

CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII ÎMBINĂRILOR METALICE SUDATE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul de doctorat Ingineria materialelor

autor ing. Laurențiu Zgripcea

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Teodor HEPUȚ

luna 09 anul 2024

PREFAȚĂ

Îmbinările sudate au un rol decisiv asupra sustenabilității societății noastre fiind prezente începând de la nivel de microprocesoare până la proiecte majore de infrastructură. La nivel mondial, pondere produselor sudate din totalul producției de oțel a depășit deja 45% fapt care arată dinamica crescătoare a acestui sector. Pe lângă creșterea volumică, un accent important se pune pe creșterea calității și durabilității a acestor îmbinări.

Cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat au fost orientate spre implementarea de noi tehnologii în cadrul atelierului de sudura, pe dezvoltarea de produse noi care să confirme cerințele clienților din zona Timișoara.

Domeniul tezei a fost ales în baza experienței de 10 ani de zile ca și inginer sudor internațional, responsabil tehnic cu sudura, atestat ISCIR și participării la proiecte variate în domeniul confecțiilor metalice. Au fost achiziționate utilaje noi pe care au fost efectuate zeci de teste preliminare până la adoptarea la scara industrială a soluțiilor prezentate în această teză.

Teza de doctorat prezintă cercetările experimentale și rezultatele obținute în îmbinarea metalelor disimilare și în îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate prin microaliere. Cercetările și experimentările au fost extinse și la metalele neferoase ca aluminiul și aliajele sale în baza cererilor de la clienții firmelor care m-au susținut în activitatea de producție.

Cercetările experimentale în fază de laborator s-au efectuat în cadrul laboratoarelor Facultății de Inginerie Hunedoara, Facultății de Mecanica Timișoara, Universitatea Politehnica Timișoara, institutului de cercetare ISIM Timișoara iar realizarea practică a subansamblelor în cadrul unor firme din Hunedoara și Timișoara.

Teza de doctorat a fost realizată sub îndrumarea a domnului Prof.dr.ing. Hepuț Teodor, căruia doresc să îi mulțumesc pe această cale pentru sprijinul acordat pe tot parcursul studiilor doctorale. Mulțumesc comisiei de îndrumare pentru ajutorul acordat în cadrul experimentărilor efectuate, prelucrării datelor obținute și a definitivării tezei de doctorat. Sugestiile și discuțiile avute cu membrii comisiei de îndrumare respectiv cu membri departamentului de Inginerie și Management, au condus la îmbunătățirea permanentă a tezei precum și elaborarea articolelor științifice.

De asemenea, mulțumesc și doamnei Prof.dr.ing. Socalici Ana Virginia pentru sprijinul acordat, sfaturile oferite și pentru împărtășirea cunoștințelor didactice și profesionale. Aduc mulțumiri cercetătorilor de la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București pentru sprijinul acordat în analiza probelor experimentale și domnului Șef lucrări dr.ing. Birtok Băneasă Corneliu pentru ajutorul acordat în cadrul Saloanelor Internaționale de Invenție.

Nu în ultimul rând doresc să aduc mulțumiri conducerii Universității Politehnica Timișoara, Facultății de Inginerie Hunedoara și a Departamentului de Inginerie și Management, pentru asigurarea cadrului propice pe toata durata elaborării tezei de doctorat.

Mulțumesc în mod deosebit familiei mele pentru susținerea necondiționată!

CAPITOLUL 1

PLAN DE DESFĂȘURARE A EXPERIMENTĂRILOR ȘI CERCETĂRILOR

În industria constructoare de mașini, îmbinările sudate reprezintă un procent de peste 45% din totalul cantității de oțel folosit. Din acest procent, 80% sunt îmbinări sudate de calitate executate în special robotizat. Este necesară o cercetare continuă în acest domeniu pentru îmbunătățirea tehnologiilor de sudură și creșterea calității îmbinărilor sudate. Cercetările trebuie orientate către întreg lanțul de producție, de la elaborarea de oțeluri de calitate, procesarea acestora prin debitări laser sau prelucrări mecanice, sudura acestora, până la tratamente termice post-sudură.

Obiectivul fundamental al tezei de doctorat constă în identificarea soluțiilor de îmbinare prin sudură a materialelor disimilare, studiul elementelor de microaliere care influențează sudabilitatea, dezvoltarea de soluții privind debitarea și sudarea aluminiului folosind surse laser pulsate și amestecuri noi de gaze.

Pentru îndeplinirea obiectivului fundamental s-au stabilit *obiective specifice*:

- Analiza stadiului actual al surselor de sudură;
- Extinderea domeniilor de sudare ale surselor prin realizarea de sisteme experimentale de sudură în tandem robotizate;
- Realizarea de experimente folosind surse de sudură pulsate pentru îmbunătățirea factorului de forma și a aspectului cordonului de sudură;
- Cercetarea și experimentarea efectelor microalierii cordonului de sudură, realizarea de epruvete și testarea lor în laborator;
- Realizarea îmbinărilor de oțeluri disimilare, oțel carbon mediu aliat cu oțel inoxidabil austenitic;
- Realizarea de analize microscopice, SEM, spectrografice a cordonului de sudură în îmbinările disimilare;
- Realizarea de piese sudate între oțeluri disimilare și testarea acestora în regim industrial;
- Extinderea cercetărilor la cererea clienților și către metalele neferoase (aluminii și aliajele sale), dezvoltarea de noi gaze de protecție, optimizarea tăierii laser în regim pulsant;
- Verificarea industrială a datelor rezultatelor obținute în cadrul experimentărilor în fază de laborator;
- Formularea de concluzii și contribuții originale precum și identificarea direcțiilor de cercetare viitoare referitoare la tematica abordată.

Partea a I-a - ANALIZA STADIULUI ACTUAL AL TEHNOLOGIILOR DE SUDAREA MATERIALELOR METALICE cuprinde două capitole în care se analizează stadiul actual al tehnologiilor de sudare a oțelului și tendințele viitoare de dezvoltare în domeniul sudurii în mediu de gaz protector.

Capitolul 2 – Studiul din literatura de specialitate privind sudarea materialelor metalice prezintă stadiul actual al procesului de sudură la nivel mondial, prezentarea procedurii de sudură în mediu de gaz protector, tipurile de transfer a metalului de la electrod la piesa, influența parametrilor electrici și tehnologici asupra calității îmbinării sudate.

Capitolul 3 - Studiu privind evoluția utilajelor de sudare prezintă cele mai noi tehnologii și surse de sudură în curent pulsant, realizarea de sisteme de sudură în tandem robotizate pentru creșterea calității și productivității procesului de sudură.

Partea a II-a - CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND ÎMBINĂRILE METALICE SUDATE, cuprinde patru capitole și prezintă cercetările proprii efectuate în fază de laborator și de producție cu privire la identificarea soluțiilor de îmbinare a materialelor disimilare, debitarea și sudura materialelor neferoase folosind tehnologia laser.

Capitolul 4 - Cercetări experimentale privind îmbinarea oțelurilor din grupe diferite

prezintă un proiect de îmbinare a oțelului carbon mediu aliat cu un oțel inoxidabil austenitic. Inovația a constat în proiectarea unui capac inoxidabil care să acopere pistonul din mașina de extrudare, în scopul prevenirii coroziunii pistonului în contact cu aluminiul la temperatură și presiuni ridicate. Tehnologia de sudură a fost dezvoltată în cadrul firmei Hydromatic Sistem Timisoara.

Capitolul 5 - Cercetări experimentale privind creșterea rezistenței îmbinărilor sudate a oțelurilor HSLA prezintă o metoda de îmbunătățire a unui parametru mecanic (rezistența la impact) prin microalierea cordonului de sudură. Aplicația practică este la sudura grinzilor tip cheson supuse la șocuri în funcționare ca de exemplu brațele de excavator. În cadrul atelierului de producție au fost realizate teste folosind sârme de sudură cu compoziții diferite, s-au realizat epruvete care au fost încercate în cadrul laboratorului Facultății de Mecanica din cadrul UPT. A fost determinată influența nichelului asupra rezistenței la impact (rezilienței) și s-a trecut la producția industrială după validările testelor de laborator.

Capitolul 6 - Procesarea datelor și analiza rezultatelor obținute prezintă partea de cercetare realizată efectiv în cadrul laboratorului ISIM Timisoara. Au fost elaborate proceduri de prelevare a probelor, stabilite zone (linii) de analiză care să focuseze munca de cercetare în zonele relevante din cordonul de sudură. Au fost făcute analize cu microscopul optic până la mărimi de 1000x, analize spectrometrice de înaltă precizie cu spectrometrul OE750, analize cu microscopul electronic echipat cu EDX de tip Tescan VEGALMU. Rezultatele obținute conduc la îmbunătățirea procesului de sudură, la determinarea optimă a temperaturii de preîncălzire, la alegerea optimă a sârmei de sudură și la evidențierea defectelor în scopul evitării acestora ulterior.

Capitolul 7 – Extinderea rezultatelor experimentale la procesarea termică a unor aliaje neferoase prezintă experimentările industriale efectuate privind calitatea tăierii pieselor din table de aluminiu destinate sudării. Au fost efectuate experimentări folosind tehnologia laserelor pulsate, au fost realizate noi amestecuri de gaze active destinate tăierii aluminiului în colaborare cu firma LINDE. Datele obținute au fost analizate prin metode grafice 3D de tip Matlab. Rezultatele au fost validate industrial și au făcut posibilă creșterea grosimii de tăiere cu 33% concomitent cu reducerea puterii consumate cu 15%.

Capitolul 8 – Concluzii finale. Contribuții originale. Direcții viitoare de cercetare prezintă concluziile finale obținute, contribuțiile originale, modul de implementare în practică a rezultatelor cercetării respectiv a direcțiilor de continuare a cercetărilor.

În partea finală sunt prezentate sursele bibliografice, diseminarea rezultatelor cercetării și anexele.

PARTEA I – ANALIZA STADIULUI ACTUAL AL TEHNOLOGIILOR DE SUDARE A MATERIALELOR METALICE

CAPITOLUL 2

STUDIUL DIN LITERATURA DE SPECIALITATE PRIVIND SUDAREA MATERIALELOR METALICE

În funcție de aportul energetic, procedeele de sudură se clasifică în:

- sudura termoelectrică la care sursa de energie este un arc electric;
- sudura termochimică la care sursa de energie este flacăra sau termitul;
- sudura radiativă la care sursa de energie poate fi fasciculul de electroni sau raza laser;
- sudura mecanizată la care toate operațiile de bază se realizează cu ajutorul roboților de sudură.

În Fig. 1/2.2 prezintă clasificarea procedeelelor de sudare [1/5].

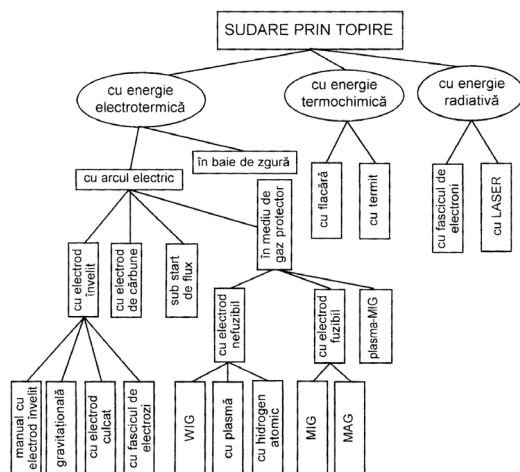


Fig. 1/2.2 Clasificarea procedeelor de sudare

În funcție de modul de execuție, sudura se clasifică în:

- sudarea manuală, toate operațiile se realizează manual;
- sudarea semiautomată, o parte din operații se realizează automat (de exemplu deplasarea pistolului de sudură sau alimentarea cu material de adăus se fac automat);
- sudarea automată, la care toate operațiile se realizează automat (în cazul celulelor de sudură robotizate).

Simbolurile procedeelor de sudură sunt standardizate conform standardului ISO 4063 [1/5] și se folosesc în desenele de execuție.

Pe lângă simbolurile care arată tipul procedurii de sudură, standardul face referire și la parametrii geometrici ai sudurii cum ar fi [2/6], [3/7]:

- tip cordon, liniar sau circular;
- lungime cordon;
- forma rostului de sudură;
- grosimea materialului de bază;
- tipul îmbinării (ex. cap la cap sau de colț).

În tabelul 1/2.1 sunt prezentate simbolurile procedeelor de sudare prin topire, ISO 4063.

Tabelul 1/2.1 Simbolurile procedeelor de sudare prin topire

Proces de sudare	Simbol	Nr. conform ISO 4063	Nr. de ordine
Sudarea cu gaze	G	3	4.6.2.3.02
Sudarea C ₂ H ₂ – O ₂	G	311	-
Sudarea cu arc electric	-	11	-
Sudarea manuală cu arc electric	E	111	4.6.2.4.08
Sudarea cu arc electric cu electrozi tubulari (autoprotectori)	MF	114	4.6.2.4.14
Sudarea sub strat de flux	UP	12	4.6.2.4.22
Sudarea cu gaz protector	SG	-	-
Sudarea metal + gaz de protecție	MSG	13	-
MAG	MAG	135	-
MAG cu sârmă tubulară	MAG	136	-
MIG	MIG	131	4.6.2.4.34
WIG	WIG	141	4.6.2.4.42
W + plasmă	WP	15	-
Sudarea cu fascicul laser	LA	751	4.6.2.5.04
Sudarea fascicul electroni	EB	76	4.6.2.5.08
Sudarea bolțurilor cu arc electric	B	781	-

Procedul cel mai folosit este varianta semi-automată (viteza de avans a sârmei electrod este corelată automat cu curentul de sudură) iar viteza de avans a pistolului este manuală [4/10], [5/11].

CAPITOLUL 3

STUDIUL PRIVIND EVOLUȚIA UTILAJELOR DE SUDARE

Pentru studiul efectelor parametrilor electrici și tehnologici ce influențează procesul de sudură s-a construit un robot de sudură linear (Fig 2/3.8). Rolul acestui robot este de a asigura viteze de sudură ce pot fi măsurate și reglate digital, eliminând astfel efectul sudării manuale unde viteza de sudare nu poate fi controlată și măsurată.

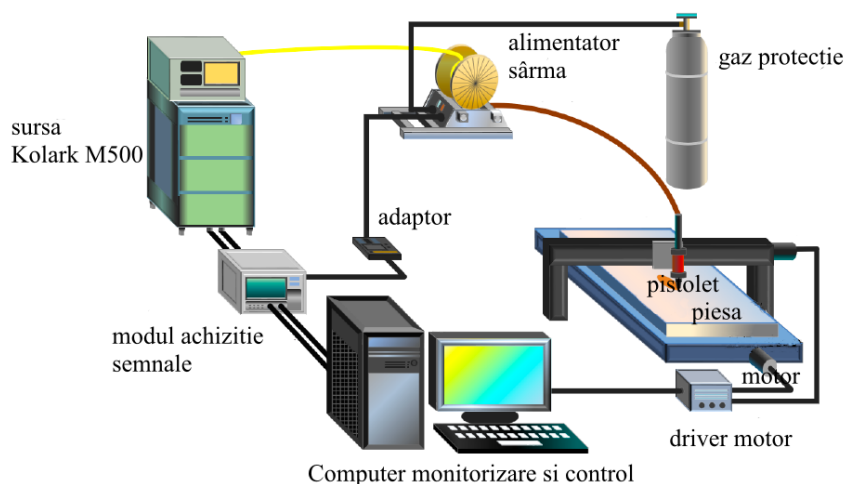


Fig. 2/3.8 Schema instalație sudură experimentală

Ca și componente folosite:

- Sursa de sudură Kolark M500;
- Alimentatorul de sârma automat;
- Modul achiziție semnale analogic USB-205 MULTIFUNCTION, prevăzut cu 8 canale folosit la citirea tensiunii arcului electric U_a , curentului mediu de sudare I_M și a vitezei de avans a sârmei de sudură v_{ss} măsurată în cm/min;
- CNC router WEIHONG 1300, unde pe traversă a fost fixat pistolul de sudare. Vitezele de deplasare ale traversei pot fi comandate prin intermediul computerului de monitorizare-control și sunt în acest caz vitezele de sudură v_s efective măsurate în cm/min.

Creșterea productivității și robotizarea impun creșterea vitezei de sudare, limitată tehnologic unitatea de derulare a sârmei. Soluția în acest caz este creșterea numărului de sârme de sudura care converg simultan în baie metalică.

Din punct de vedere al formării băii metalice, cea mai comună situație este când cele două sârme converg în aceeași baie metalică. În practică, mai ales la sudura multistrat există și posibilitatea de a distanța suficient cele două sârme astfel încât fiecare să își formeze în mod independent propria baie metalică.

Din punct de vedere constructiv, pistoletele de sudură tandem sunt construite cu o diuză de gaz specială, având forma ovală. Deoarece trebuie să disipeze o cantitate mare de căldură, diuza este realizată din cupru și are răcire cu apă. În interior se găsesc cele două duze de contact care asigură transmiterea curentului către sârmele de sudură. Sârmele de sudură sunt comandate în regim master slave, prima sârma în direcția de sudare fiind întotdeauna sârma „master”

Pentru obținerea unor suduri de calitate, pistolul tandem trebuie să aibă cele două tuburi conducătoare construite rigid. Răcirea suplimentară este de asemenea o cerință, mai ales că regimul de funcționare a acestor pistolete este continuu. Izolarea electrică între cele 2 sârme de sudura este un factor foarte important, prevenind apariția descărcărilor directe între sârme și blocarea procesului de sudură.

În cadrul atelierului de confecții metalice au fost realizate experimentări ale surselor standard și tandem în construcția de grinzi pentru macarale. La sudura cap la cap a tablei S355J2 cu grosimea de 20mm s-au obținut:

- Straturi cu înălțimea de 6-7mm pentru ambele surse;
- Viteze de sudare de 30 cm/min, viteza de avans sârma de 13,5 m/min la sursa standard;
- Viteze de sudare de 80 cm/min, viteza de avans sârma 19.5 m/min la sursa master și 9m/min la sursa slave;
- Rate de depuneri ridicate de peste 15 kg/h la sudura în tandem;
- Număr de treceri reduse de la 15 la 10 în cazul sudurii în tandem;
- Productivitate mai mare cu 20%;

În ultimul deceniu s-a dezvoltat foarte mult sistemul de sudură în tandem, cu efecte în:

- Creșterea productivității prin creșterea ratei de depunere și integrarea pistolului de sudură în instalații robotizate;
- Creșterea calității prin folosirea de combinații de sârme cu compoziții diferite și a regimurilor electrice diferite.

Un alt domeniu aflat în continuă dezvoltare este cel al sârmelor tubulare. Compoziția fluxurilor acestor sârme asigură dezoxidarea băii metalice prin conținutul de Al, Si precum și reducerea conținutului de hidrogen prin intermediul fluorurilor MnF_3 , CaF_2 , Na_2SiF_6 , K_2SiF_6 , Na_3AlF_6 , Li_3AlF_6 care se pot recupera din zgurile de oțelărie [6/40]. Zgura formată de sârmele tubulare asigură protecția băii metalice post sudură și împiedicarea curgerii la sudarea pe verticală. Calitatea îmbinării sudate folosind sârmele tubulare recomandă folosirea lor la sudura oțelurilor de înaltă rezistență HSLA.

PARTEA a - II - a

CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND ÎMBINĂRILE METALICE SUDATE

CAPITOLUL 4

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ÎMBINAREA OȚELURILOR DIN GRUPE DIFERITE

Sudura între oțelul inox și oțelul carbon de înaltă rezistență este des utilizată în industria automotive. În acest scop, a fost cercetată și implementată o metodă de protecție și creștere a duratei de viață pentru pistoanele de la presele de extrudare a aliajelor de aluminiu - magneziu [7/41]. În procesul tehnologic de extrudare, aliajul de aluminiu magneziu (AlSiMg11) standard este împins de către piston în interiorul cilindrului de extrudare (Fig. 3/4.4.) [8/42]. Elementul cel mai solicitat mecanic, atât dinamic și static este pistonul, în timpul funcționării atingând temperaturi de până la 400 °C și presiuni de 300-700 MPA.

Acesta trebuie să aibă calități deosebite și uneori complementare:

- Rezistență la îndoire – flambaj a tijei mai ales în poziție retrasă;
- Lucrul la temperaturi ridicate;
- Rezistență la coroziune chimică la contactul cu magneziul care este foarte reactiv față de carbonul din compoziția oțelului.

În acest scop, a fost realizată practic o tijă prototip utilizând materiale noi superioare din punct de vedere mecanic și o metodă specială de îmbinare a acestora. Corpul tijei a fost îmbunătățit prin alegerea unui oțel mai rezistent cu conținut mediu de carbon. Capul tijei a fost realizat prin strunjire din oțel inox austenitic. Corpul și capul tijei au fost asamblate prin sudură, tehnologie dezvoltată în atelierul de sudură al firmei SC Hydromatic Timișoara.

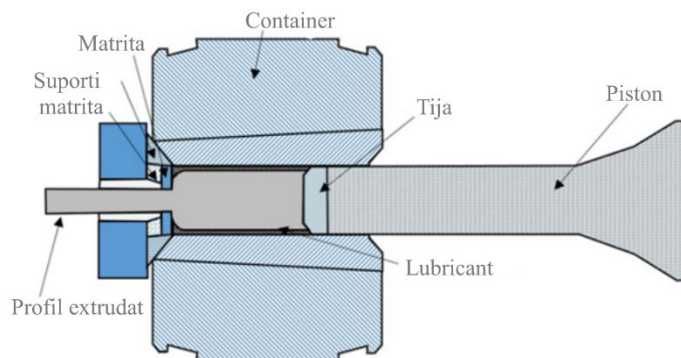


Fig. 3/4.4 Aplicație tipică a procesului de extrudare

Oțelul inox utilizat la capul tije a fost testat contra coroziunii prin punerea în contact cu aliajul de AlSiMg11 timp de 24 de ore la o temperatură de 400 C° în cuptorul de tratament termic de detensionare. Pe baza rezultatelor obținute în cadrul acestor experimentări, s-a ales tipul de oțel inoxidabil AISI304.

Procedura de sudură și parametrii de sudare au fost încercați pentru obținerea unei suduri care să facă tranziția graduală între conținutul de carbon mare din tija și oțelul inox fără carbon. De asemenea s-a urmărit obținerea unei structuri cât mai rezistente.

În acest caz, controlul acestei zone de tranziție s-a făcut prin experimentarea și alegerea unei sârme de sudură optime, care să asigure atât rezistența mecanică necesară, cât și rezistența la coroziune și temperatură. Elementul urmărit în matricea de aliere în acest caz este nichelul, având în vedere că zona de îmbinare din punct de vedere metalurgic este mai apropiată de oțelul inox decât de oțelul carbon.

Îmbinările disimilare necesită tehnologii mult superioare îmbinărilor de metale și aliaje similare și în mod uzual se încearcă evitarea acestora încă din faza de proiectare. Totuși există cazuri tot mai numeroase care impun din start proiectarea unor astfel de îmbinări în situațiile: îmbinarea are nevoie de proprietăți diferite ale celor 2 piese iar dacă materialul uneia dintre piese este foarte scump, se procedează la reducerea cantitativă a acestuia în detrimentul celuilalt material (exemplu cazul placărilor).

În cazul în care îmbinarea disimilară nu este posibilă prin procedee de sudură uzuale, se poate totuși realiza prin următoarele metode:

- Aducerea unui al treilea aliaj în cordonul de sudură care să aibă compatibilitate cu ambele materiale utilizate. Ca exemplu este nichelul la îmbinări oțel carbon – oțel inox (cazul studiat anterior) idem pentru îmbinări fontă – oțel carbon sau cupru aluminiu;
- Îmbinarea utilizând un strat (layer) dintr-un al treilea aliaj între aliajele inițiale care se doresc a fi îmbinate;
- Utilizarea de tehnologii laser speciale.

CAPITOLUL 5

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND CREȘTEREA REZISTENȚEI ÎMBINĂRILOR SUDATE A OȚELURILOR HSLA MICROALIAȚE

Dezvoltarea de noi tipuri de consumabile destinate sudurii oțelurilor HSLA reprezintă o provocare pentru industria constructoare de mașini, având în vedere varietatea mare de consumabile (sârme pentru sudura MIG-MAG) și conținutul variat al acestora în elemente noi

de aliere [9/52], [10/53]. În vederea analizei au fost făcute examinări structurale la microscop și teste pe mașina de încercat reziliența tip Charpy. Materialul sudat a fost tabla de tip HSLA cu grosimea de 10mm.

Scopul cercetărilor din acest capitol este creșterea rezistenței la impact a cordonului de sudură prin microaliere folosind sârme de sudură aliate la valori egale sau mai ridicate decât al materialului de bază [11/60]. Elementul studiat în aceste teste este nichelul, compoziția acestuia în sârmele de sudura poate fi variată între 0 și 9,5%. Principalul avantaj al nichelului este că prin microaliere și diluție în baia metalică poate crește rezistența la impact precum și domeniul de temperatură al acesteia inclusiv în domeniul temperaturilor negative. Alt avantaj al nichelului este că nu formează carburi care fragilizează sudura și că poate fi dizolvat în proporții mari în austenită și ferită. Materialele de adaos (sârme de sudură de diametru 1.2mm) au fost selecționate dintr-o gamă largă urmărind să acopere un element pentru care a fost făcut studiul, și anume nichelul. Astfel au fost selecționate sârme de la marca ER70 fără nichel până la marca ER308 care conține 9,5% nichel [12/59]. Testele de sudură au fost executate pe eșantioane de tabla de 10mm cu dimensiuni de 50x100mm care au fost sudate împreună. Prelucrarea pre-sudura a rosturilor a fost făcută pe freza CNC astfel încât să se obțină un rost de sudura în „X”. Procedul de sudură ales este „metal active gas” MAG. Încercările la impact au fost realizate în cadrul laboratorului Facultății de mecanică al UPT. Încercările au fost făcute pe loturi de 5 epruvete pentru cele 4 tipuri de material de adaos.

În Fig. 4/5.6-7/5.9 este prezentat aspectul ruperii epruvetei după testare pentru materialele de adaos ER70, ER100, ER120, ER308.



Fig. 4/5.6 Aspect rupere epruveta sudata cu ER70

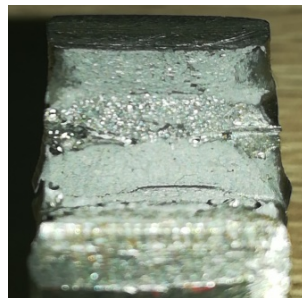


Fig. 5/5.7 Aspect rupere epruveta sudata cu ER100

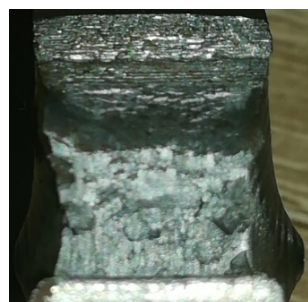


Fig. 6/5.8 Aspect rupere epruveta sudata cu ER120



Fig. 7/5.9 Aspect rupere epruveta sudata cu ER308

Rezultatele cele mai bune au fost obținute la concentrații ale nichelului de 2 - 3% în sârma de sudură deci de 1,6% în cordonul de sudură după diluție folosind materialul de adaos ER120 [11/60]. Aspectul grăunților în planul de rupere arată în general o structură fină, toate epruvetele au rezistat la testul de impact fără sa se rupă, ceea ce arată o reziliență bună a sudurilor. Creșterea conținutului de nichel în cazul materialului de adaos ER308 arată o scădere a rezistenței la impact, cauza fiind grăunții austenitici de dimensiuni mari, vizibili în secțiunea de rupere.

CAPITOLUL 6

PROCESAREA DATELOR SI ANALIZA REZULTATELOR OBTINUTE

Pentru realizarea probelor de sudură o cerință importantă a fost experimentarea și testarea parametrilor electrici și tehnologici de proces, astfel încât cordonul de sudură să aibă dimensiunile H și L, factorul de formă H/L optime cerute de dimensiunile și geometria probelor. Experimentările au avut la bază regimurile de sudură impuse de specificațiile tehnice de sudură (WPS) pentru sudura MAG a tablelor de oțel S355J2 cap la cap [13/57].

Analizele de duritate, macroscopice, microscopice optice și electronice, spectrografice cu raze X au fost realizate în cadrul Institutului național de cercetare dezvoltare în sudură și încercări de material ISIM Timișoara.

În fig 8/6.5 se prezintă proba, cu linii galbene s-au delimitat cele 3 zone care rezultă după sudură:

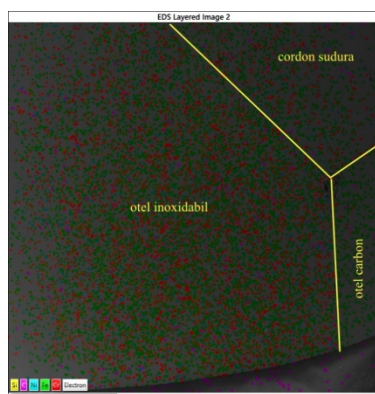


Fig. 8/6.5 Vedere de ansamblu proba în tehnologie EDS

Cu ajutorul acestei analize poate fi măsurat gradul de diluție al materialelor din cordonul de sudură. Astfel, cel mai relevant element pentru măsurarea gradului de diluție este cromul, marcat cu roșu în Fig 6.5. Din certificatele de calitate avem pentru oțelul inoxidabil o concentrație de crom de 19.1% iar pentru oțelul carbon o concentrație de 0,85%. După scalarea

sistemului EDS cu aceste 2 valori, rezultă pentru cordonul de sudură o concentrație de crom de 11% valoare care confirmă datele prezentate în capitolul 4. În Fig. 9/6.6 se prezintă detaliat fiecare element în parte. Se observă că și nichelul poate fi citit și considerat ca un indicator al gradului de diluție al materialelor în cordonul de sudură.

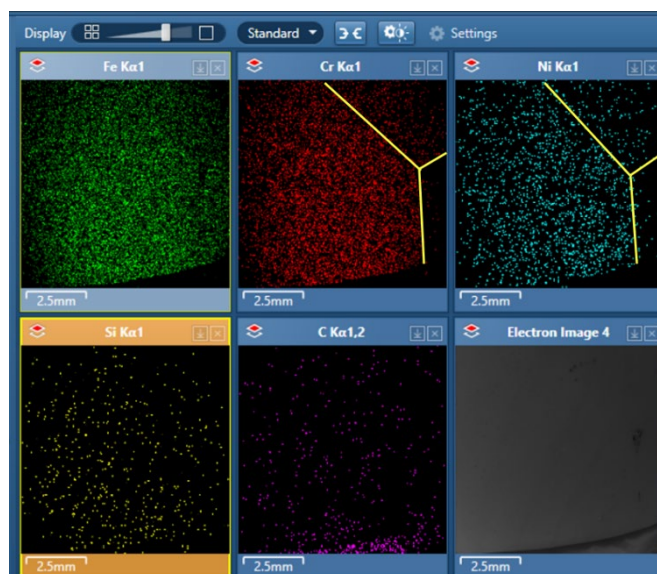


Fig. 9/6.6 Vedere de ansamblu proba în tehnologie EDS detaliată pe elemente

Pentru studiul în detaliu al cordonului de sudură și a zonei influențate termic HAZ au fost alese 3 linii de scanare cu microscopul electronic. Astfel pentru cordonul de sudura au fost definite liniile 14 și 16; pentru oțelul carbon HAZ liniile 12 și 18; pentru oțelul inoxidabil HAZ liniile 11 și 15. Ca și mod de amestec a elementelor chimice, în liniile 14 și 16 putem considera că amestecul Fe cu Cr, Ni se face prin topire în fază lichida deci prin diluție. În zonele afectate termic, liniile 11, 12, 15 și 18, putem considera că transferul elementelor dinspre cordonul de sudură se face doar prin difuzie.

În Fig. 10/6.7 se prezintă dispunerea liniilor de scanare pe probă.

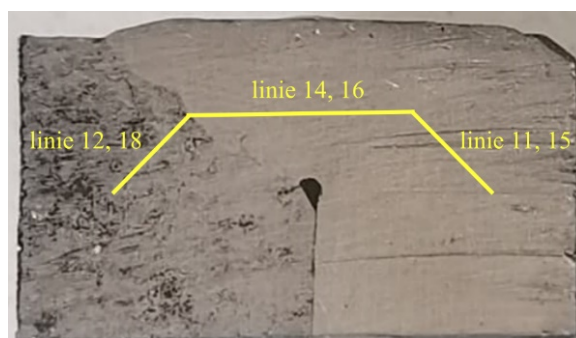


Fig. 10/6.7 Dispunerea liniilor de scanare pe proba de sudură

Liniile 12, 18 corespund oțelului carbon aliat 34CrNiMo6 iar liniile 11, 15 corespund oțelului inoxidabil AISI 304. Liniile 14, 16 corespund celor 2 sârme folosite la sudură, ER309 și ER309. Pentru liniile 14, 16 scanarea electronică a atomilor de Fe și Cr arată o distribuție constantă a concentrațiilor acestora de-a lungul liniei de scanare. Acest fapt indică o bună omogenizare a acestor elemente prin diluție în baia de metal lichid (Fig. 11/6.8). Din analiza spectrală, dacă considerăm cromul ca element de referință observăm diluarea acestuia de la valori de 20% corespunzător oțelului sudat AISI304 către valori de 16% în vecinătatea liniei de fuziune.

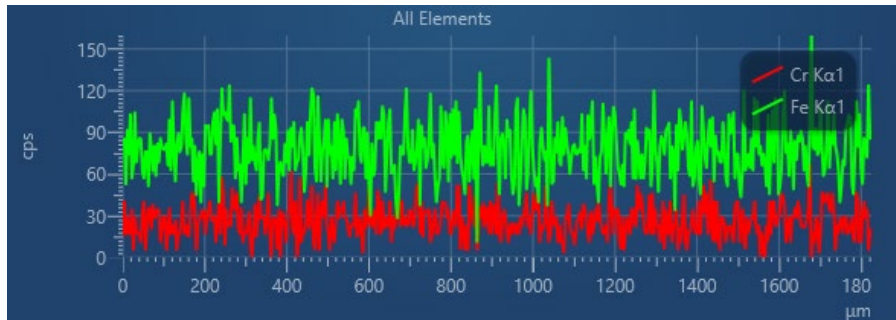


Fig. 11/6.8 Distribuție atomi fier și crom în cordonul de sudură

Pentru evidențierea liniei de fuziune dintre cele două oțeluri inoxidabile austenitice s-a analizat pe microscopul optic următoarele:

- Cordonul de sudură prin topire devine un aliaj între 70% ER309 și 30% AISI304. La trecerea din faza lichidă în faza solidă apar grăunții de ferită primară care în timp cresc și formează ferita globulară în grăunți vizibil mai mari decât celelalte formațiuni feritice. Identificarea acestor grăunți este o indicație că se află în zona cordonului de sudura unde oțelul a trecut prin schimbarea de fază;
- Zona afectată termic nu schimbă faza, însă are loc fenomenul de recristalizare și finisare al feritei cu apariția de ferită lamelară;
- Linia de fuziune prezintă o diluție totală între cele două oțeluri austenitice și spre deosebire de linia de fuziune cu oțelul carbon, nu prezintă formațiuni dendritice între cele două oțeluri.

Examinarea microscopică poate indica conținutul de ferita (Fig. 12/6.16) și arată tipurile de formațiuni feritice noi apărute în cordonul de sudura (ex. ferita globulară și ferita lamelară fină).

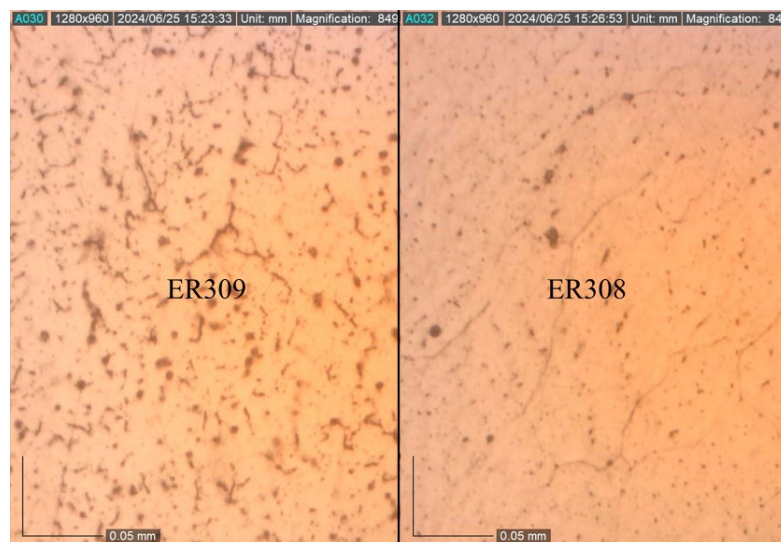


Fig12/6.16 Comparție conținut ferita sudura ER309-ER308

Pe lângă importanța conținutului de ferita în cordonul de sudura, un factor nou indicat de examinarea microscopică este rata de formare dendritică în linia de fuziune cu oțelul carbon. Aceasta depinde de energia liniară și temperatura de preîncălzire, precum și de tratamentele post sudură de răcire lentă.

CAPITOLUL 7

EXTINDEREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE LA PROCESAREA TERMICĂ A UNOR ALIAJE NEFEROASE

Pentru a îmbunătăți domeniul de tăiere, în speță creșterea grosimii materialului și a vitezei de tăiere, au fost experimentate următoarele:

- Modificarea gazului de protecție, de la azot (inert) la oxigen (activ);
- Utilizarea unui mod nou în domeniul surselor laser, și anume modul pulsant.

Testele de tăiere efectuate s-au făcut folosind întregul spectru de frecvențe ale sursei laser, grupate în frecvențe joase, medii și înalte [14/69]:

- La frecvențe joase, 50 Hz, alumina este fragmentată în fragmente relativ mari de ordinul a 200 micrometri, care păstrează încă efectul de izolare a aluminiului topit de raza laser, făcând dificil transferul de energie către topitură și tăierea;
- La frecvențe medii, 3000 Hz, alumina este fragmentată în fragmente de ordinul 20 micrometri, care sunt îndepărtate ușor de către jetul de oxigen;
- La frecvențe înalte de 40000 Hz, alumina este fragmentată în părți foarte fine care sunt înglobate în aluminiul topit.

Pentru experimentări s-au realizat 4 compoziții speciale de gaz, în care parametrul a fost concentrația de oxigen. Cele 4 tipuri de gaz au avut 25%, 50%, 75% și 100% oxigen [15/70]. Pentru evaluarea macroscopică a calității tăieturii a fost conceput un program de tăiere special, proiectat să taie 10 linii de test, cu un parametru modificat gradual în 10 trepte. Parametrii de care depinde cel mai mult calitatea tăieturii sunt puterea laserului și viteza de tăiere. Acești parametri au fost analizați în mod independent, la final s-a făcut o analiză tridimensională a calității tăieturii în funcție de puterea laserului și viteza de tăiere, pentru cele 4 compoziții de gaz testate.

Rezultate obținute:

- Schimbarea gazului de protecție de la azot la oxigen duce la creșterea grosimilor de tăiere cu 50%;
- Utilizarea laserului în mod pulsant duce la diminuarea lățimii tăieturii și a rugozității acesteia;
- Frecvența de pulsare este un parametru esențial în ceea ce privește îndepărtarea aluminei. Cele mai bune rezultate se obțin la frecvențe medii de 3000Hz când bavura rezultată este minimă și rugozitatea este acceptabilă;
- Funcționarea laserului cu oxigen este mai stabilă decât funcționarea cu azot, iar consumul de gaz scade cu 68%;
- Costul total al operării scade cu 30% datorită scăderii debitului de gaz necesar, dar și datorită prețului la oxigen mai redus decât cel la azot.

Din studiul efectelor gazului de tăiere, se constată că pentru o tablă de 1 mm grosime, viteza de tăiere 50 mm/s și putere laser 900W este posibilă tăierea acesteia atât cu oxigen, cât și cu azot. Presiunea gazului de tăiere are un rol important în obținerea de tăieturi curate, fără bavură. Mecanismul de îndepărtare a aluminiului topit se face diferit pentru cele 2 gaze. În cazul azotului, acesta fiind inert, îndepărtarea aluminiului topit se face exclusiv în baza energiei cinetice a acestuia. Din experimentări, se constată un domeniu optim al presiunii de 17 - 19 bar. În cazul unei presiuni superioare, are loc efectul de răcire suplimentară a tăieturii, creșterea accentuată a consumului de azot și creșterea puterii de tăiere a laserului. În cazul unei presiuni inferioare, se constată formarea de bavuri la partea inferioară a tăieturii, și chiar nepenetrarea tablei la presiuni mai mici de 10 bar. În cazul oxigenului, aluminiul topit se îndepărtează prin 2 efecte, energia cinetică a oxigenului și efectul de dilatare al aluminiului la transformarea în alumina.

CAPITOLUL 8

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Concluzii finale

Analizând literatura de specialitate și rezultatele cercetărilor experimentale proprii, privind îmbinarea prin sudură a materialelor metalice feroase și neferoase rezultă următoarele concluzii:

- Dezvoltarea tehnologică a electronicii de putere și a surselor de sudură deschid calea către noi tehnologii de sudură, apariția unor noi parametri tehnologici care prin optimizare duc la creșterea calitativă a îmbinărilor sudate;
- Creșterea productivității implică dezvoltarea de noi soluții tehnice privind procesul de sudură exemplu sudura cu doua sârme (tandem) și sudura cu sârmă tubulară;
- Dezvoltarea de tehnologii de pregătire a materialelor metalice (debitare) în vederea sudurii. Debitarea laser în regim pulsat.

În zona de vest a României există o dezvoltare accentuată a industriei auto motive în care cerința de îmbinări sudate speciale este în creștere. Experimentările care au stat la baza acestei teze de doctorat au fost făcute în Timișoara, având ca bază cererea unor clienți importanți de îmbinări sudate speciale. Astfel, au fost realizate și livrate țije piston pentru extrudarea aluminiului către firme precum TRW, îmbinări sudate din oțel inoxidabil către firme precum Continental, Mahle etc.

Tehnologiile de sudură și designul îmbinărilor au fost dezvoltate în cadrul atelierelor de proiectare din cadrul firmelor Hidromatics SRL și Romadoor SRL. Tot la cererea clienților s-a dezvoltat atelierul de tăiere și sudură pentru metale neferoase, în special aluminiul și aliajele sale. Au fost achiziționate lasere de tăiere cu CO₂ și fibră optică pulsate, au fost dezvoltate tehnologii noi de tăiere a tablelor de aluminiu destinate sudurii. Factorul primordial urmărit a fost calitatea și aspectul produselor debitate și sudate, apoi creșterea productivității și reducerea costurilor de producție.

Cercetările făcute în domeniul îmbinărilor de metale disimilare prin sudură conduc la posibilitatea de realizare a unor piese și subansamble cu durabilitate mai ridicată. Aceste cercetări sunt continuate prin extinderea gamei de metale sudate, de la sudura oțelului inoxidabil cu oțelul carbon se trece la sudura cuprului cu aluminiu folosind tehnologie laser.

În domeniul sudurii în mediu de gaz protector, au fost realizate experimentări și cercetări pentru creșterea productivității și calității îmbinărilor sudate. Astfel au fost achiziționate în cadrul atelierului de sudură surse moderne sinergice dublu-pulsate de 500 amperi, tip Kolark M500. Cu ajutorul acestor surse în paralel, cu unitatea de comandă și control proiectată și realizată în regie proprie, s-a realizat robotul liniar de sudură în tandem, destinat realizării automate a sudurilor lungi cerute în producția grinzilor de macarale. Pentru creșterea productivității și calității s-au făcut cercetări în domeniul laserelor de debitat tabla, atât pentru oțel cât și pentru aluminiu. În colaborare cu firma Linde SRL au fost găsite soluții noi de tăiere a aluminiului utilizând gaze active precum oxigenul și combinațiile sale cu azotul, aplicabile în special în domeniul debitării de calitate a tablelor de aluminiu.

Contribuții originale

Ca și contribuții originale dezvoltate în faza de laborator și industrială pot fi considerate:

- determinarea influenței parametrilor electrici ai sursei de sudură și tehnologici ai procesului de sudură asupra formei geometrice a cordonului de sudură;
- determinarea influenței sursei de sudură (standard și tandem) asupra ratei de depunere și energiei liniare, cu efect în creșterea productivității și calității;

- stabilirea tehnologiei de sudură pentru îmbinarea oțelurilor din grupe diferite, respectiv oțeluri inoxidabile austenitice cu oțel carbon de înaltă rezistență mediu aliat;
- realizarea practică a pistonului utilizat în extrudarea aluminiului și magneziului;
- stabilirea tehnologiei de sudură pentru îmbinarea oțelurilor HSLA slab aliate de rezistență superioară în vederea creșterii rezistenței la impact prin microalierea cordonului de sudură;
- realizarea practică a îmbinării de oțeluri HSLA cu obținerea de rezistență la impact a cordonului de sudură superioară materialului de bază;
- analiza cordonului de sudură cu ajutorul spectrografiei, analizelor macro și microscopice, analiza elementelor de aliere cu microscopul electronic;
- dezvoltarea și implementarea pe laserul standard a tehnologiei de tăiere a aluminiului folosind oxigenul și modulația în frecvență a razei laser;
- realizarea practică a sistemului automat de amestec oxigen azot în funcție de compoziția tablei de aluminiu debitată;
- cercetări privind optimizarea parametrilor de tăiere pentru creșterea calității debitării, cu efecte pozitive la sudare;
- experimentări practice pentru debitarea aluminiului în regim laser pulsant, creșterea grosimii tablei debitate cu reducerea puterii sursei laser.

În cadrul cercetărilor și experimentărilor în faza de laborator s-a colaborat cu UPT Facultatea de Mecanică pentru încercări mecanice și cu ISIM Timișoara pentru microscopie optică, electronică și spectrometrie.

Din analizele de laborator au rezultat următoarele:

- compozițiile chimice optime ale elementelor de adaos (sârme de sudură) astfel încât să se obțină valori de rezistență ale cordonului de sudură egale sau superioare metalelor îmbinate;
- aspectele optime ale liniilor de fuziune pentru asigurarea unor rezistențe mecanice cât mai ridicate ale îmbinărilor sudate;
- evidențierea defectelor care pot apărea în cordonul de sudură și posibilitățile de remediere a acestora prin ajustarea parametrilor tehnologici de sudură.

În cadrul atelierelor de producție al firmelor executante, au fost realizate încercări și experimentări privind geometria cordonului de sudură prin optimizarea

- parametrilor electrici ai surselor de curent pulsate;
- parametrilor tehnologici ai procesului de sudură.

În baza acestora, au fost validate și omologate proceduri de sudură (WPS) atât pentru straturile de rădăcina, cât și pentru straturilor de umplere ale cordonului de sudură.

În cadrul atelierelor de producție ale firmei Linde SRL au fost realizate amestecuri experimentale de oxigen azot care au dus la validarea și omologarea de procedee noi de tăiere a tablelor de aluminiu utilizând tehnologia laser pulsantă.

Direcții de continuare a cercetărilor

Pe baza cercetărilor efectuate, a rezultatelor obținute și a dotărilor existente consider că în continuare pot fi dezvoltate cercetări pe următoarele direcții:

- îmbinarea metalelor disimilare exemplu cupru aluminiu utilizate în industria autovehiculelor electrice;
- îmbinarea oțelurilor de înaltă rezistență pentru creșterea rezistenței la impact a îmbinării și creșterea domeniului temperaturilor de utilizare a acestora;
- dezvoltarea sistemelor de sudură tandem, creșterea numărului de sârme introduse simultan în baia metalică;
- dezvoltarea de noi amestecuri de gaze utilizate în procesul de debitare și sudare a metalelor.

BIBLIOGRAFIE

- [1/5] Bodea Marius, „Sudare si procedee conexe” editura utpress Cluj-Napoca 2016
- [2/6] Tusz F., „Tratat de sudura”, editura Sudura Timisoara 2003
- [3/7] Dehelean D. „Sudarea prin topire” editura Sudura Timisoara 1997
- [4/10] Kah P, Suoranta R, Martikainen J. „Advanced Gas Metal Arc Welding Processes”. 2013. pp. 655-67
- [5/11] Kumar A, Khurana MK, Yadav PK. „Optimization of gas metal arc welding process parameters.” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016;149(1):1-11
- [6/45] L. **Zgripcea**, O. Lupu, M. Ardelean and V. Putan, “Researches Regarding Heterogeneous Welding between Carbon and Stainless Steel used in Fabrication of Cylinders’ Rod for Magnesium Alloy Extruders”, 7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering vol. 416, 012100, 2018 (SCOPUS).
- [7/41] Procedures for fabrication of magnesium extruded parts TRW factory Timisoara
- [8/42] New Extrusion Process for Manufacturing Magnesium Car Parts, 24 August 2017
- [9/52] ASTM A568 Standard specification for Steel, Sheet, Carbon, Structural and High-Strength General Requirements
- [10/53] Peters D. J. „Submerged arc welding consumables for HSLA-100 steel”, Massachusetts Institute of Technology, Publisher Springfield, 1989
- [11/60] L. **Zgripcea**, O. Lupu, V. Putan and C. Birtok Baneasa, “Research for improving mechanical characteristics of high strength weld”, International Conference on Applied Sciences ICAS May 2018 Banja Luka, Bosnia Herzegovina, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 477, 012008, 2018, WOS:000461184100008
- [12/59] Patrícia Pala Diniz, Willy Ank Moraes, „Impact of Welding Consumables Strength Level on Metallurgical and Mechanical Properties Homogeneity of Welds Obtained with a Complex Phase Steel”, Universidade Santa Cecília, 2010
- [13/57] Dunder M, Ivandic Z, Samardzic I Selection of arc welding parameters of micro alloyed steel, Metalurgia 47(4) 325-330, 2008
- [14/69] L. **Zgripcea**, V. Putan, M. Ardelean and C. Birtok Baneasa “Technology of thin metal sheet cutting with fiber laser“, International Conference on Applied Sciences ICAS 2020, Journal of Physics: Conference Series 1781(1), 2021, 012059, (SCOPUS)
- [15/70] L. **Zgripcea**, A. Socalici, V. Putan and C. Birtok Baneasa “Unconventional method of cutting aluminum plates using fiber laser with oxygen assist gas“, International Conference on Applied Sciences ICAS 2021, Journal of Physics: Conference Series 2212(1), 2022, 012033, (SCOPUS)