

REZUMAT

al tezei de doctorat cu titlul „**Dezvoltarea procedeului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat**”

Doctorand: Ing.fiz. Aurel – Valentin Bîrdeanu

Conducător științific: Prof.dr.ing. Dorin Dehelean

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.

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 și extinderea aplicabilității acestuia, de ex. la realizarea unor îmbinări disimilare sau la îmbinarea oțelurilor cu granulație ultrafină, prin cercetare focalizată pe înțelegerea și modelarea fenomenelor complexe ce caracterizează procesul de sudare hibrid, pe dezvoltarea și aplicarea unor modele care să permită investigarea influenței parametrilor de proces asupra rezultatelor prelucrării, de ex. pentru determinarea tensiunilor induse termic, dar și pentru dezvoltarea unor modele care să permită anticiparea rezultatelor procesării precum și instrumente pentru controlul acestora.

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, 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 procedeul hibrid compensează / reduce dezavantajele specifice fiecărui procedeu în parte.

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, a fost dezvoltat un nou procedeu de sudare hibrid ce combină utilizarea procedurii de sudare cu fascicul laser în regim pulsant cu procedeul de sudare WIG pulsant, 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 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 procedeeului. Este efectuată o sinteză cu privire la modelarea diferitelor variante ale procedeeului 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 procedeeelor 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 de sudare hibrid LASER-(micro)WIG Pulsant - 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 ansambluri cap hibrid precum și pe cele selectate pentru realizare și utilizare în cadrul programelor experimentale.

Capitolul 4, intitulat **„Procedeul 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 pulsat – varianta cu procedeul WIG pulsat conducător.

Capitolul 5, intitulat **„Dezvoltări și optimizări ale procesului de sudare hibrid LASER-(micro)WIG pulsat”**, 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 pulsate, 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.

Dintre concluzii se amintesc următoarele:

- 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)
- 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
- varianta (micro)WIG-laser pulsat a prezentat atenuarea cea mai pregnantă în ceea ce privește variația pătrunderii, specifice sudării cu fascicul laser în regim pulsat, datorită formei geometrice a secțiunii transversale a sudurii, a fost selectată pentru dezvoltare și optimizare.

Varianta laser-(micro)WIG pulsat 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.

- 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)
- în urma programelor experimentale de optimizare au fost determinate modelele de ordinul doi de variație a funcțiilor obiectiv (FO) selectate, reprezentarea grafică a suprafețelor de răspuns permițând 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 procedeelor 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

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 pulsat 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 procedeul 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.

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 hybrid 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 hybrid 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 hybrid 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