de proces

Pentru asigurarea trasabilității experimentărilor, materialul de bază utilizat a fost același ca și în programele experimentale anterioare – tablă de oțel aliat inoxidabil austenitic, tip EN 1.4301 (X5CrNi18-10), de 3mm grosime, iar parametri de proces păstrați constanți au fost următorii:

- debit gaz de protecție laser (Ar99%): 12l/min
- debit gaz de protecție (Ar99%) WIG: 12l/min
- presiune duză "cross-jet" laser: 2.5bar
- diametrul spotului laser: 0.6mm
- poziție pată focala laser: pe suprafața MB

Matricea codificată utilizată pentru experimentul factorial fracționar de ordinul unu este prezentată în tabelul 5.8., iar în tabelul 5.9 și tabelul 5.10 este prezentat punctul central și domeniul de variație a FI selectați și respectiv matricea reală pentru EFF derulat.

Tabelul 5.8. – Matricea codificată a EFF derulat

Nr. inc.	Factori de influență						param. proces fixati pe nivele favorabile		
	x1=FpL [Hz]	x2=Pp[W]	x3=lav [A]	x4=Fwig [Hz]	x5=ahibrid [mm]	x6=dp [ms]	α [°]	vs [mm/s]	ratWIG [%]
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1			
2	1	-1	-1	-1	1	-1			
3	-1	1	-1	-1	1	1			
4	1	1	-1	-1	-1	1			
5	-1	-1	1	-1	1	1			
6	1	-1	1	-1	-1	1			
7	-1	1	1	-1	-1	-1			
8	1	1	1	-1	1	-1			
9	-1	-1	-1	1	-1	1			
10	1	-1	-1	1	1	1			
11	-1	1	-1	1	1	-1			
12	1	1	-1	1	-1	-1			
13	-1	-1	1	1	1	-1			
14	1	-1	1	1	-1	-1			
15	-1	1	1	1	-1	1			
16	1	1	1	1	1	1			

Tabelul 5.9. - Punctul central și domeniul de variație pentru EFF derulat

Nivel	Factori de Influenta - FI						param. proces nivele convenabile		
	x1=FpL [Hz]	x2=Pp[W]	x3=lav [A]	x4=Fwig [Hz]	x5=ahibrid [mm]	x6=dp [ms]	α [°]	vs [mm/s]	ratWIG [%]
1	23	1425	33	19	1.6	3.4	45	3.6	50
0	21	1400	31	15	1.4	3.2			
-1	19	1375	27	11	1.2	3			
variatie	2	25	4	4	0.2	0.2			
Conditii de experimentare		debit gaz (Ar99%): 12l/min WIG; 12l/min LA crossjet: 2bar							

După cum se poate observa din tabelul 5.10. – au fost efectuate în plus două încercări: o replică pentru una dintre combinațiile din matricea EFF și o încercare pentru punctul central, datele fiind utilizate pentru compararea rezultatelor evaluării FO avute în vedere.

Tabelul 5.10. – Matricea EFF cu valorile reale – corespondență număr încercare – număr probă

Proba	Nr. inc.	Factori de influență						param. proces nivele convenabile		
		x1=FpL [Hz]	x2=Pp[W]	x3=lav [A]	x4=Fwig [Hz]	x5=ahibrid [mm]	x6=dp [ms]	α [°]	vs [mm/s]	ratWIG [%]
1	1	19	1375	27	11	1.2	3	45	3.6	50
10	2	23	1375	27	11	1.6	3			
11	3	19	1425	27	11	1.6	3.4			
2	4	23	1425	27	11	1.2	3.4			
12	5	19	1375	33	11	1.6	3.4			
3	6	23	1375	33	11	1.2	3.4			
4	7	19	1425	33	11	1.2	3			
13	8	23	1425	33	11	1.6	3			
5	9	19	1375	27	19	1.2	3.4			
14	10	23	1375	27	19	1.6	3.4			
15	11	19	1425	27	19	1.6	3			
6	12	23	1425	27	19	1.2	3			
16	13	19	1375	33	19	1.6	3			
7	14	23	1375	33	19	1.2	3			
8	15	19	1425	33	19	1.2	3.4			
17	16	23	1425	33	19	1.6	3.4			
9	17=R15	19	1425	33	19	1.2	3.4			
18	18=PC	21	1400	31	15	1.4	3.2			

Se menționează că la utilizarea matricei EFF din tabelul 5.8. următoarele efecte sunt suprapuse, lucru de care s-a ținut cont în evaluarea rezultatelor obținute, ținând cont de fenomenelor fizice specifice procesului hibrid și a rezultatelor obținute în programele experimentale anterioare, după prelevarea probelor și efectuarea calculelor statistice:

- E12 + E35 → 12=35
- E13+E25 → 13=25
- E14+E45 → 14=45
- E15+E23+E46 → 15=23=46
- E16+E45 → 16=45
- E24+E36 → 24=36
- E26+E34 → 26=34

Odată stabilită matricea de experimentare pentru EFF, s-a trecut la efectuarea încercărilor și la prelevarea de epruvete pentru analiza caracteristicilor geometrice ale sudurilor realizate. Pe parcursul derulării programului experimental au fost făcute observații cu privire la stabilitatea procesului de sudare, dar și prin monitorizarea tensiunii de sudare. Variația tensiunii de sudare și observațiile cu privire la stabilitatea procesului sunt sintetizate în tabelul 5.11.

Tabelul 5.11. - Observațiile din timpul derulării programului experimental EFF 2⁶-2

Nr. inc.	WIG modif (semi)automat			Param laser calculati		OBSERVATII
	Iva _{rf} [A]	Iba _{za} [A]	Us [V]	Ep [J]	P _{medie} L [W]	
1	46	9	9.7-10.3	4.1 25	78.375	fara stropiri
2	41	13	9.7-9.9	4.1 25	94.875	fara stropiri
3	41	13	10.1-10.3	4.8 45	92.055	fara stropiri
4	46	9	9.9-10.3	4.8 45	111.435	fara stropiri
5	50	17	9.3-9.5	4.6 75	88.825	stropiri reduse
6	56	11	9.4-9.8	4.6 75	107.525	stropiri reduse
7	56	11	9,7-10	4.2 75	81.225	stropiri reduse
8	50	17	9.4-9.5	4.2 75	98.325	stropiri
9	46	9	9.4-10.1	4.6 75	88.825	fara stropiri, suflaj magnetic
10	41	13	9.1-9.3	4.6 75	107.525	stropiri
11	41	13	8.8-9.1	4.2 75	81.225	fara stropiri
12	46	9	9.3-9.9	4.2 75	98.325	fara stropiri, proces WIG foarte stabil

Nr. inc.	WIG modif (semi)automat			Param laser calculati		OBSERVATII
	Iva rf [A]	Iba za [A]	Us [V]	Ep [J]	Pmedie L [W]	
13	50	17	9.1-9.4	4.1 25	78.375	stropiri minime
14	50	17	9.5-9.7	4.1 25	94.875	stropiri; sulfaj magnetic
15	50	17	9.2-9.5	4.8 45	92.055	stropiri minime, arc foarte stabil, instabilitate redusa la sfarsitul suduri
16	50	17	8.8-9.0	4.8 45	111.435	stropiri relativ mari
17= R15	50	17	9.3-9.6	4.8 45	92.055	stropiri
18= PC	47	15	8.9-9.3	4.4 8	94.08	stropiri

Aspectul vizual al trecerilor realizate în cadrul programului experimental EFF 2⁶-2 poate fi observat în figurile 5.43. – 5.48.



Fig. 5.43. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶-2 (1-3)



Fig. 5.44. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶-2 (4-6)

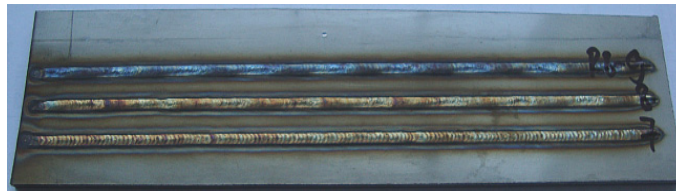


Fig. 5.45. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶-2 (7-9)

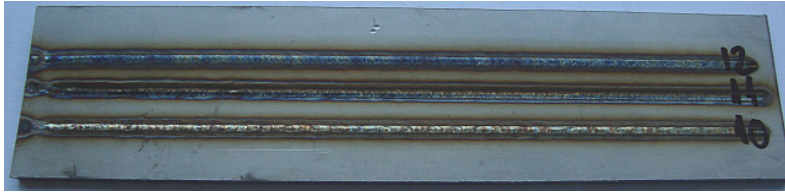


Fig. 5.46. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶-2 (10-12)



Fig. 5.47. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶-2 (13-15)

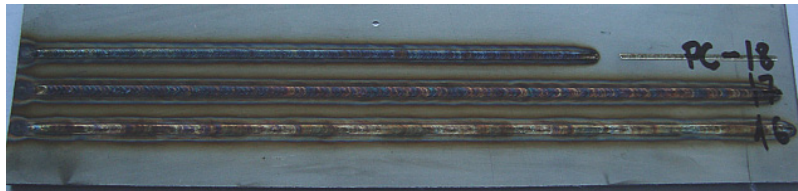


Fig. 5.48. Aspect vizual treceri exp. EFF 2⁶-2 (16-18)

Valorile funcțiilor obiectiv au fost determinate utilizând același mod de prelevare din programul experimental ce a utilizat matricea Taguchi, transversal și longitudinal precum și același mod de caracterizare geometrică a sudurilor realizate (fig. 4.50. și fig. 4.51.), aspectul macroscopic al epruvetelor prelevate (secțiune transversală și respectiv longitudinală) pentru cele 16 încercări experimentale este prezentat în figurile 5.49.– 5.66.

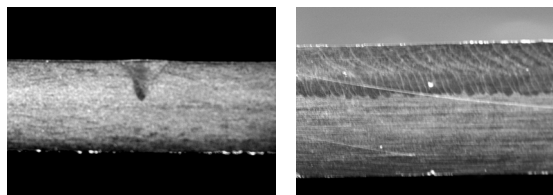


Fig. 5.49. P1

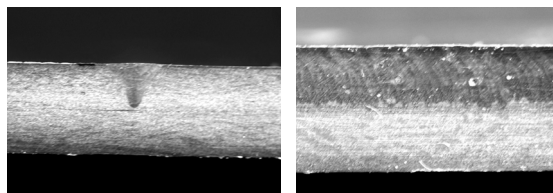


Fig. 5.50. P2

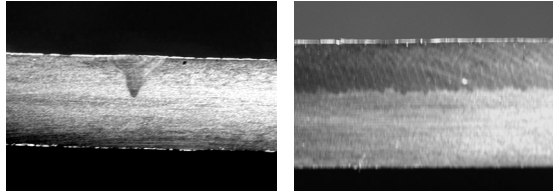


Fig. 5.51. P3

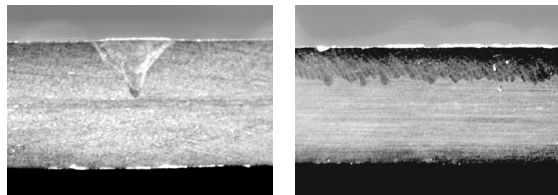


Fig. 5.52. P4

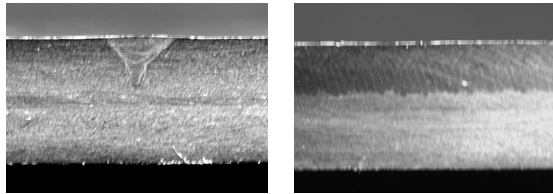


Fig. 5.53. P5

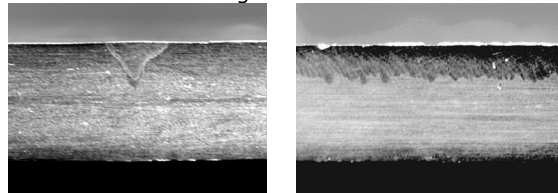


Fig. 5.54. P6

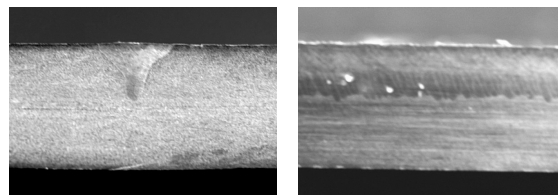


Fig. 5.55. P7

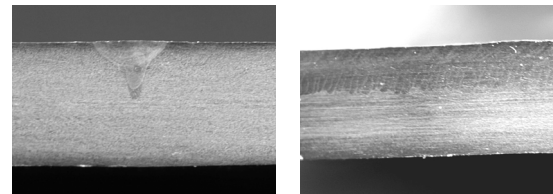


Fig. 5.56. P8

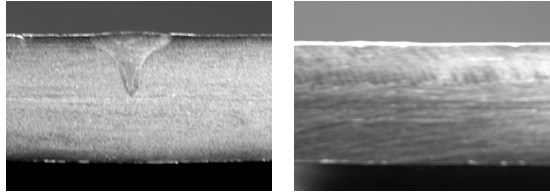


Fig. 5.57. P9

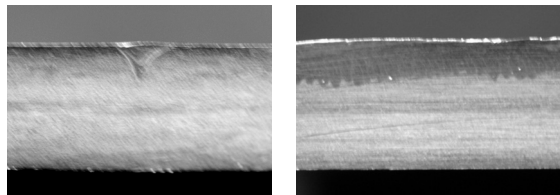


Fig. 5.58. P10

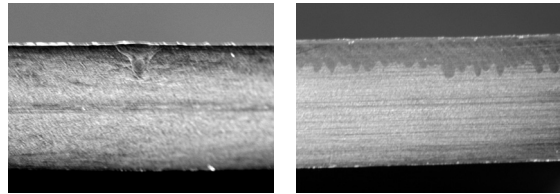


Fig. 5.59. P11

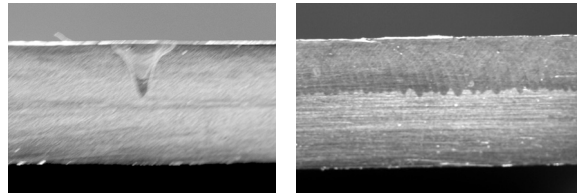


Fig. 5.60. P12

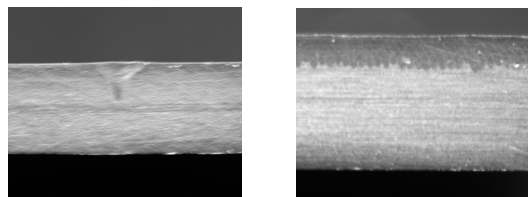


Fig. 5.61. P13

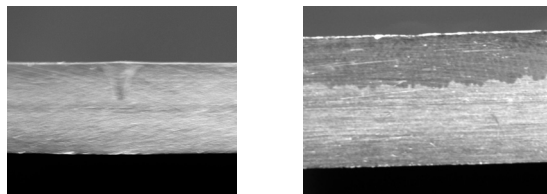


Fig. 5.62. P14

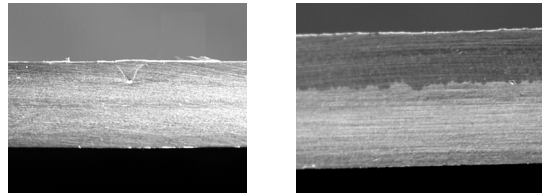


Fig. 5.63. P15

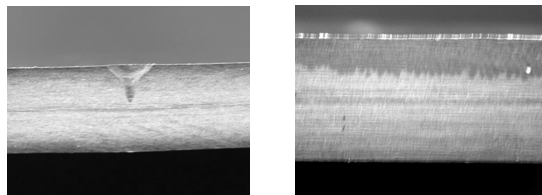


Fig. 5.64. P16

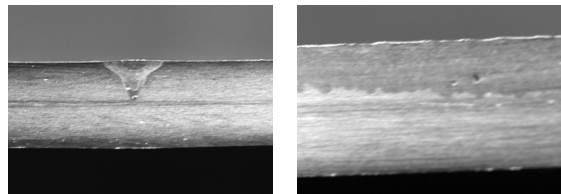


Fig. 5.65. P17

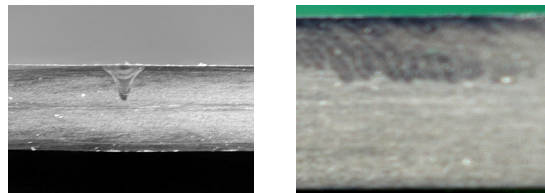


Fig. 5.66. P18

După cum se poate observa din aspectul macroscopic al epruvetelor prelevate din trecerile realizate, unele dintre sudurile realizate sunt practic continui, variația de pătrundere fiind probabil datorată unor instabilități în procesul de sudare și a erorilor de prelucrare în direcție longitudinală a epruvetelor.

Prelucrarea datelor experimentale a fost efectuată cu un software specializat (Statistica) ce a permis trasarea diagramei efectelor, valorile măsurate ale funcțiilor obiectiv fiind prezentate în tabelul 5.12.

Pe lângă FO măsurate direct pe probele prelevate, a mai fost utilizată o funcție obiectiv calculată – amplitudinea de variație a pătrunderii efective: diferența dintre pătrunderea măsurată în secțiunea longitudinală și pătrunderea efectivă. De asemenea, a fost efectuată o evaluare a diferențelor dintre valorile măsurate pe secțiunile transversale și respectiv longitudinale pentru evaluarea dimensiunii erorilor sistematice cauzate de fie de instabilitățile din timpul procesului de sudare, dar și de prelucrarea dificilă a epruvetelor de dimensiuni reduse. Aceste date sunt prezentate în tabelul 5.13. De asemenea, un expert sudor a notat încercările efectuate din punct de vedere a stabilității și a aspectului vizual al sudurilor realizate

Tabelul 5.12. – Valorile măsurate ale FO pentru EFF 2⁶-2

FO Nr. inc.	Probe transversale				Probe longitudinale				Obs:
	Ls	p	Ph	Lh	Pmax	Pef	dv		
1	1.66	1.44	0.57	0.54	1.33	1.06	0.21	pori	
2	1.37	0.9	0.52	0.47	1.24	0.94	0.29	Fara pori	
3	1.24	0.85	0.41	0.46	1.14	0.75	0.41	fara pori	
4	1.92	1.62	0.83	0.69	1.45	1.24	0.26	pori mari	
5	1.67	1.43	0.65	0.63	1.49	1.08	0.23	fara pori	
6	2.05	1.5	0.71	0.75	1.05	0.9	0.16	pori	
7	1.75	1.51	0.83	0.66	1.46	1.28	0.22	pori mari	
8	1.72	1.37	0.67	0.66	1.31	0.93	0.26	fara pori	
9	1.74	1.32	0.68	0.56	1.34	1.15	0.21	Incluziuni + pori	
10	1.37	1.4	0.57	0.61	1.47	1.13	0.29	fara pori	
11	1.24	0.95	0.4	0.52	pori	0.77	0.59	pori	
12	1.71	1.23	0.57	0.57	1.17	0.85	0.21	fara pori	
13	1.55	1.37	0.82	0.5	1.2	0.9	0.16	pori	
14	1.93	1.46	0.79	0.65	1.48	1.16	0.21	fara pori	
15	1.79	1.59	0.87	0.62	1.54	1.32	0.2	fara pori	
16	1.81	1.49	0.68	0.72	pori	1.43	1.3	0.3	pori, sudura aproape continua

Tabelul 5.13. – Valorile amplitudinii de variație a Pef și evaluarea diferențelor valorilor măsurători longitudinale / transversale

Nr. inc.	FO calculat	Evaluari masuratori transv. / longit.		diferente %
	Pmax. - Pef.[mm]	Pmed. == (p + Pmax)/2	Dif. Masuratori "p" trans - longit	
1	0.27	1.385	0.11	7.942238267
2	0.3	1.07	-0.34	-31.77570093
3	0.39	0.995	-0.29	-29.14572864
4	0.21	1.535	0.17	11.07491857
5	0.41	1.46	-0.06	-4.109589041
6	0.15	1.275	0.45	35.29411765
7	0.18	1.485	0.05	3.367003367
8	0.38	1.34	0.06	4.47761194
9	0.19	1.33	-0.02	-1.503759398
10	0.34	1.435	-0.07	-4.87804878
11	0.18	0.86	0.18	20.93023256
12	0.32	1.2	0.06	5
13	0.3	1.285	0.17	13.22957198
14	0.32	1.47	-0.02	-1.360544218
15	0.22	1.565	0.05	3.194888179
16	0.13	1.46	0.06	4.109589041

Diagramele Pareto ale efectelor și a combinațiilor acestora sunt prezentate în fig. 5.67. – 5.77., iar în fig. 5.78. – 5.87. sunt prezentate suprafețele de răspuns pentru câteva funcții obiectiv la diferite combinații ale FI.

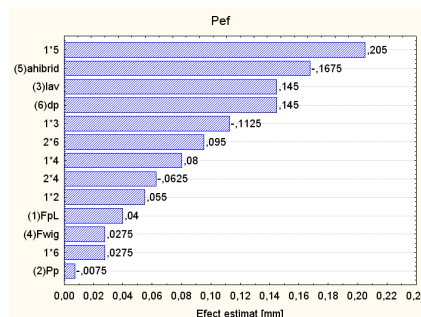


Fig. 5.67. Diagrama Pareto Pef

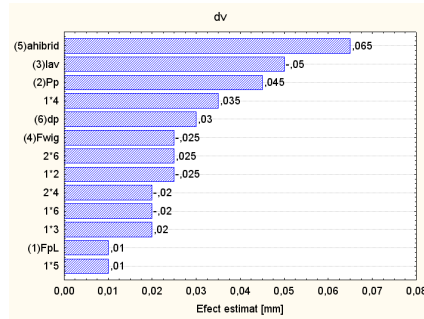


Fig. 5.68. Diagrama Pareto dv

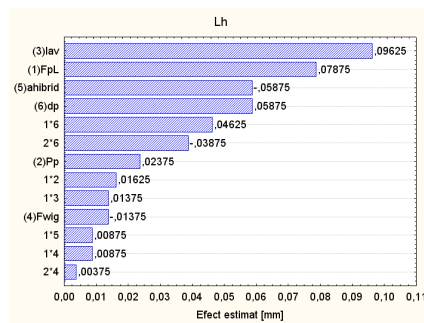


Fig. 5.69. Diagrama Pareto L_h

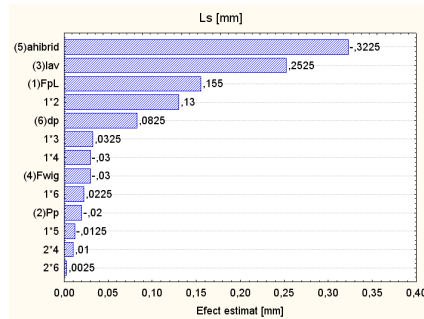


Fig. 5.70. Diagrama Pareto L_s

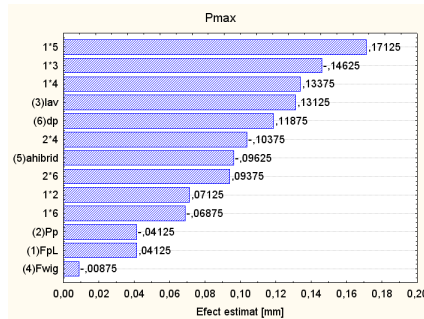


Fig. 5.71. Diagrama Pareto Pmax

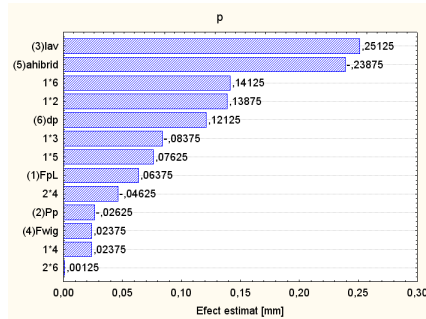


Fig. 5.72. Diagrama Pareto p

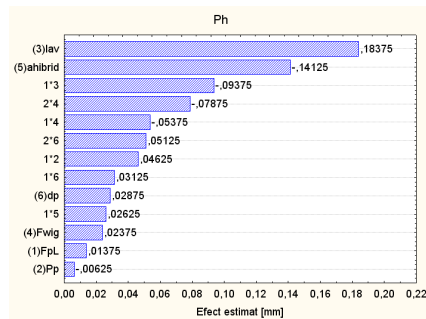


Fig. 5.73. Diagrama Pareto P_h

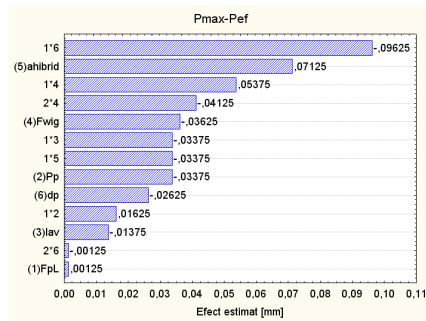


Fig. 5.74. Diagrama Pareto Pmax-Pef

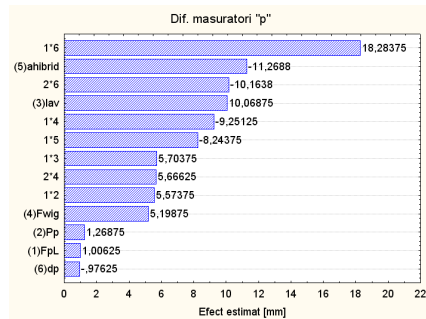


Fig. 5.75. Diagrama Pareto diferențe măsurători „p”

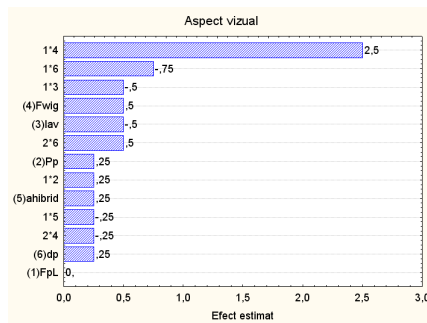


Fig. 5.76. Diagrama Pareto aspect vizual

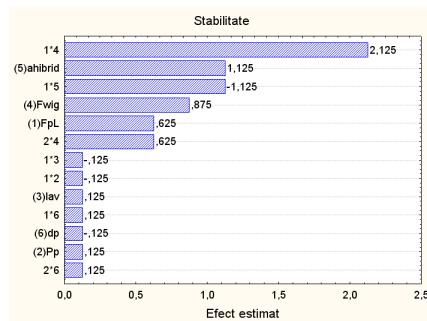


Fig. 5.77. Diagrama Pareto stabilitate proces

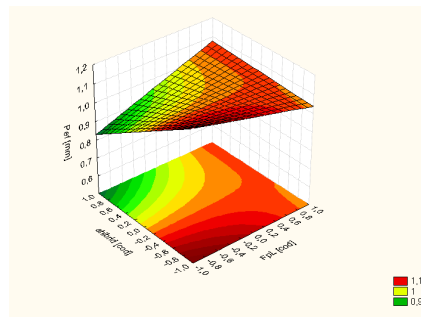


Fig. 5.78. Suprafața de răspuns Pef funcție de a_{hibrid} și FPL

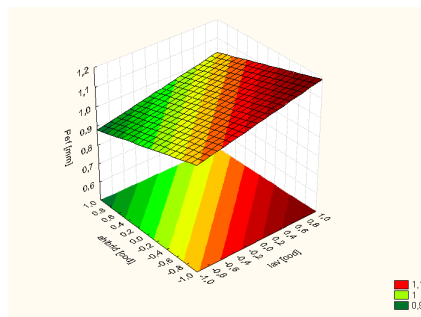


Fig. 5.79. Suprafața de răspuns Pef funcție de a_{hibrid} și Iav

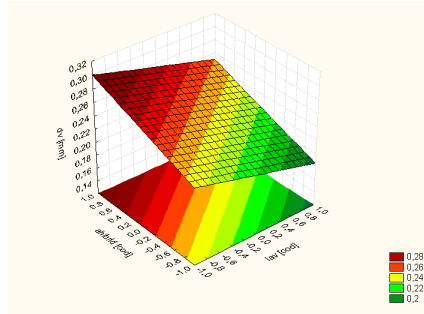


Fig. 5.80. Suprafața de răspuns dv funcție de a_{hibrid} și Iav

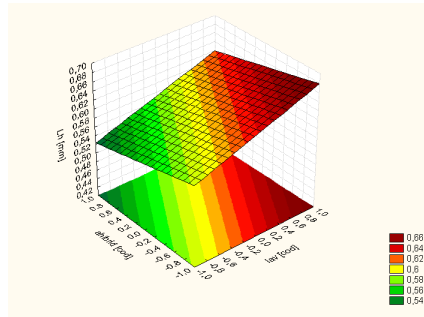


Fig. 5.81. Suprafața de răspuns Lh funcție de a_{hibrid} și Iav

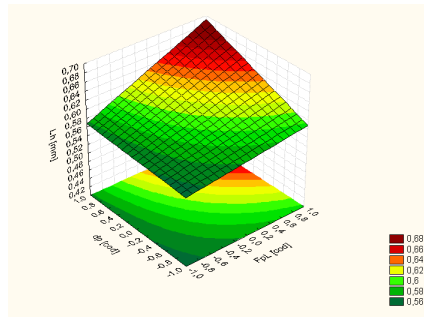


Fig. 5.82. Suprafața de răspuns Lh funcție de dp și FPL

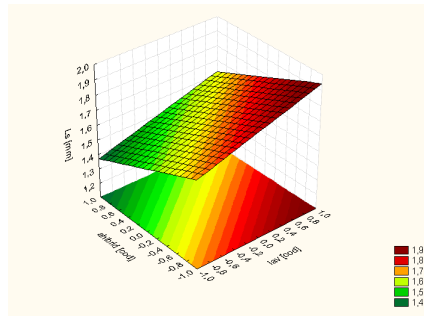


Fig. 5.83. Suprafața de răspuns L_s funcție de a_{hibrid} și Iav

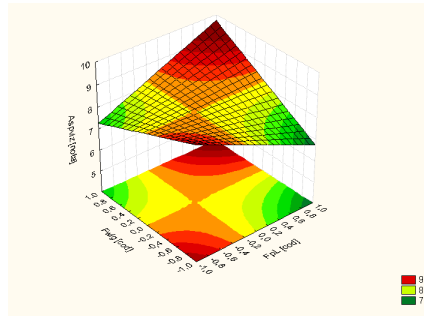


Fig. 5.84. Suprafața de răspuns aspect vizual funcție de FWIG și FPL

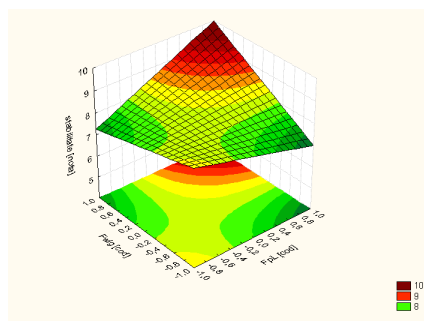


Fig. 5.85. Suprafața de răspuns stabilitate proces funcție de FWIG și FPL

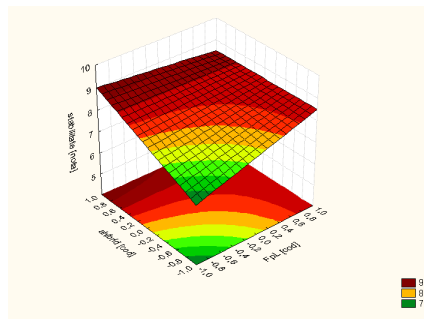


Fig. 5.86. Suprafața de răspuns stabilitate proces funcție de a_{hibrid} și FPL

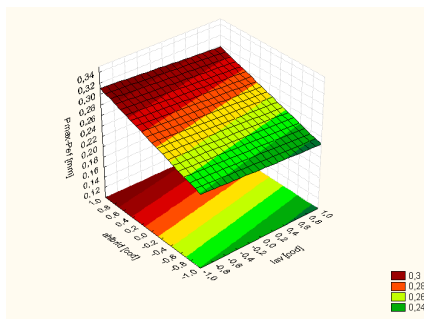


Fig. 5.87. Suprafața de răspuns Pmax-Pef funcție de a_{hibrid} și Iav

Rezultatele experimentului factorial de ordinul 1 fracționat a relevat următoarele:

- existența unei combinații $F_{PL} - F_{WIG}$ (23Hz – 19Hz) favorabilă în ceea ce privește funcțiile obiectiv principale avute în vedere (P_{ef} și d_v), dar și pentru funcțiile obiectiv calitative
- posibilitatea selectării a doi factori de influență semnificativi pentru efectuarea experimentului factorial de ordinul 2: I_{av} și a_{hibrid}
- influența parametrilor procesului laser nu mai este semnificativă asupra FO selectate pentru procesul hibrid – situație datorată limitărilor tehnologice ale echipamentului laser utilizat, în ceea ce privește puterea medie maximă de ieșire; din același motiv durata pulsurilor laser nu mai poate fi crescută deși este unul dintre factorii de influență ce influențează semnificativ pătrunderea efectivă
- efectele suprapuse ale combinațiilor 15-23-46 influențează semnificativ pătrunderea efectivă explicabil prin combinația parametrilor de proces, dar că efectele pot fi obținute prin controlul celor doi factori de influență selectați (în condițiile de experimentare caracterizate de limitările în ceea ce privește puterea medie maximă de ieșire a echipamentului laser - este de așteptat ca modificările valorii pătrunderii efective să fie determinate de curentul mediu de sudare și distanța hibridă)

După prelucrarea statistică a datelor obținute din derularea experimentului factorial de ordinul 1 fracționat s-a trecut la conceperea unui experiment factorial de ordinul 2 complet pentru determinarea zonei de optim a procesului hibrid în condițiile experimentale utilizate (material și caracteristicile acestuia).

Pentru experimentul factorial complet de ordinul doi ($EFC3^2$) zona de experimentare a fost stabilită astfel:

- FI din $EFF 2^{6-2}$ neselectați pentru $EFC3^2$ au fost setați pe nivelele convenabile din punct de vedere a obținerii extremelor pentru pătrunderea efectivă și respectiv distanța între vârfuri;
- pentru FI selectați a fi investigați în cadrul $EFC3^2$ a fost efectuat un set de încercări în zona de extrem pentru a verifica stabilitatea procesului de sudare hibrid la combinații puternic energetice (I_{av} mare + a_{hibrid} mic); în același timp nu s-a urmărit creșterea la valori mult mai mari ale curentului de sudare mediu WIG pentru a păstra efectele hibride echilibrate;
- după stabilirea combinațiilor convenabile din punct de vedere al stărilor puternic energetice limitelor de variație a factorilor de influență a fost stabilit punctul central și domeniul de variație a acestora.

Matricea codificată a experimentului factorial complet de ordinul doi și domeniile de variație sunt prezentate în tabelul 5.14., iar în tabelul 5.15. este prezentată matricea cu valorile reale ale factorilor de influență.

Tabelul 5.14. - Matricea codificată a experimentului de ordinul doi EFC 3²

Nr. inc.	Nivele factori de influență				
	x1=Iav [A]	x2=ahibrid [mm]	x1*x2	x1²	x2²
1	-1	-1	1	1	1
2	0	-1	0	0	1
3	1	-1	-1	1	1
4	-1	0	0	1	0
5	0	0	0	0	0
6	1	0	0	1	0
7	-1	1	-1	1	1
8	0	1	0	0	1
9	1	1	1	1	1

Nivel	x1=Iav [A]	x2=ahibrid [mm]
1	36	1.2
0	33	1
-1	30	0.8
variatie	3	0.2

Tabelul 5.15. - Matricea de experimentare reală EFC 3² și parametri de proces setați pe nivelele convenabile

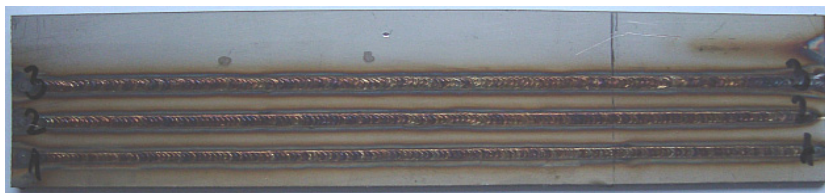
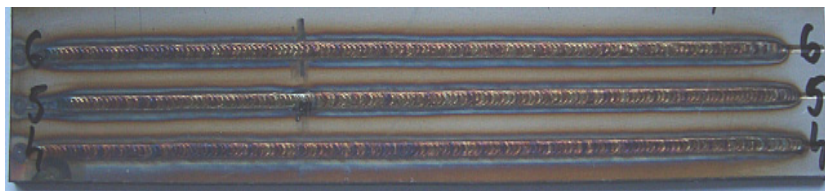
Matricea reala EFC 3 ² - determinare optim									
Nr. inc.	Factori de influență		Param pozitionati pe nivelul convenabil						
	x1=Iav [A]	x2=ahibrid [mm]	FpL [Hz]	Fwig [Hz]	Pp [W]	dp [ms]	α [°]	vs [mm/s]	ratWIG [%]
1	30	0.8	23	19	1425	3.4	45	3.6	50
2	33	0.8							
3	36	0.8							
4	30	1							
5	33	1							
6	36	1							
7	30	1.2							
8	33	1.2							
9	36	1.2							

Odată stabilită matricea de experimentare pentru EFC 3², s-a trecut la efectuarea încercărilor și la prelevarea de epruvete pentru analiza caracteristicilor geometrice ale sudurilor realizate. Pe parcursul derulării programului experimental au fost făcute observații cu privire la stabilitatea procesului de sudare, dar și prin monitorizarea tensiunii de sudare. Variația tensiunii de sudare și observațiile cu privire la stabilitatea procesului sunt sintetizate în tabelul 5.16.

Tabelul 5.16. – Observațiile din timpul încercărilor EFC 3²

Nr. inc.	WIG modif (semi)automat			Param laser calculati		OBSERVATII
	Ivarf [A]	Ibaza [A]	Us [V]	Ep [J]	PmedieL [W]	
1	44	17	9.1-9.3	4.8	110.4	stropiri, instabilități de tensiune la început și sfârșit
2	48	19	8.9-9.5	4.8	110.4	mici stropiri
3	52	20	9.0-9.2	4.8	110.4	stropiri, fum, instabilități de tensiune
4	44	17	7.7-8.0	4.8	110.4	stropiri, suflaj magnetic la început
5	48	19	7.7-8.0, 9	4.8	110.4	stropiri intense spre sfârșit
6	52	20	8.4-8.8	4.8	110.4	stropiri
7	44	17	8.9-9.1	4.8	110.4	stropiri
8	48	19	8.9-9.1	4.8	110.4	stropiri intense
9	52	20	8.6-8.9	4.8	110.4	stropiri reduse

Aspectul vizual al trecerilor realizate în cadrul programului experimental EFC 3² poate fi observat în figurile 5.88. – 5.90.

Fig. 5.88. Aspect vizual treceri exp. EFC 3² (1-3)Fig. 5.89. Aspect vizual treceri exp. EFC 3² (4-6)Fig. 5.90. Aspect vizual treceri exp. EFC 3² (7-9)

Valorile funcțiilor obiectiv au fost determinate utilizând același mod de prelevare, transversal și longitudinal precum și același mod de caracterizare geometrică a sudurilor realizate (fig. 4.50. și fig. 4.51.).

Datele valorilor măsurate ale valorilor funcțiilor obiectiv sunt prezentate în tabelul 5.17., iar în urma prelucrării acestora au fost determinați coeficienții de regresie ai ecuațiilor modelelor de ordinul doi, pentru fiecare funcție obiectiv în parte, prezentați în tabelul 5.18.

Pentru determinarea zonelor de optim au fost trasate graficele curbelor de răspuns din fig. 5.91. – 5.102.

Tabelul 5.17. – Valorile măsurate ale FO pentru EFC 3[^]2

FO	Probe transversale				Probe longitudinale				FO calc.	Eval. mas. transv. / longit.	Dif. mas. "p" trans - longit.	Dif. %
	Nr. inc.	Ls	p	Ph	Lh	Pmax	Pef	dv				
1	1.82	1.38	0.95	0.7	1.61	1.29	0.17	4 pori	0.32	1.495	-0.23	-15.38462
2	2.25	1.58	1.02	0.8	1.72	1.52	0.19	fără pori	0.2	1.65	-0.14	-8.484848
3	2.3	1.63	1.29	0.8	1.89	1.57	0.15	2 pori	0.32	1.76	-0.26	-14.77273
4	2.01	1.41	0.8	0.8	1.49	1.22	0.16	fără pori	0.27	1.45	-0.08	-5.517241
5	2.03	1.38	0.97	0.9	1.56	1.32	0.14	fără pori	0.24	1.47	-0.18	-12.2449
6	2.08	1.51	0.99	0.9	1.68	1.45	0.21	1 por mare	0.23	1.595	-0.17	-10.65831
7	1.83	1.42	0.97	0.8	1.42	1.19	0.21	fără pori	0.23	1.42	0	0
8	1.97	1.53	1.04	0.9	1.7	1.46	0.13	1 por	0.24	1.615	-0.17	-10.52632
9	1.99	1.69	1.27	0.9	1.59	1.33	0.21	1 por	0.26	1.64	0.1	6.097561

Tabelul 5.18. – Coeficienții de regresie pentru modelele de ordinul 2

FO	Coeficienți					
	b ₀	b ₁	b ₁₁	b ₂	b ₂₂	b ₁₂
Ls	2,092	0,118	-0,078	-0,097	-0,013	-0,080
p	1,427	0,103	0,010	0,008	0,105	0,005
Ph	0,897	0,138	0,035	0,003	0,170	-0,010
Lh	0,881	0,057	-0,017	0,037	-0,067	0,003
Pmax	1,608	0,107	-0,047	-0,085	0,078	-0,027
Pef	1,391	0,108	-0,092	-0,067	0,063	-0,035
dv	0,149	0,005	0,032	0,007	0,007	0,005
Pmed	1,517	0,105	-0,018	-0,038	0,092	-0,011
Pmax-Pef	0,217	-0,002	0,045	-0,018	0,015	0,007
Difp%	-11,947	0,260	3,713	5,700	2,293	1,372
Aspect vizual	7,778	0,500	0,833	1,167	-0,167	0,000
Stabilitate proces	7,556	0,333	0,667	1,167	0,167	0,250

Fi: X₁ = L_s; X₂ = a_{hibrid}

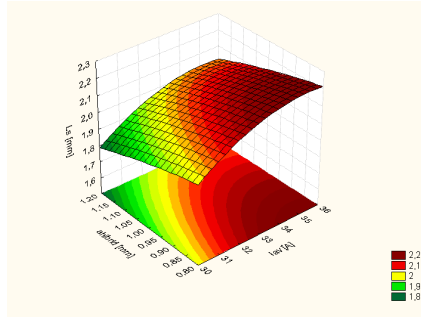


Fig. 5.91. Suprafața de răspuns L_s

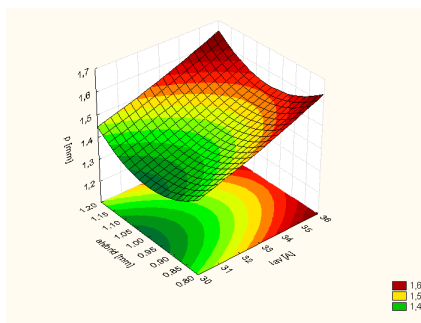


Fig. 5.92. Suprafața de răspuns p

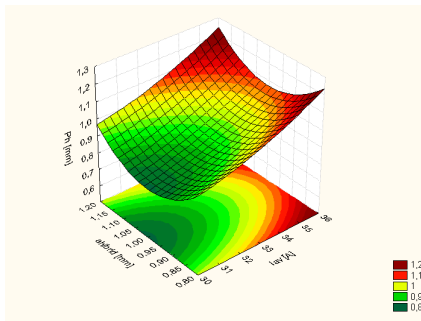


Fig. 5.93. Suprafața de răspuns P_h

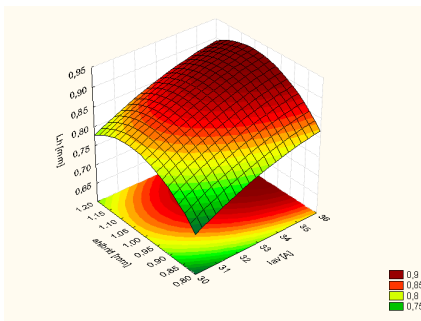


Fig. 5.94. Suprafața de răspuns L_h

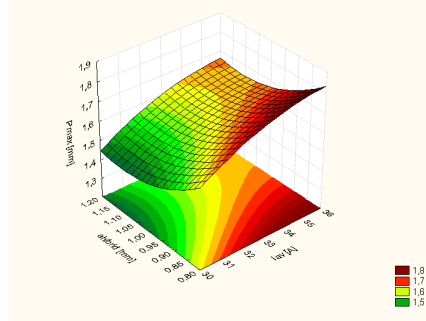


Fig. 5.95. Suprafața de răspuns Pmax

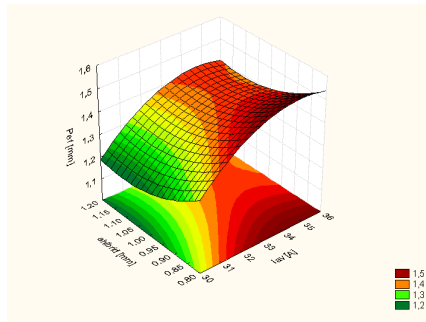


Fig. 5.96. Suprafața de răspuns Pef

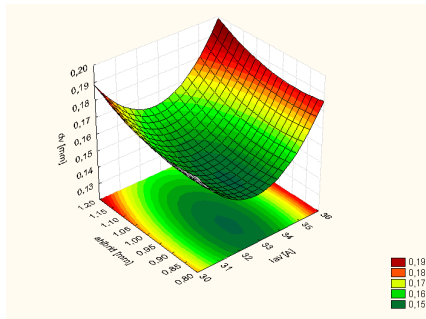


Fig. 5.97. Suprafața de răspuns dv

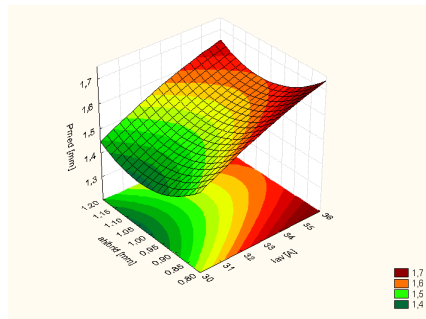


Fig. 5.98. Suprafața de răspuns Pmed (media p și Pmax)

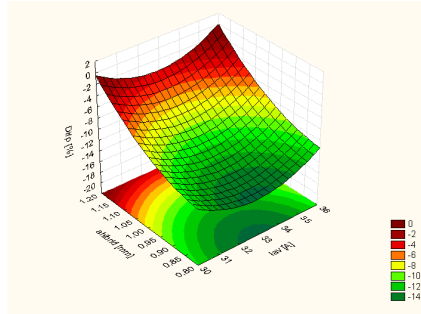


Fig. 5.99. Suprafața de răspuns Dfp (diferența în % P – Pmax)

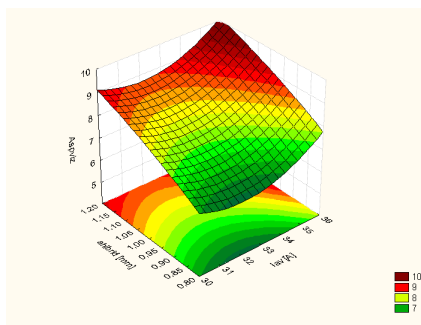


Fig. 5.100. Suprafața de răspuns aspect vizual

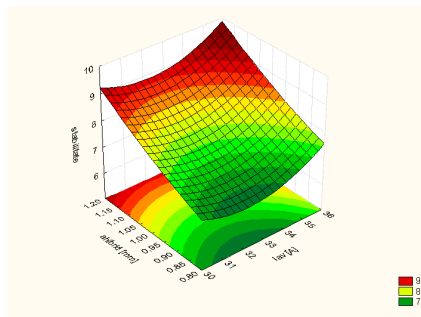


Fig. 5.101. Suprafața de răspuns stabilitate

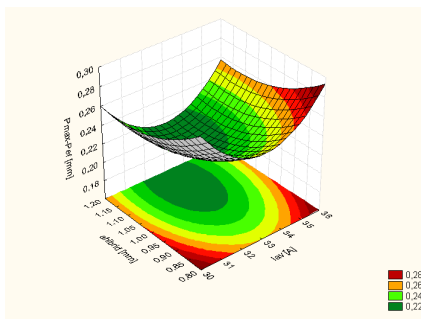


Fig. 5.102. Suprafața de răspuns Pmax - Pef

Din aspectul suprafețelor de răspuns prezentate, se poate observa că pot fi determinate punctele de optim pentru funcțiile obiectiv selectate, în sensul maximizării sau minimizării acestora funcție de cerințele specifice ale îmbinării practice de realizat. În plus, coeficienții de regresie prezentați în tabelul 5.19, pot fi utilizați pentru scrierea ecuațiilor / funcțiilor de variație pentru fiecare FO în parte.

Din graficele trasate pentru suprafețele de răspuns pentru FO principale avute în vedere (P_{ef} , P_{max} și p) se poate observa că maximizarea acestora are loc la valorile maxime ale curentului de sudare mediu ceea ce este în concordanță observațiile experimentul factorial anterior legate de atingerea limitelor superioare ale echipamentului laser. În această situație caracteristicile rezultatului procesării cu procedeul hibrid vor tinde să fie influențate mai pronunțat de către procesul WIG datorită creșterii raportului dintre energia procesului WIG și a procesului laser. În același timp, pentru maximizarea acestor FO, distanța dintre cele două procese trebuie să fie redusă.

Pe de altă parte, din graficele suprafețelor de răspuns se poate observa că în jurul valorii de 33-34A pentru curentul mediu de sudare, cu utilizarea unei distanțe hibride mai mici (în jurul a 0.9-1.0mm) se poate obține o valoare minimă pentru FO d_v – situație în care sudura este quasi-continuă, în combinație cu o valoare ridicată a P_{ef} . Se poate observa că și restul de FO au valori crescute pentru această combinație a FI ceea ce permite utilizarea acestei variante pentru situația în care majoritatea FO să atingă un extrem. În același timp, această combinație a celor doi FI este recomandată pentru a fi utilizată în scopul reducerii energiei liniare introduse în material și implicit a deformațiilor termice inerente.

5.5. Validare rezultate și experimentări exploratorii pe materiale avansate noi

5.5.1. Validare rezultate pentru cazuri concrete de îmbinări cap la cap table subțiri acoperite din oțel de uz general

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul programului experimental final de determinare a zonelor de optim, au fost dezvoltate aplicații practice de îmbinare prin sudare cap la cap pentru table subțiri acoperite din oțel de uz general (aplicare în industria de material rulat – vagoane pentru tramvaie și trenuri) – S235J2WC (EN 10025-5:2004), ca alternativă cu eficiență crescută a procedeelor clasice cu arc electric [15].

Pentru experimentările tehnologice a fost utilizat sistemul experimental conceput, realizat și optimizat în ceea ce privește controlul parametrilor geometrici ai configurației hibride (unghi hibrid, distanță hibridă) din fig. 5.42., cu un sistem de fixare a tablelor prezentat în fig. 5.103.

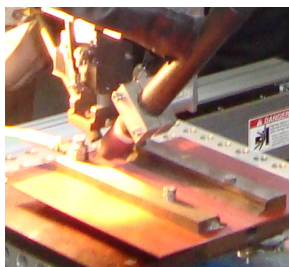


Fig. 5.103. Sistemul de fixare a tablelor [15]

Programul experimental a utilizat cupoane de tablă de 160x100x2mm, decupate mecanic, fără prelucrări speciale ale secțiunii transversale – rostul fiind neprelucrat (fig. 5.104.), varianta utilizată pentru verificarea parametrilor de proces tehnologiilor a fost WIG-laser pulsant (WIG ca proces conducător). Pentru evaluarea posibilității de îmbunătățire a eficienței și productivității tehnologiei de îmbinare prin reducerea timpilor de pregătire a îmbinării, au fost efectuate experimentări atât pe table la care s-a curățat vopseaua sudabilă pe o distanță suficientă (aprox. 15mm pentru fiecare tablă) cât și pe table fără nici o pregătire.

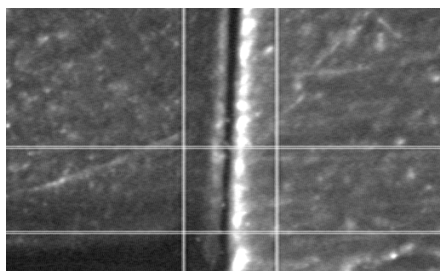


Fig. 5.104. Aspectul rostului îmbinării (tablă cu vopseaua curățată mecanic în zona îmbinării)[15]

Parametrii de proces s-au bazat pe combinația optimă de frecvențe determinată în cadrul programului experimental de optimizare, 23Hz pentru frecvența de repetiție a pulsurilor laser și respectiv 19Hz pentru frecvența procesului WIG, cu variația curentului mediu de sudare între 30 și 36A și a vitezei de sudare între 2.4 și 5.2mm/s.

Constanți au fost pătrați următorii parametri de proces:

- gaz de protecție LASER și WIG Ar99%, 12l/min;
- diametru spot laser 0.8mm;
- putere în puls laser 1400W;
- durată puls laser 3.4ms;
- distanța hibridă 1.0mm;
- rataWIG 50%

Pentru verificarea rezultatelor au fost efectuate următoarele analize și încercări [15]:

- inspecție vizuală a sudurilor pentru evaluarea eventualelor imperfecțiuni de tip crater, lipsă de continuitate, fisuri și / sau incluziuni;
- analize microscopice pentru secțiuni transversale din îmbinările sudate;

- măsurători de microdurate HV5;
- încercări de tracțiune pentru MB în două direcții perpendiculare și respectiv pentru epruvete prelevate din probele sudate;
- încercări de îndoire atât cu rădăcina întinsă cât și comprimată;

Fig. 5.105. și fig. 5.106. prezintă aspectul vizual al îmbinărilor realizate pentru varianta cu curățarea stratului de acoperire din zona rostului îmbinării și respectiv cu îmbinarea sudată a tablelor fără nici o pregătire exceptând degresarea.

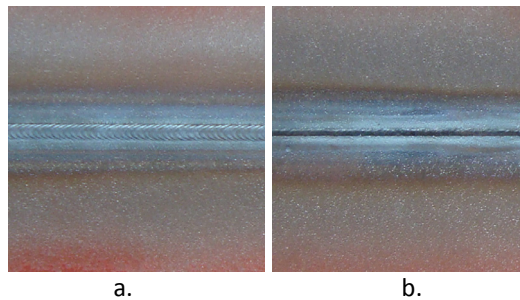


Fig. 5.105. Aspectul vizual al suprafeței (a) și rădăcinii sudurii (specimen cu curățirea stratului de vopsea din zona îmbinării) [15]

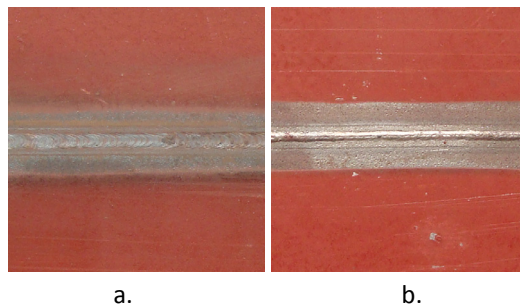


Fig. 5.106. Aspectul vizual al suprafeței (a) și rădăcinii sudurii (specimen fără curățirea stratului de vopsea din zona îmbinării) [15]

Pentru cazul probelor sudate cu curățarea stratului de vopsea din zona rostului s-a putut observa o creștere ușoară a deformațiilor induse termic, dar și o zonă influențată termic mai extinsă comparativ cu probele sudate la care nu a fost îndepărtat stratul de vopsea, cauzate probabil de energia ce nu a fost utilizată pentru topirea și vaporizarea stratului de vopsea sudabilă. La probele sudate din table ne-pregătite, s-au putut observa însă câțiva pori, de dimensiune mică pe suprafața sudurii, dar în același timp, deformațiile induse termic au fost aproape inexistente.

Fig. 5.107. prezintă aspectul macroscopic al unei îmbinări sudate, în secțiune transversală, unde se poate observa pătrunderea totală, fără imperfecțiuni.

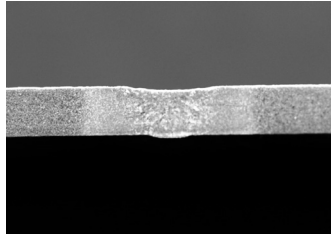


Fig. 5.107. Aspectul macroscopic al îmbinării sudate LmWP [Nital 10%] [15]

Fig. 5.108. – 5.112. prezintă aspectul microscopic ale zonelor îmbinării sudate pentru care s-au putut observa:

- material de bază (MB): ferită + perlită
- zona influențată termic (ZIT): perlită, ferită și ferită aciculară în amestec
- sudură (SUD): perlită, ferită și ferită aciculară în amestec cu o microstructură de turnare dendritică

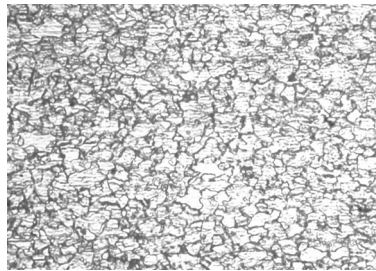


Fig. 5.108. Aspect microscopic M1-MB1 [Nital 2%, 100×] [15]

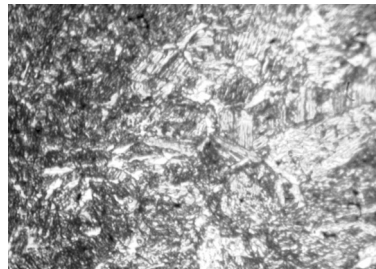


Fig. 5.109. Aspect microscopic M1-ZIT1 M1-MB1 [Nital 2%, 100×] [15]

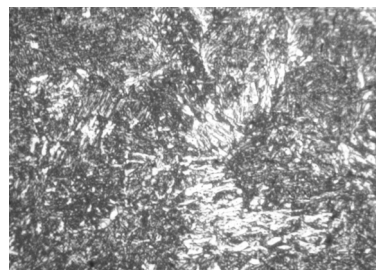


Fig. 5.110. M1-SUD [Nital 2%, 100×] [15]

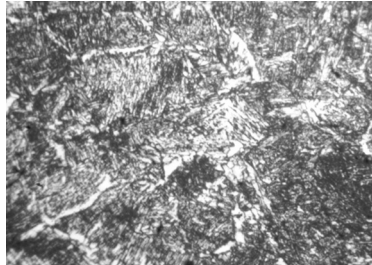


Fig. 5.111. M1-ZIT2 [Nital 2%, 100×] [15]

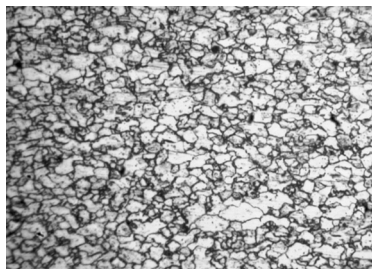


Fig. 5.112. M1-MB2 [Nital 2%, 100×] [15]

Disponerea punctelor pentru evaluarea microdureții HV5 și respectiv distribuția de valori măsurate sunt prezentate în fig. 5.113 și respectiv fig. 5.114.

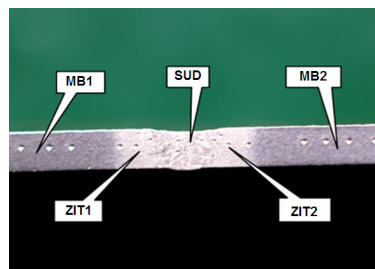


Fig. 5.113. Distribuția punctelor pentru evaluarea microdureții HV5 [15]

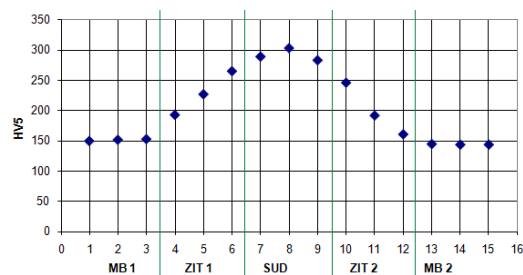


Fig. 5.114. Valorile măsurate ale microdureții HV5 pentru îmbinare LmWP [15]

Din graficul prezentat în fig. 5.114 se poate observa că valoarea microdureții a crescut cu până la 100% în sudură, cvasi-simetric dinspre MB spre centrul îmbinării, situație specifică sudării cu fascicul laser.

Ușoara asimetrie a variației valorilor măsurate pentru microduritate [15] poate fi cauzată fie de o ușoară dezaliniere a planului arcului WIG față de planul fascicul laser – direcție de deplasare ce au putut conduce la o încălzire și răcire asimetrică, fie de o eventuală deviere a arcului datorită asimetriei magnetice a sistemului utilizat și cuplările hibride tranzitorii pe perioada curentului de bază.

La încercările de tracțiune îmbinările s-au rupt doar în materialul de bază, iar la încercarea de îndoire, epruvetele au putut fi îndoite la 180° fără fisuri, atât pentru rădăcina întinsă, cât și pentru epruvetele cu rădăcina comprimată.

Pentru demonstrarea eficienței și productivității noului procedeu de sudare hibrid, a fost efectuată o comparație între rezultatele obținute pentru cazul unor treceri cu cele două procese separat și respectiv cu noul procedeu hibrid, în aceeași configurație a îmbinării, cu aceleași valori pentru parametrii de proces ce au permis o sudură cu pătrundere totală în cazul procedeu hibrid.

În funcție de proces, s-a obținut:

- o topire superficială pentru utilizarea doar a procedeuului WIG cc pulsant (fig. 5.115)
- o pătrundere de aproximativ 20% pentru procedeu laser în regim pulsant (fig. 5.116)

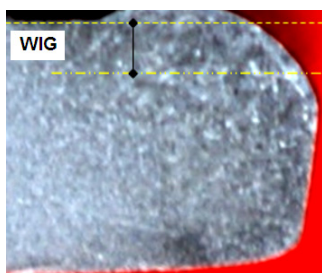


Fig. 5.115. Pătrunderea maximă obținută cu procedeu WIG pulsant (aceeași configurație a rostului, aceeași parametri WIG și viteză mai mică decât cu procedeu LmWP) [15]

Astfel, dacă în situația în care cele două procese sunt utilizate separat, nu s-a putut obține o îmbinare sudată, chiar la viteze reduse, pe când procedeu hibrid a permis realizarea îmbinării cu pătrundere totală, la viteze chiar și de trei ori mai mari, ceea ce demonstrează eficiența crescută a noului procedeu de sudare hibrid.

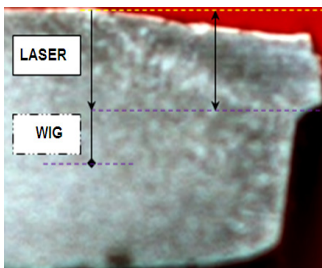


Fig. 5.116. Pătrunderea maximă obținută cu procedeu laser pulsant (aceeași configurație a rostului, aceeași parametri laser și viteză mai mică decât cu procedeu LmWP) [15]

Pe baza rezultatelor obținute în urma programului experimental pentru validarea rezultatelor obținute în cadrul programului experimental de optimizare, se poate concluziona că noul procedeu de sudare hibrid laser-arc reprezintă o variantă

adecvat pentru înlocuirea procedeelor de sudare clasice, utilizate la îmbinarea cap la cap a tablelor subțiri acoperite din oțel de uz general. Mai mult, utilizarea procedurii de sudare hibrid LmWP permite creșterea productivității și eficienței procesului de producție, în condițiile în care s-a putut demonstra atât eficiența energetică a acestuia la viteze de sudare mai mari, posibilitatea reducerii eforturilor pentru pregătirea rostului de sudare (nu este nevoie de curățarea mecanică a stratului de vopsea din zona îmbinării, iar abilitatea de îmbinare în rost deschis este îmbunătățită) cât și a operațiilor post-sudare (evitarea sau reducerea operațiilor de detensionare a îmbinărilor datorită deformațiilor aproape inexistente în cazul procesului hibrid LmWP) [15].

5.5.2. Experimentări exploratorii pe materiale avansate noi

Materialele ce s-au avut în vedere sunt materiale pe care au fost efectuate treceri cu fascicul laser în regim pulsant [21,96,97] și la care experimentările de sudare cu fascicul laser în regim pulsant au relevat faptul că, datorită ne-omogenității specifice acestor materiale precum și datorită existenței unor materiale cu diferențe foarte mari a temperaturilor de topire, direcția de solidificare variază haotic (fig. 5.117.), iar utilizarea preîncălzirii reduce efectul acestui fenomen.



Fig. 5.117. Treceri cu fascicul laser pe MMC nanostructurat (CuAlSi) [21]

Din acest motiv s-a dorit efectuarea unor treceri cu noul proces de sudare hibrid pentru evaluarea stabilității procesului în condițiile în care procesul WIG pulsant încălzește materialul pe o zonă mai mare comparativ cu laserul singur pentru a evita existența unor gradienti de temperatură mari.

Pentru experimentări a fost utilizată o bucsă realizată prin sinterizare Fe-Cu-Si – material cu coeficient de frecare redus și respectiv materiale Al-SiC turnate și matrițate.

Rezultatele trecerilor pe cele trei materiale sunt prezentate în fig. 5.118 – 5.120.

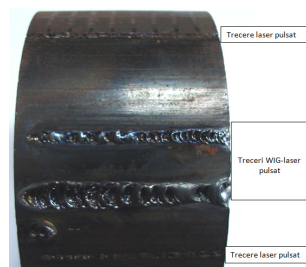


Fig. 5.118. Treceri laser pulsant și WIG-laser pulsant MMC Fe-Cu-Si

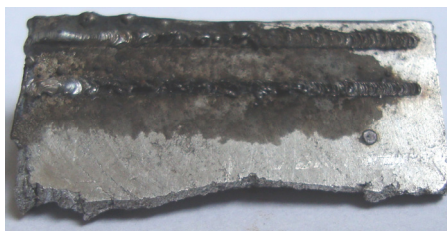


Fig. 5.119. Treckeri WIG-laser pulsat 30%SiC + Al turnat și matrițat




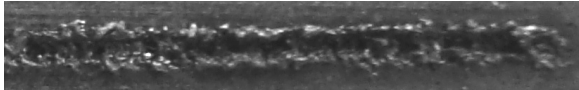
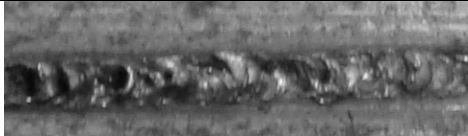
Fig. 5.120. Treckeri WIG-laser pulsat 30%SiC + Al turnat




Din punct de vedere a stabilității procesului, experimentările efectuate au relevat o îmbunătățire, iar utilizarea noului procedeu hibrid permite obținerea unei băi de material topit cu o dinamică mai stabilă în ceea ce privește direcția de solidificare.

Experimentările au folosit atât regimuri mai intense din punct de vedere energetic, dar și variante în care puterea în puls a fasciculului laser a fost relativ redusă pentru a diminua gradientii termici.

Pentru exemplificare și susținerea afirmației că procesul de sudare hibrid LmWP aduce îmbunătățiri în ceea ce privește comportarea la sudare a MMC nanostructurate, sunt prezentate în tabelul 5.19. treceri realizate cu fascicul laser și respectiv cu procesul hibrid pe bușă din Fe-Cu-Si cu observații asupra acestora.

Tabelul 5.19. - Comparație aspect vizual treceri sudate

PROCES	ASPECTUL VIZUAL AL TRECERII	OBSERVAȚII
Laser 1		Regim putere medie relativ redusă. Cratere și solidificare cu acumulare de material lateral axului trecerii
Laser 2		Regim putere medie relativ mare Expulzare material din axul sudurii, crater aproximativ continuu. Solidificare pe marginile trecerii
Laser 1 + preîncălzire		Atenuare parțială a efectului de solidificare pe direcții laterale axului trecerii

PROCES	ASPECTUL VIZUAL AL TRECERII	OBSERVAȚII
WIG-laser pulsat 1		Regim relativ puternic energetic (laser și WIG) Proces instabil la începutul trecerii, cu stabilizare către sfârșit unde s-a obținut o sudură relativ continuă
WIG-laser pulsat 2.1		Reducere a puterii medii a FL și a Iav WIG Sudură aproape continuă la începutul trecerii (60% din lungime), cu mici acumulări locale
WIG-laser pulsat 2.2		Reducere a puterii medii a FL și a Iav WIG. Deși se observă instabilități mai reduse comparativ cu trecerea laser sau laser + preîncălzire la sfârșitul trecerii (40% din lungime)

Parametrii de procesare utilizați:

- Las1: 1200W/3.4ms/23Hz
- Las2: 2400W/2.0/23Hz
- Las3: 1400/3.4/23Hz + preîncălzire
- WIG-laser 1: 1400W/3.4ms/23Hz; 36A/19Hz/50%
- WIG-laser 2: 800W/3.4ms/23Hz; 18A/19Hz/50%

Din tabelul 4.1 se poate observa faptul că la utilizarea procesului LmWP se observă o creștere a stabilității și o reducere a fenomenului de solidificare haotică, fiind obținute și suduri continue pe distanțe mult mai mari (pana la 95% - Fig. 5.120) comparativ cu sudarea cu fascicul laser în regim pulsant, inclusiv dacă se compară cu situația în care s-a utilizat preîncălzirea materialului.

Tehnologii de îmbinare a componentelor executate din astfel de materiale vor putea fi elaborate prin teste multiple prin modificarea aportului energetic a celor două procese și după analiza modificărilor structurale datorate procesării.

Pe baza observațiilor din timpul experimentărilor efectuate în timpul procesării, experimentele efectuate au relevat faptul că noul proces hibrid de sudare poate fi o metodă de îmbinare a materialelor testate, fiind necesară optimizarea parametrilor de proces. În același timp se poate testa o variantă de sudare în puncte cu frecvențe de repetiție mici pentru obținerea unor suduri continue de calitate.

6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Dezvoltarea unor noi tehnologii și procese de prelucrare, îmbunătățirea celor existente sau dezvoltarea unor noi echipamente de prelucrare și / sau componente pentru cele sunt câteva din direcțiile principale de cercetare-dezvoltare în domeniul fabricației, alături de optimizarea tehnologiilor de prelucrare existente, focalizate către îmbunătățirea eficienței liniilor de producție și a calității produselor realizate de acestea.

Noul procedeu de sudare hibrid LmWP, ce combină utilizarea procedurii de sudare cu fascicul laser în regim pulsant cu procedeul de sudare WIG pulsant, propus, dezvoltat și optimizat în cadrul stagiului doctoral, se înscrie în aceste tendințe ce vizează domenii de vârf în cercetarea internațională, respectiv dezvoltarea și optimizarea proceselor de îmbinare, focalizat pe dezvoltarea de aplicații de sudare hibridă laser-arc în domeniul micro-prelucrării.

6.1. Concluzii

Conform obiectivului principal, stabilit pentru cercetarea doctorală desfășurată în prezenta teză, a fost propus, dezvoltat și optimizat un nou procedeu de sudare hibrid bazat pe combinarea și cuplarea sudării cu fascicul laser în regim pulsant și respectiv sudarea (micro)WIG pulsantă, un procedeu ce a permis, în urma programelor experimentale derulate, atenuarea până la zero a variației de pătrundere specifică sudării cu fascicul laser în regim pulsant, în condiții de productivitate și eficiență crescută comparativ cu procedeele componente, precum și cu o reducere semnificativă a energiei liniare introduse în materialele procesate.

Sistemul experimental conceput și realizat, la care au fost concepute, realizate și optimizate dispozitive care să permită obținerea unor capete hibride LASER-(micro)WIG, a fost corespunzător pentru derularea în bune condiții a programelor experimentale necesare pentru studierea, caracterizarea și optimizarea noului proces de sudare hibrid, precum și dezvoltarea de tehnologii de îmbinare cu procedeul LmWP. Adăugarea la sistemul experimental a două sisteme de achiziție video, combinată cu termografia în infraroșu a permis studierea dinamicii noului proces de sudare hibrid LmWP, precum și caracterizarea acestuia.

Principala caracteristică pusă în evidență pentru noul proces de sudare hibrid,, din punct de vedere fenomenologic, o reprezintă situațiile tranzitorii de cuplare dintre procesul laser și procesul (micro)WIG, fenomen ce influențează atât stabilitatea procesului cât și caracterul hibrid al acestuia, dar și rezultatul procesării (de ex. caracteristicile geometrice ale sudurii).

Dinamica, modul de cuplare și influența parametrilor de proces WIG și specifici procesului hibrid au fost evaluați atât pentru varianta (micro)WIG-laser cât și pentru laser-(micro)WIG.

Datele acumulate în cadrul programului experimental inițial au permis modelarea fenomenologică a procesului de sudare hibrid LmWP, dar și determinarea unor modele matematice experimentale privind influența parametrilor de proces asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii.

Deoarece varianta (micro)WIG-laser pulsant a prezentat atenuarea cea mai pregnantă în ceea ce privește variația pătrunderii, specifice sudării cu fascicul laser în regim pulsant, datorită formei geometrice a secțiunii transversale a sudurii, a fost selectată pentru dezvoltare și optimizare. Varianta laser-(micro)WIG pulsant poate fi dezvoltată și optimizată pentru alte tipuri de aplicații, la care nu este foarte importantă obținerea unei sudurii cu variații de pătrundere minime, datorită avantajelor oferite în ceea ce privește stabilitatea, aspectul vizual al suprafeței sudurii, pătrunderea, etc.

Pe lângă varianta recomandabil de utilizat pentru atenuarea variației de pătrundere, domeniul de frecvențe a procesului WIG selectat pentru dezvoltare și optimizare a fost determinat a fi în apropierea valorilor utilizate pentru frecvența de repetiție a pulsurilor laser, utilizată în cadrul programului experimental.

Modelarea fenomenologică a procedurii LmWP a permis identificarea limitelor de control a procesului, urmate de elaborarea unei soluții tehnice pentru îmbunătățirea funcțională a sistemului de experimentare conceput și realizat, în sensul reducerii erorilor experimentale în ceea ce privește rigiditatea dispozitivului hibrid și controlului parametrilor geometrici hibridi (unghiul FL – WIG și respectiv distanța hibridă).

Metodologia elaborată și aplicată pentru optimizarea procesului LmWP, bazată pe o strategie de tip Box-Wilson, a permis, cu utilizarea unui volum relativ redus de experimentări, stabilirea direcțiilor de optimizare corelate cu principalele obiective avute în vedere – atenuarea variației de pătrundere, abilitatea de îmbinare în rost deschis și stabilitatea procesului de sudare hibrid LmWP.

Importanța influențelor fenomenelor tranzitorii asupra rezultatului procesării a fost pusă în evidență și prin determinarea unor combinații de frecvențe favorabile (23Hz pentru frecvența de repetiție a pulsurilor laser și respectiv 19Hz pentru frecvența procesului WIG).

Importanța controlului fenomenelor tranzitorii a determinat conceperea și elaborarea a două metode (și a documentației de elaborare a unui modul electronic) pentru controlul sincronizării și al defazajului frecvențelor celor două procese, în sensul optimizării funcționale a procesului hibrid LmWP.

În urma programelor experimentale de optimizare au fost determinate modelele de ordinul doi de variație a FO selectate, reprezentarea grafică a suprafețelor de răspuns permite determinarea extremelor acestora. Suprafețele de răspuns au permis identificarea unor zone (combinațiile de parametri: 33-34A pentru curentul mediu de sudare și 0.9-1.0mm pentru distanța hibridă) în care majoritatea FO avute în vedere ating un extrem.

Rezultatele obținute în urma cercetărilor din cadrul stagiului doctoral, au fost validate prin derularea unor experimentări tehnologice de sudare, cu noul proces hibrid, pentru îmbinarea cap la cap a unor tablelor subțiri acoperite din oțel de uz general. Rezultatele analizelor și încercărilor efectuate asupra probelor sudate relevat faptul că noul procedeu de sudare este adecvat în ceea ce privește înlocuirea, în producție, a procedurilor clasice de îmbinare cu arc electric, în condiții de eficiență și productivitate crescute comparativ cu procedeele componente.

Experimentările exploratorii pe materialele avansate noi (MMC) au relevat îmbunătățiri în ceea ce privește comportarea la prelucrare, fenomenele de solidificare haotică a băii de material topit, cauzat de ne-omogenitatea și anizotropia specifică, fiind atenuate.

Studiile și experimentările efectuate în cadrul stagiului doctoral constituie confirmarea faptului că noul procedeu de sudare hibrid este adecvat în ceea ce privește posibilitatea aplicării acestuia la nivel industrial, corelată cu interesul

deosebit în ceea ce privește dezvoltarea de aplicații industriale ale procedeelor de sudare hibride laser-arc, interes demonstrat de studiul documentar. Domeniile industriale principale pentru care noul proces de sudare hibrid ar fi adecvat sunt: industria auto, industria materialului rulant, industria de tubulatură, construcțiilor de mașini, micro-prelucrări metalice.

6.2. Contribuții personale și elemente de originalitate

Teza de doctorat are o structură ponderată a rezultatelor obținute în urma studiului documentar, dezvoltărilor teoretice și cercetărilor experimentale într-un domeniu de actualitate – sudarea hibridă laser-arc. Studiul documentar a inclus peste 100 de titluri, majoritatea din ultimii 10 ani. Cercetările experimentale au vizat caracterizarea noului procedeu de sudare hibrid propus, dezvoltarea și optimizarea acestuia, precum și stabilirea principalelor domenii de aplicare industrială pentru care procedeu de sudare hibrid LmWP este adecvat. Dezvoltările teoretice au constat în modelări fenomenologice pentru procedeele de sudare hibride laser-arc, în special pentru noul procedeu de sudare hibrid LmWP precum și de modelări matematice empirice ale influențelor parametrilor de proces asupra caracteristicilor geometrice ale rezultatului procesării.

Principalele contribuții ale doctorandului au fost:

- realizarea unui studiu de sinteză cu privire la stadiul actual și a direcțiilor actuale de cercetare legate de procedeele de sudare hibride laser-arc;
- model fenomenologic bazat pe bilanțul puterilor / energiilor din sistem pentru sudarea hibridă laser-MIG care să explice efectele sinergice specifice;
- propunerea unui nou procedeu de sudare hibrid bazat pe combinarea și cuplarea sudării cu fascicul laser în regim pulsant cu sudarea (micro)WIG în pulsuri, procedeu propus pentru brevetare;
- conceperea și realizarea unui sistem experimental și a unor diferite ansamble pentru realizarea unor capete hibride pentru procedeu de sudare hibrid LmWP;
- studiul dinamicii procesului și modelarea fenomenologică LmWP, identificarea principalelor caracteristici care îl diferențiază de procedeele hibride existente;
- caracterizarea procesului hibrid LmWP și selectarea variantei care permite atenuarea variației de pătrundere specifică sudării cu fascicul laser în regim pulsant;
- elaborarea unei metodologii pentru studiul și optimizarea procesului de sudare hibrid LmWP prin combinarea strategiei de experimentare Gauss-Seidl cu Box-Wilson
- determinarea unor modele matematice experimentale privind influența parametrilor procesului (micro)WIG și a parametrilor hibridi asupra caracteristicilor geometrice ale sudurii;
- stabilirea limitelor de control ale procesului LmWP și optimizarea funcțională a procesului prin propunerea a două metode pentru sincronizarea și controlul defazajului frecvențelor celor două procese componente, precum și propunerea unei soluții constructive care să îmbunătățească erorile de reglaj a parametrilor geometrici hibridi;

- elaborarea unei matrici ce include ierarhizarea parametrilor de proces din punct de vedere a importanței acestora asupra unor FO specifice unor aplicații industriale, pentru procedeul hibrid LmWP, varianta (micro)WIG-laser;
- stabilirea direcțiilor de optimizare a variantei (micro)WIG-laser și determinarea FI importanți pentru condițiile experimentale date;
- modelarea statistică și determinarea suprafețelor de răspuns care să permită determinarea extremelor FO studiate pentru determinarea optimului;
- determinarea coeficienților de regresie pentru ecuațiile de variație a FO studiate pentru optimizarea procesului;
- validarea rezultatelor obținute prin experimentări tehnologice de sudare cu procedeul de sudare hibrid LmWP pentru îmbinarea cap la cap a tablelor subțiri acoperite din oțel de uz general ca alternativă la procedeele clasice de îmbinare cu arc electric;
- demonstrarea adecvării procesului de sudare hibrid LmWP prin demonstrarea eficienței și productivității acestuia, în condițiile unor energii liniare introduse în materialele de bază reduse;
- demonstrarea îmbunătățirii comportării la sudare a unor materiale avansate noi la utilizarea noului procedeu de sudare hibrid LmWP prin compararea cu rezultatele obținute la prelucrarea cu fascicul laser în regim pulsant.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Rezultatele obținute în cadrul prezentei teze de doctorat au relevat ca direcții viitoare de cercetare – dezvoltare următoarele:

- dezvoltarea de tehnologii de îmbinare pentru tipuri de materiale clasice și / sau îmbinări disimilare;
- studiul comportării la sudare cu procedeul hibrid LmWP a materialelor avansate noi: materiale metalice compozite micro și nanostructurate, structuri sandwich, spume metalice, etc.;
- realizarea sistemului de sincronizare și control al defazajului dintre frecvențele celor două procese și modelarea matematică a fenomenelor de interacțiune / cuplare pulsate;
- dezvoltarea variantei laser-(micro)WIG pulsant pentru aplicații specifice;
- studierea combinării celor două procese la energii relativ ridicate prin utilizarea laserilor de putere relativ ridicată cu funcționare în regim pulsant;
- evaluarea noului procedeu hibrid în situația utilizării unor forme de puls variate, similare și diferite.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Abe, N. and Hayashi, M., *Trends in laser arc combination welding methods*, *Welding International* **16**(2), 94–98 (2002) [doi:10.1080/09507110209549498].
- [2] Al-Kazzaz, H., Medraj, M., Cao, X., and Jahazi, M., *Nd:YAG laser welding of aerospace grade ZE41A magnesium alloy: Modeling and experimental investigations*, *Materials Chemistry and Physics* **109**(1), 61–76 (2008) [doi:10.1016/j.matchemphys.2007.10.039].
- [3] Amara, E. H. and Bendib, A., *Modelling of vapour flow in deep penetration laser welding*, *Journal of Physics D: Applied Physics* **35**(3), 272–280 (2002) [doi:10.1088/0022-3727/35/3/317].
- [4] Amara, E. H. and Fabbro, R., *Modelling of gas jet effect on the melt pool movements during deep penetration laser welding*, *Journal of Physics D: Applied Physics* **41**(5), 055503 (2008) [doi:10.1088/0022-3727/41/5/055503].
- [5] Asai, S., Minami, K., Shiihara, K., Makino, Y., Kanehara, T., and Shibui, M., *YAG-TIG Hybrid Welding Process for Coil Cover Plate of Stainless Steel*, IIW Doc No XII-1855-05, The International Institute of Welding (2005).
- [6] Asai, S., Ogawa, T., Ishizaki, Y., Minemura, T., Minami, H., and Miyazaki, S., *Application of Plasma-MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joint between Copper and Steel*, IIW Doc. No. XII-1972-09, The International Institute of Welding (2005).
- [7] Beyer, E., *Schweißen mit Laser: Grundlagen*, Springer-Verlag, Ed., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1997).
- [8] Beyer, E., Dilthey, U., Imhoff, R., Maier, C., Neuenhahn, J., and Behler, K., *New aspects in laser welding with an increase efficiency*, in *Proceedings of ICALEO*, Orlando, USA (1994).
- [9] Bi, G., Schürmann, B., Gasser, A., Wissenbach, K., and Poprawe, R., *Development and qualification of a novel laser-cladding head with integrated sensors*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **47**(3-4), 555–561 (2007) [doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.05.010].
- [10] Bidi, L., Mattei, S., Cicala, E., Andrzejewski, H., Le Masson, P., and Schroeder, J., *The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modelling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes*, *Optics & Laser Technology* **43**(3), 537–545, Elsevier (2011) [doi:10.1016/j.optlastec.2010.07.011].

- [11] Braun, R., *Nd:YAG laser butt welding of AA6013 using silicon and magnesium containing filler powders*, Materials Science and Engineering: A **426**(1-2), 250–262 (2006) [doi:10.1016/j.msea.2006.04.033].
- [12] **Bîrdeanu, A. – V.**, Ciucă, C., and Puicea, A., *Pulsed laser welding of dissimilar thermoplastic materials*, in Proc. of. The ACADEMY OF TECHNICAL SCIENCES IN ROMANIA INTERNATIONAL CONFERENCE "ASTR DAYS – 2011" , the VIth Edition, Timișoara (2011).
- [13] **Bîrdeanu, A. – V.**, Ilie, M., Stoica, V., and Verbițchi, V., *Integrated experimental system for evaluating polymers laser weldability, real-time monitoring and control*, in Proceedings of Modern Technologies, Quality and Innovation-ModTech International Conference, pp. 89–92, ModTech Publishing House, Chișinău (2011).
- [14] **Bîrdeanu, A.-V.** and Savu, S., *Stadiul actual și tendințe în dezvoltarea procedurii de sudare hibrid laser-arc*, in *Lucrările Conferinței Internaționale a ASR "Managementul Calității în Domeniul Sudării, în Contextul Aderării României la Uniunea Europeană,"* pp. 100–114, Editura Sudura, Timișoara, 2006, Brașov, Romania (2006).
- [15] **Bîrdeanu, A.-V.**, Ciucă, C., and Iacob, M., *Pulsed LASER-TIG hybrid welding of coated unalloyed steel thin sheets*, BID - ISIM Welding & Material Testing(2), 31–34 (2011).
- [16] **Bîrdeanu, A.-V., Ciucă, C.**, and Puicea, A., *Pulsed LASER-(micro)TIG hybrid welding: Process characteristics*, Journal of Materials Processing Technology **212**(4), 890–902 (2012) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.11.014].
- [17] **Bîrdeanu, V.**, *Pulsed laser micro-welding in industrial applications*, SUDURA(1), 12–19 (2008).
- [18] **Bîrdeanu, V.**, Dehelean, D., Harjan, I., and Ciucă, C., *Technological system for studying the pulsed LASER-microTIG hybrid welding process dynamics*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași **LVI**(2a), 49–58 (2010).
- [19] **Bîrdeanu, V.**, Dehelean, D., and Savu, S., *Laser – TIG hybrid micro-welding process developments*, BID - ISIM Welding & Material Testing(4), 37–42 (2009).
- [20] **Bîrdeanu, V.**, Porojan, S., and Sandu, L., *Heterogeneous pulsed laser joints for applications in combined dentures technology*, in Proc. of The 4th International Conference – Innovative technologies for joining advanced materials (2010).
- [21] **Bîrdeanu, V.**, Savu, S., Dehelean, D., and Savu, D., *Statistical approach of Nd:YAG laser welding of aluminum matrix nanostructured composite material for MEMS technology*, in LASERAP' 6: Séminaire européen recherche -

- industrie: la maison du Beuvray 1-5 octobre 2007, Ed. Politehnica, 2007, Ed. (2007).
- [22] CHEN, S.-hai, LI, L.-qun, CHEN, Y.-bin, and LIU, D.-jian, *Si diffusion behavior during laser welding-brazing of Al alloy and Ti alloy with Al-12Si filler wire*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China **20**(1), 64–70 (2010) [doi:10.1016/S1003-6326(09)60098-4].
- [23] Campana, G., Fortunato, a, Ascari, a, Tani, G., and Tomesani, L., *The influence of arc transfer mode in hybrid laser-mig welding*, Journal of Materials Processing Technology **191**(1-3), 111–113 (2007) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.001].
- [24] Canning, J., *Fibre lasers and related technologies*, Optics and Lasers in Engineering **44**(7), 647–676 (2006) [doi:10.1016/j.optlaseng.2005.02.008].
- [25] Casalino, G., *Statistical analysis of MIG-laser CO2 hybrid welding of Al-Mg alloy*, Journal of Materials Processing Technology **191**(1-3), 106–110 (2007) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.065].
- [26] Chen, Y., Li, L., Fang, J., Feng, X., and Wu, L., *Temperature Field Simulation of Laser-TIG Hybrid Welding*, China Welding(12(1)), 62–66 (2003).
- [27] Chen, Y., Li, L., Fang, J., and Feng, X., *Numerical Analysis of Energy Effect in Laser-TIG Hybrid Welding*, Journal of Materials Sciences & Technology **19**(Suppl. 1), 23–26 (2003).
- [28] Cho, Y. T., Cho, W. I., and Na, S. J., *Numerical analysis of hybrid plasma generated by Nd:YAG laser and gas tungsten arc*, Optics & Laser Technology **43**(3), 711–720 (2011) [doi:10.1016/j.optlastec.2010.09.013].
- [29] Chu, W.-H. and Tung, P.-C., *Development of an automatic arc welding system using a sliding mode control*, International Journal of Machine Tools and Manufacture **45**(7-8), 933–939 (2005) [doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.10.012].
- [30] Cicala, E., *La méthode des plans d'expériences appliquée aux procédés laser étude de cas: le soudage laser des alliages d'aluminium*, in LASERAP' 6: Séminaire européen recherche - industrie: la maison du Beuvray 1-5 octobre 2007, Ed. Politehnica, 2007, Ed. (2007).
- [31] Cicală, E. F., *Metoda experimentelor factoriale: proiectarea experimentelor, modelare, optimizare*, p. 320, Editura Politehnica, Timișoara (2005).
- [32] Denney, P., *Hybrid Laser Welding for Fabrication of Ship Structural Components*, Welding Journal **81**(9), 58 (2002).

- [33] Dharmendra, C., Rao, K. P., Wilden, J., and Reich, S., *Study on laser welding–brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler*, *Materials Science and Engineering: A* **528**(3), 1497–1503 (2011) [doi:10.1016/j.msea.2010.10.050].
- [34] Diltthey, U. and Stein, L., *Welding and joining – Key technologies for the future*, *BID - ISIM Welding & Material Testing*(2), 13–24 (2006).
- [35] Dongxia, Y., Xiaoyan, L., Dingyong, H., Zuoren, N., and Hui, H., *Optimization of weld bead geometry in laser welding with filler wire process using Taguchi’s approach*, *Optics & Laser Technology* **44**(7), 2020–2025 (2012) [doi:10.1016/j.optlastec.2012.03.033].
- [36] Dowden, J., *The Theory of Laser Materials Processing*, Dowden, J., Ed., Springer Netherlands, Dordrecht (2009) [doi:10.1007/978-1-4020-9340-1].
- [37] Ducharme, R. J., Kapadia, P. D., Dowden, J. M., Richardson, I. M., and Thornton, M. F., *A mathematical model of TIG electric arcs operating in the hyperbaric range*, *Journal of Physics D: Applied Physics* **29**(10), 2650–2658 (1996) [doi:10.1088/0022-3727/29/10/016].
- [38] Ducharme, R., Kapadia, P., Dowden, J., Thornton, M., and Richardson, I., *A mathematical model of the arc in electric arc welding including shielding gas flow and cathode spot location*, *Journal of Physics D: Applied Physics* **28**(9), 1840–1850 (1995) [doi:10.1088/0022-3727/28/9/012].
- [39] Fabbro, R., Amara, E.-H., Boudjemai, S., and Doumaz, D., *Dynamic Approach Of The Keyhole And Melt Pool Behavior For Deep Penetration Nd-Yag Laser Welding*, in *AIP Conference Proceedings* **1047**, pp. 18–24, AIP (2008) [doi:10.1063/1.2999933].
- [40] Fan, H. G. and Kovacevic, R., *A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool*, *Journal of Physics D: Applied Physics* **37**(18), 2531–2544 (2004) [doi:10.1088/0022-3727/37/18/009].
- [41] Fan, H. G., Na, S.-J., and Shi, Y. W., *Mathematical model of arc in pulsed current gas tungsten arc welding*, *Journal of Physics D: Applied Physics* **30**(1), 94–102 (1997) [doi:10.1088/0022-3727/30/1/012].
- [42] Frewin, M. R. and Scott, D. A., *Finite Element Model of Pulsed Laser Welding*, *WELDING RESEARCH SUPPLEMENT*, AWS(2), 15-s-22-s (1999).
- [43] Gao, M., Zeng, X., Hu, Q., and Yan, J., *Laser-TIG hybrid welding of ultra-fine grained steel*, *Journal of Materials Processing Technology* **209**(2), 785–791 (2009) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.02.062].

- [44] Gao, Z., Wu, Y., and Huang, J., *Analysis of weld pool dynamic during stationary laser-MIG hybrid welding*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **44**(9-10), 870–879 (2009) [doi:10.1007/s00170-008-1896-4].
- [45] Gatzen, M., Tang, Z., and Vollertsen, F., *Effect of electromagnetic Stirring on the Element Distribution in Laser Beam Welding of Aluminium with Filler Wire*, Physics Procedia **12**, 56–65 (2011) [doi:10.1016/j.phpro.2011.03.008].
- [46] Geiger, M., Leitz, K.-H., Koch, H., and Otto, A., *A 3D transient model of keyhole and melt pool dynamics in laser beam welding applied to the joining of zinc coated sheets*, Production Engineering **3**(2), 127–136 (2009) [doi:10.1007/s11740-008-0148-7].
- [47] Geoff, B., *Recent Developments in Laser-arc Hybrid Welding for Ship Hull Fabrication and Pipelines*, IIW Doc No IV-880-05, The International Institute of Welding (2005).
- [48] Graf, T. and Staufer, H., *Laser-hybrid welding drives VW improvements*, Welding Journal **82**, 42–48 (2003).
- [49] Greses, J., Hilton, P. A., Barlow, C. Y., and Steen, W. M., *Plume attenuation under high power Nd:yttrium-aluminum-garnet laser welding*, Journal of Laser Applications **16**(1), 9 (2004) [doi:10.2351/1.1642636].
- [50] Haidar, J., *A theoretical model for gas metal arc welding and gas tungsten arc welding. I.*, Journal of Applied Physics **84**(7), 3518 (1998) [doi:10.1063/1.368527].
- [51] Hansen, F. and Duley, W. W., *Attenuation of laser radiation by particles during laser materials processing*, Journal of Laser Applications(6(3)), 137–143 (1994).
- [52] Hu, B. and den Ouden, G., *Laser induced stabilisation of the welding arc*, Science and Technology of Welding and Joining **10**(1), 76–81 (2005) [doi:10.1179/174329305X29537].
- [53] Hu, J. and Tsai, H. L., *Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc*, International Journal of Heat and Mass Transfer **50**(5-6), 833–846 (2007) [doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025].
- [54] Hu, J. and Tsai, H. L., *Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part II: The metal*, International Journal of Heat and Mass Transfer **50**(5-6), 808–820 (2007) [doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.026].
- [55] Ilie, M., Cicala, E., Grevey, D., Mattei, S., and Stoica, V., *Diode laser welding of ABS: Experiments and process modeling*, Optics & Laser Technology **41**(5), 608–614 (2009) [doi:10.1016/j.optlastec.2008.10.005].

- [56] Jahn, A., Brenner, B., Winderlich, B., Zwick, A., and Imhoff, R., *Laser Hybrid Welding of Cyclic Loaded Structural Components Made of HSLA S1100QL*, IIW Doc No IV-886-05, The International Institute of Welding (2005).
- [57] Kaplan, A., *A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile*, Journal of Physics D: Applied Physics **27**(9), 1805–1814 (1994) [doi:10.1088/0022-3727/27/9/002].
- [58] Kaplan, A. F. H., *Model of the absorption variation during pulsed laser heating applied to welding of electronic Au/Ni-coated Cu-leadframes*, Applied Surface Science **241**(3-4), 362–370 (2005) [doi:10.1016/j.apsusc.2004.07.035].
- [59] Kaplan, A. F. H., Mizutani, M., Katayama, S., and Matsunawa, A., *Unbounded keyhole collapse and bubble formation during pulsed laser interaction with liquid zinc*, Journal of Physics D: Applied Physics **35**(11), 1218–1228 (2002) [doi:10.1088/0022-3727/35/11/319].
- [60] Katayama, S., Kawahito, Y., and Mizutani, M., *Understanding of Laser and Hybrid Welding Phenomena*, IIW Doc No IV-943-07, The International Institute of Welding (2007).
- [61] Katayama, S., Kawahito, Y., and Mizutani, M., *Understanding of Laser and Hybrid Welding Phenomena*, Materials Science Forum **580-582**, 535–538 (2008) [doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.580-582.535].
- [62] Katayama, S., Naito, Y., Uchiumi, S., and Mizutani, M., *Porosity Preventive Conditions and Mechanisms in Hybrid Welding with YAG Laser and TIG/MIG Arc*, IIW Doc No XII-1852-05, pp. 1–10, The International Institute of Welding (2005).
- [63] Katayama, S., Uchiumi, S., Mizutani, M., Wang, J., and Fujii, K., *Penetration and porosity prevention mechanism in YAG laser-MIG hybrid welding*, Welding International **21**(1), 25–31 (2007) [doi:10.1533/wint.2007.3680].
- [64] Kawai, Y., Iwami, H., Baba, N., and Ogawa, Y., *Penetration and Metal Transfer in YAG Laser - MAG Hybrid Welding of Thick Mild Steel*, IIW Doc No XII-1849-05, The International Institute of Welding (2005).
- [65] Kong, F. and Kovacevic, R., *3D finite element modeling of the thermally induced residual stress in the hybrid laser/arc welding of lap joint*, Journal of Materials Processing Technology **210**(6-7), 941–950, Elsevier B.V. (2010) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.02.006].
- [66] Kong, F., Ma, J., and Kovacevic, R., *Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process*, Journal of Materials Processing Technology **211**(6), 1102–1111, Elsevier B.V. (2011) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.01.012].

- [67] Krivtsun, I. V., Khaskin, V. Y., Zatserkovny, A. S., and Bernatsky, A. V., *Application of Diode and CO₂ Lasers in Laser-Plasma Welding of Thin Sheet Aluminum Alloys*, BID - ISIM Welding & Material Testing(3), 47–51 (2009).
- [68] Lacroix, D., Jeandel, G., and Boudot, C., *Solution of the radiative transfer equation in an absorbing and scattering Nd:YAG laser-induced plume*, Journal of Applied Physics **84**(5), 2443 (1998) [doi:10.1063/1.368405].
- [69] Lancaster, J. ., *The physics of welding*, Physics in Technology **15**(2), 73–79 (1984) [doi:10.1088/0305-4624/15/2/I05].
- [70] Lancaster, J. F., *The Physics of welding*, 2nd ed., Lancaster, J. F., Ed., p. 340, Pergamon (1986).
- [71] Liu, L. and Qi, X., *Effects of copper addition on microstructure and strength of the hybrid laser-TIG welded joints between magnesium alloy and mild steel*, Journal of Materials Science **44**(21), 5725–5731 (2009) [doi:10.1007/s10853-009-3797-9].
- [72] Liu, L. and Zhao, X., *Study on the weld joint of Mg alloy and steel by laser-GTA hybrid welding*, Materials Characterization **59**(9), 1279–1284 (2008) [doi:10.1016/j.matchar.2007.10.012].
- [73] Liu, L., Liu, X., and Liu, S., *Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer*, Scripta Materialia **55**(4), 383–386 (2006) [doi:10.1016/j.scriptamat.2006.04.025].
- [74] Liu, L.-M., Wang, S.-X., and Zhu, M.-L., *Study on TIG welding of dissimilar Mg alloy and Cu with Fe as interlayer*, Science and Technology of Welding and Joining **11**(5), 523–525 (2006) [doi:10.1179/174329306X122794].
- [75] Mackwood, A. P. and Crafer, R. C., *Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review*, Optics & Laser Technology **37**(2), 99–115 (2005) [doi:10.1016/j.optlastec.2004.02.017].
- [76] Middeldorf, K. and Lehmann, M., *Innovation for Companies Research Strategy of the DVS Research Organisation*, IIW WG Regional activities presentation report, The International Institute of Welding, Québec City, Canada (2006).
- [77] Mingareev, I., Weirauch, F., Olowinsky, A., Shah, L., Kadwani, P., and Richardson, M., *Welding of polymers using a 2 μ m thulium fiber laser*, Optics & Laser Technology (2012) [doi:10.1016/j.optlastec.2012.03.020].
- [78] Murariu, A. C., **Bîrdeanu, A.-V.**, Cojocaru, R., Safta, V. I., Dehelean, D., Boțilă, L., and Ciucă, C., *Application of Thermography in Materials Science and Engineering*, in Infrared Thermography, Prakash, R. V., Ed., pp. 27–52, InTech (2012) [doi:10.5772/1353].

- [79] Naito, Y. and Mizutani, M., *Observation of Keyhole Behavior and Melt Flows during Laser-Arc Hybrid Welding (1005)*, in Proceedings, 22nd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), Jacksonville, FL, October 13-16, 2003 (2003).
- [80] Naito, Y., Uchiumi, S., and Mizutani, M., *Laser-Arc Hybrid Welding Phenomena of Aluminum Alloy or Steel Laser-Arc Hybrid Welding Laser-Arc Hybrid Welding Hybrid Welding Phenomena with YAG / TIG or YAG / MIG (MAG)*, 183–192 (2009).
- [81] Ono, M., Shinbo, Y., Yoshitake, A., and Ohmura, M., *Development of Laser-arc Hybrid Welding*, Nkk Technical Review **86**(86), 8–12 (2002).
- [82] Paleocrassas, A. G. and Tu, J. F., *Inherent instability investigation for low speed laser welding of aluminum using a single-mode fiber laser*, Journal of Materials Processing Technology **210**(10), 1411–1418 (2010) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.04.002].
- [83] Pascu, D. R., Pascu, M., **Birdeanu, V.**, and S., D., *Characterization of ceramic microlayers deposited by plasma spraying and remelted by concentrated energy beams*, BID - ISIM Welding & Material Testing(2), 34–44 (2009).
- [84] Pascu, M., Dehelean, D., and **Birdeanu, V.**, *General considerations on form fabrication by welding*, in Proc. of The 2nd International Conference Innovative technologies for joining advanced materials (2008).
- [85] Qi, X. and Song, G., *Interfacial structure of the joints between magnesium alloy and mild steel with nickel as interlayer by hybrid laser-TIG welding*, Materials & Design **31**(1), 605–609, Elsevier Ltd (2010) [doi:10.1016/j.matdes.2009.06.043].
- [86] Qian, Y., Huang, J., Zhang, H., and Wang, G., *Direct rapid high-temperature alloy prototyping by hybrid plasma-laser technology*, Journal of Materials Processing Technology **208**(1-3), 99–104 (2008) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.12.116].
- [87] Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., and Kong, C. J., *Welding with high power fiber lasers – A preliminary study*, Materials & Design **28**(4), 1231–1237 (2007) [doi:10.1016/j.matdes.2006.01.009].
- [88] Rayes, M. E., Walz, C., Sepold, G., *The Influence of Various Hybrid Welding on Bead Geometry*, Welding Journal Supplement **83 (5)**(May), 147-S - 153-S (2004).
- [89] Reisgen, U., Schleser, M., Mokrov, O., and Ahmed, E., *Statistical modeling of laser welding of DP/TRIP steel sheets*, Optics & Laser Technology **44**(1), 92–101, Elsevier (2011) [doi:10.1016/j.optlastec.2011.05.025].

- [90] Reutzel, E., Kelly, S., Martukanitz, R., Bugarewicz, M., and Michaleris, P., *Laser-GMA [MIG/MAG] Hybrid Welding: Process Monitoring and Thermal Modelling*, in Proc 7th Int Conf Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, USA, 16-20 May 2005 (2005).
- [91] Roșu, R., Mitelea, I., and **Birdeanu, V.**, *Researches to the deposition process with laser beam of the biocompatible materials*, in Proc. of The 6th International Conference Structural Integrity of Welded Structures (2008).
- [92] Sandu, L., **Birdeanu, V.**, Bortun, C., Topala, F., and Porojan, S., *Laser Welding Optimizations for Practical Use in Dental Technology*, Timisoara Medical Journal **58**(3-4), 212–217 (2008).
- [93] Sandu, L., **Birdeanu, V.**, Bortun, C., and Topala, F., *Laser welding procedures applied to removable partial dentures frameworks repairs*, European Cells and Materials **11**(Suppl. 2), 29 (2006).
- [94] Sandu, L., **Birdeanu, V.**, Borțun, C., Topală, F., and Porojan, S., *Laser usage for removable partial dentures frameworks repairs*, BID - ISIM Welding & Material Testing(2), 35–39 (2007).
- [95] Sandu, L., **Birdeanu, V.**, Borțun, C., Topală, F., and Porojan, S., *The use of laser to repair the skeleton of partially mobilized prothesis*, in Proc. of The 1st International Conference Innovative technologies for joining advanced materials, Timișoara, Romania, June 7-8, 2007 (2007).
- [96] Savu, D. and **Birdeanu, V.**, *Fumes emission at pulsed laser processing of nano-structured composite materials*, in Proc. of The 1st International Conference Innovative technologies for joining advanced materials, Timișoara, Romania, June 7-8, 2007 (2007).
- [97] Savu, D., Ciupitu, I., **Birdeanu, V.**, and Savu, S., *Laser welding of low friction nanostructured sintered composites: technical and environmental aspects*, International Journal of Microstructure and Materials Properties **5**(2/3), 261 (2010) [doi:10.1504/IJMMP.2010.035944].
- [98] Savu, D., Savu, S., and **Birdeanu, V.**, *Microjoints for micro-electronical applications*, Welding in the World **51**(SPEC. ISS.), 403–410 (2007).
- [99] Shinn, B. W., Farson, D. F., and Denney, P. E., *Control of Weld Bead Shape with the Hybrid Welding Process*, IIW Doc. IV- 879-05, pp. 1–10, The International Institute of Welding, Prague (2005).
- [100] Sierra, G., Peyre, P., Deschaux-Beaume, F., Stuart, D., and Fras, G., *Steel to aluminium key-hole laser welding*, Materials Science and Engineering: A **447**(1-2), 197–208 (2007) [doi:10.1016/j.msea.2006.10.106].

- [101] Song, Y.-A., Park, S., Choi, D., and Jee, H., *3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes*, International Journal of Machine Tools and Manufacture **45**(9), 1057–1062 (2005) [doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.11.021].
- [102] Staufer, H., *Laser hybrid welding and laser brazing at Audi and VW*, IIW Doc. No IV-847-03, The International Institute of Welding (2003).
- [103] Staufer, H., *LaserHybrid Welding and LaserBrazing: State of the Art in Technology and Practice by Examples of Audi A8 and VW-Phaeton*, in The third International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 203–208 (2003).
- [104] Staufer, H., Rührnöbl, M., and Miessbacher, G., *Laser-MIG-process for automotive industry*, Industrial Robot: An International Journal **31**(1), 10, Emerald Group Publishing Limited (2002).
- [105] Steen, W. M. and Eboo, M., *Arc Augmented Laser Welding*, Metal Construction **2**(7), 332–336 (1979).
- [106] Steen, W. M. and Mazumder, J., *Laser Material Processing*, Springer London, London (2010) [doi:10.1007/978-1-84996-062-5].
- [107] Steen, W. M., Dowden, J., Davis, M., and Kapadia, P., *A point and line source model of laser keyhole welding*, Journal of Physics D: Applied Physics **21**(8), 1255–1260 (1988) [doi:10.1088/0022-3727/21/8/002].
- [108] Tani, G., Campana, G., Fortunato, A., and Ascari, A., *The influence of shielding gas in hybrid LASER–MIG welding*, Applied Surface Science **253**(19), 8050–8053 (2007) [doi:10.1016/j.apsusc.2007.02.144].
- [109] Thomy, C., Seefeld, T., and Vollertsen, F., *Hybrid welding of line pipes*, Industrial Laser Solutions, 2003, <<http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-18/issue-9/update/hybrid-welding-of-line-pipes.html>> (1 August 2012).
- [110] Thomy, C., Seefeld, T., and Vollertsen, F., *Laser GMA hybrid welding with various laser systems*, IIW Doc XII-1843-05, The International Institute of Welding (2005).
- [111] Tsubota, S., Ishide, T., Watanabe, M., and Akaba, T., *Laser-Arc Hybrid Welding System for Various 3D Welding - Development of Coaxial Laser Welding Head -*, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review **42**(No. 2), Mitsubishi Heavy Industries, Ltd (2005).
- [112] Tusek, J. and Suban, M., *Hybrid welding with arc and laser beam*, Science and Technology of Welding and Joining **4**(5), 308–311 (1999) [doi:10.1179/136217199101537923].

- [113] Wang, F., Hou, W. K., Hu, S. J., Kannatey-Asibu, E., Schultz, W. W., and Wang, P. C., *Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding*, Journal of Physics D: Applied Physics **36**(9), 1143–1152 (2003) [doi:10.1088/0022-3727/36/9/313].
- [114] Wang, J., Wang, C., Meng, X., Hu, X., Yu, Y., and Yu, S., *Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding*, Optics & Laser Technology **44**(1), 67–70 (2012) [doi:10.1016/j.optlastec.2011.05.020].
- [115] Weigl, M., Albert, F., and Schmidt, M., *Enhancing the Ductility of Laser-Welded Copper-Aluminum Connections by using Adapted Filler Materials*, Physics Procedia **12**, 332–338 (2011) [doi:10.1016/j.phpro.2011.03.141].
- [116] Wieschemann, A., *Entwicklung des Hybrid-und Hydraschweißverfahrens am Beispiel des Schiffbaus*, Aachen: Shaker **82** (2001).
- [117] Wouters, M., *Hybrid Laser-MIG welding: An investigation of geometrical considerations*, pp. 67, ISSN - 1402–1757, Luleå University of Technology (2005).
- [118] Xiong, X., Zhang, H., and Wang, G., *Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling*, Journal of Materials Processing Technology **209**(1), 124–130 (2009) [doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.01.059].
- [119] Xu, G., Hu, J., and Tsai, H. L., *Three-dimensional modeling of arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding*, International Journal of Heat and Mass Transfer **52**(7-8), 1709–1724, Elsevier Ltd (2009) [doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.09.018].
- [120] Xu, P. Q., *Dissimilar welding of WC-Co cemented carbide to Ni₄₂Fe_{50.9}Co₆Mn_{3.5}Nb₃ invar alloy by laser-tungsten inert gas hybrid welding*, Materials & Design **32**(1), 229–237 (2011) [doi:10.1016/j.matdes.2010.06.006].
- [121] Ye, X.-H. and Chen, X., *Three-dimensional modelling of heat transfer and fluid flow in laser full-penetration welding*, Journal of Physics D: Applied Physics **35**(10), 1049–1056 (2002) [doi:10.1088/0022-3727/35/10/313].
- [122] Zhang, C. and Shin, Y. ., *A novel laser-assisted truing and dressing technique for vitrified CBN wheels*, International Journal of Machine Tools and Manufacture **42**(7), 825–835 (2002) [doi:10.1016/S0890-6955(02)00014-7].
- [123] Zhou, J. and Tsai, H. L., *Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding*, International Journal of Heat and Mass Transfer **51**(17-18), 4353–4366 (2008) [doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.011].

- [124] Zhou, J., Tsai, H. L., Wang, P. C., Menassa, R. J., and Marin, S. P., *Modeling of Hybrid Laser-MIG Keyhole Welding Process (1001)*, in Proceedings, 22nd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO), p. 7, Jacksonville, FL, October 13-16, 2003 (2003).

- [125] Zhu, F. L., Tsai, H. L., Marin, S. P., and Wang, P. C., *A comprehensive model on the transport phenomena during gas metal arc welding process*, Progress in Computational Fluid Dynamics, An International Journal **4**(2), 99 (2004) [doi:10.1504/PCFD.2004.003789].