MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Școala Doctorală de Inginerie Industrială și Robotică

TEZĂ DE DOCTORAT

„CERCETĂRI PRIVIND COMPORTAREA LA SUDAREA PRIN REZISTENȚĂ ELECTRICĂ ÎN RELIEF A COMPONENTELOR SUBȚIRI DIN OȚEL ALUMINIZAT”

”RESEARCH ON THE BEHAVIOR TO ELECTRIC RESISTANCE WELDING BY PROJECTION OF THIN ALUMINIZED STEEL COMPONENTS”

Doctorand Ing. Alexandru-Vlăduț F. OPREA

Conducător științific

Prof.dr.ing. Ionelia VOICULESCU

București - 2026

MULȚUMIRI

*Lucrarea de doctorat intitulată "***Cercetări privind comportarea la sudarea prin rezistență electrică în relief a componentelor subțiri din oțel aluminizat***" a fost elaborată și revizuită sub coordonarea comisiei de îndrumare alcătuită din: Conducător științific Prof.dr.ing. Ionelia Voiculescu, Prof. dr.ing. Corneliu Rontescu, Conf.dr.ing. Dumitru Titi Cicic, S.L. dr. ing. Ana Maria Bogatu de la UPB, Conf. Dr.ing. Carmen Cătălina Rusu de la UDJG, cărora țin să le mulțumesc în mod deosebit pentru toate observațiile și sugestiile constructive adresate pe parcursul susținerii examenelor și referatelor științifice prevăzute în programul de pregătire doctorală.*

Cu această ocazie, adresez mulțumiri doamnei profesor doctor inginer Ionelia Voiculescu, din cadrul UNSTPB, pentru modul profesional în care m-a coordonat, încurajat și direcționat pentru realizarea programului de experimente, teste și încercări pe parcursul derulării pregătirii doctorale. Mulțumesc totodată domnului S.L.dr. ing. Ion Mihai Vasile care m-a ajutat la pregătirea probelor destinate analizelor metalografice și D.lui s.l. dr.ing. Robert Cătălin Ciocoiu, de la facultatea SIM, care m-a ajutat la realizarea testelor de tracțiune.

Mulțumesc doamnelor Prof.dr.ing. Elena Scutelnicu și Conf.dr. ing. Carmen Cătălina Rusu de la Universitatea „Dunărea de Jos" din Galați, pentru suportul tehnic acordat în pregătirea manuscrisului lucrării publicate în Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology (AWET).

Mulțumesc conducerii Universității Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București și conducerii Școlii Doctorale de Inginerie Industrială și Robotică, care mi-au creeat condițiile favorabile pentru desfășurarea activității științifice, precum și pentru efectuarea în bune condiții a cercetărilor, testelor, pentru susținerea referatelor și lucrărilor la sesiuni științifice organizate în facultatea IIR, precum și pentru acordarea bursei de studii de care am beneficiat pe parcursul primilor 3 ani de pregătire doctorală.

Mulțumesc tuturor colegilor și colaboratorilor din cadrul American PAN Europe pentru înțelegere, sprijinul moral și discuțiile tehnice aplicate, pe baza cărora am reușit să proiectez programele experimentale de sudare prin rezistență electrică în relief. Sunt bucuros că am contribuit, prin experimentele diverse efectuate și prin procedurile elaborate pentru documentarea tehnologiilor de sudare prin rezistență în relief, la implementarea tehnologiilor optimizate în cadrul American PAN Europe. Doresc să mulțumesc totodată părinților și familiei mele, pentru tot sprijinul, răbdarea și încurajările cu care m-au înconjurat pe întreaga perioadă a studiilor de doctorat. A fost un efort susținut dar și o onoare de a contribui la progresul științific în domeniul sudării în relief, de a redacta și prezenta lucrări de cercetare la diferite conferințe de specialitate din țară și din străinătate.

București, 2026

Cu deosebită considerație,

Ing. Alexandru Vlăduț OPREA

INTRODUCERE

În cadrul tezei de doctorat intitulată ”**Cercetări privind comportarea la sudarea prin rezistență electrică în relief a componentelor subțiri din oțel aluminizat”** sunt cuprinse demersurile de documentare, cercetare și experimentare care au fost derulate pentru studierea fenomenelor ce apar la sudarea prin rezistență electrică în relief, în cazul particular al tablelor subțiri din oțel aluminizat. Tema acestei teze de doctorat s-a conturat în urma activității desfășurate ca inginer stagiar la firma Pan American Europe din Alexandria, Teleorman, ca urmare a observării unor probleme privind calitatea produselor sudate realizate pe fluxul tehnologic de fabricare a tăvilor din oțel aluminizat. Cu această ocazie, am analizat efectul parametrilor regimului de sudare și am testat mai multe seturi de probe sudate, realizate cu diferite valori ale acestora, ceea ce mi-a permis îmbunătățirea performanțelor produselor fabricate, reducerea costurilor prin reducerea consumurilor de energie și limitarea la minim a numărului de produse rebut. Deși tema pare simplă, au fost necesare mai multe seturi de experimente realizate cu diferite perechi de valori ale parametrilor de sudare pentru a definitiva și documenta tehnologia de sudare, iar în ultimă etapă de a o implementa în producție și de a contribui astfel la creșterea profitabilității organizației.

De aceea, consider că lucrarea este valoroasă, atât pentru pregătirea mea profesională cât și pentru domeniul căruia i se adresează. Rezultatele pe care le-am obținut în urma cercetărilor aplicative mi-au fost foarte utile și reprezintă un element de progres pentru compania unde lucrez sau pentru alte companii de profil care fabrică structuri sudate din componente subțiri, fiind în același timp un model de abordare a tematicii sudării prin rezistență electrică pentru specialiștii din domeniul ingineriei industriale.

***

În primul capitol al tezei de doctorat intitulat ”Elemente generale privind stadiul cunoașterii în domeniul sudării prin rezistență electrică” se prezintă pe scurt cele mai importante aspecte ale procedeului de sudare prin rezistență elecrică, pornind de la schemele clasice de sudare prin puncte și sfârșind cu procedeul derivat de sudare în relief. Capitolul prezintă comparativ avantajele și dezavantajele procedeelor de sudare prin rezistență electrică și presiune, efectele valorilor parametrilor de proces tehnologic asupra calității punctului sudat și a rezistenței globale a îmbinării. Sunt analizate perspectivele de îmbunătățire a procedeului de sudare și metodele de ajustare a valorilor parametrilor de proces pentru obținerea celor mai bune rezultate. Se analizează factorii care contribuie la formarea corectă a punctului sudat, influența modului de lucru asupra electrozilor de sudare, echilibrul termic în zona punctelor sudate și efectele acestora asupra expulzărilor de metal lichid. Se prezintă totodată metodele principale de control a valorilor parametrilor electrici la sudare, de control nedistructiv al punctelor sudate și de evaluare cantitativă a calității prin metode distructive. În final se prezintă cele mai importante concluzii desprinse din analiza performanțelor și posibilităților de îmbunătățire aplicabile la procedeul de sudare prin rezistență electrică în cazul particular al tablelor subțiri din oțel.

În capitolul al doilea, intitulat ”Comportarea la sudarea prin rezistență electrică a componentelor subțiri din oțel” se analizează factorii influențează comportarea la sudarea prin rezistență electrică a oțelurilor, cum ar fi: efectul straturilor de acoperire (cu rol de asigurare a rezistenței la coroziune) asupra formării corecte a punctelor sudate; viteza de răcire la sudare;

probleme care apar la realizarea îmbinărilor eterogene; regimul de sudare; mecanismul formării punctului de sudură. La finalul capitolului sunt sumarizate sub formă de concluzii cele mai importante idei desprinse din analiza stadiului actual în domeniul sudării prin rezistență electrică în relief.

Capitolul al treilea este intitulat ”Obiectivele și structura tezei de doctorat. Aparatura de cercetare”, având ca obiect prezentarea etapelor care au permis realizarea tezei, modul în care au fost planificate și realizate studiile, cercetările și experimentele, precum și aparatura care a fost utilizată pe parcursul derulării programului doctoral în vederea atingerii obiectivelor propuse.

Primele 3 capitole ale tezei, care însumează 38 de pagini, reprezintă partea de documentare teoretică și de planificare a programului de experimentări.

În partea a doua, care cuprinde cercetări originale, programele de experimente derulate, tehnologia de sudare, testele mecanice și analizele structurale, sunt cuprinse capitolele 4, 5 și 6.

În capitolul al patrulea, intitulat ”Cercetări experimentale de sudare în relief a componentelor subțiri din oțel aluminizat” cu extindere de 24 de pagini, se prezintă programul complet de experimentări efectuate pentru a studia comportarea la sudare a componentelor subțiri din oțel aluminizat la sudarea prin presiune în relief. În acest scop. Sunt analizate materialele de bază utilizate (table cu grosimea de 1,2 mm și 0,8mm acoperite prin aluminizare cu un strat subțire de protecție din aliaj Al-Si). Au fost efectuate analize de microscopie optică, pentru a evalua compactitatea și aspectul stratului aluminizat, precum și analize de microscopie electronică SEM și EDAX, cu ajutorul cărora s-a evaluat compoziția chimică a stratului aluminizat, aderența și compactitatea acestuia la substratul din oțel. Apoi s-a realizat pregătirea probelor pentru sudare, prin decuparea unor fâșii cu lungime de 150mm, lățime 45mm și lățime de suprapunere de circa 52mm Probele din oțel cu grosimea de 0,8mm au fost suprapuse peste probele cu grosimea de 1,2mm (pe care s-au realizat proeminențele prin ambutisare cu poansoane dedicate, avândcâte 3 sau 5 proeminențe), apoi au fost sudate, conform tehnologiei de sudare elaborate. După sudarea primelor loturi de probe s-au evaluat imperfecțiunile care au apărut la sudare, cu scopul optimizării procesului de asamblare. La sfârșitul capitolului sunt precizate principalele concluzii rezultate din analiza probelor sudate.

În capitolul al cincilea, având o extindere de 36 de pagini și intitulat ”Caracterizarea și testarea probelor sudate prin rezistență electrică în relief” s-a trecut la analiza detaliată a îmbinărilor sudate realizate în capitolul anterior. Pentru aceasta, s-a efectuat prelevarea probelor prin decuparea zonelor sudate și obținerea unor secțiuni transversale prin punctele sudate, utilizând mașina pentru debitare de precizie. Apoi, probele au fost înglobate în rășină fenolică și au fost supuse procedurii de prelucrare metalografică cu hârtii abrazive având granulație progresivă, apoi cu lichide cu particule abrazive fine în suspensie. Pentru efectuarea analizelor de micro-compoziție chimică cu metoda EDAX suprafețele probelor nu au fost atacate, pentru a nu se impurifica cu elemente din reactivul chimic. Analizele microstructurale s-au efectuat prin microscopie optică și electronică SEM. Au urmat măsurări de microduritate pe microzonele punctelor sudate și pe zonele de influență termcă, pentru a evalua efectele stratului de protecție aluminizat asupra formării corecte a punctului sudat. În continuarea capitolului s-au efectuat teste de rupere prin tracțiune continuă a probelor sudate, fiind înregistrate diagramele de rupere și valorile parametrilor mecanici, iar probele au fost analizate pentru a se identifica modul de

rupere. Apoi s-au calculat indicii pentru predicția modului de rupere și s-au comparat valorile cu rezultatele obținute prin experimente. Capitolul se finalizează cu principalele concluzii desprinse din analiza rezultatelor experimentale și teoretice.

Capitolul al șaselea, intitulat ”Optimizarea procesului de sudare în relief” și extins pe 44 de pagini, se prezintă modelul experimental pentru optimizarea valorlor parametrilor regimului de sudare în relief a componentelor subțiri din oțel aluminizat. Metoda de optimizare utilizată a fost cea propusă de Taguchi. În acest scop s-au proiectat 2 matrici ortogonale, una pentru probele sudate cu 3 proeminențe și una pentru cele cu 5 proeminențe. Pentru proiectarea matricii de experimente s-au stabilit factorii care definesc regimul tehnologic de sudare prin rezistență electrică în relief care au stat la baza procesului de optimizare, respectiv: puterea la sudare, Ps (kVA); timpul de sudare, ts(ms); presiunea la electrozi, p (bar). Numărul parametrilor care au influențat efectiv procesul de sudare prin rezistență electrică au fost trei ($P = 3$) , având fiecare câte patru niveluri de optimizare ($L = 4$). Pentru evaluarea procesului de sudare s-au realizat noi seturi de probe sudate cu 3 și cu 5 proeminențe, cu aceleași valori ale parametrilor de regim stabiliți pe criterii de rezistență mecanică la rupere mare, deformare la rupere medie și rupere localizată doar în materialul de bază. Probele au for testate la rupere continua și rezultatele obținute au fost analizate pe baza criteriilor de comportare optimizată stabilite. La finalul capitolului se prezintă concluziile cercetărilor experimentale efectuate și sunt elaborate anexe care prezintă specificațiile procedurilor de sudare utilizate pentru obținerea probelor.

Capitolul al șaptelea, intitulat Contribuții și concluzii. Direcții ulterioare de cercetare” prezintă sintetic principalele contribuții ale autorului în domeniul tezei de doctorat și concluziile desprinse din cercetările și experimentele realizate.

***

Programul de pregătire avansată prin studii doctorale derulat în cadrul Scolii Doctorale a FIIR din UPB s-a realizat sub coordonarea D-nei Prof.dr.ing. Ionelia Voiculescu și a cuprins următoarele etape de pregătire:

- documentarea pe domeniul tezei de doctorat, pentru care s-au consultat peste 180 referințe bibliografice publicate la nivel național sau internațional (cele mai multe dintre acestea după anul 2015);
- pregătirea și susținerea examenelor de specialitate și a celor de pregătire generală, în cadrul programului de pregătire doctorală;
- întocmirea și prezentarea în fața comisiei de îndrumare pentru teza de doctorat a 5 rapoarte științifice (Raport științific 1 - Elemente generale privind stadiul cunoașterii, obiectivele și metodologia de cercetare – dezvoltare în domeniul sudării prin rezistență electrică; Raport științific 2 - Cercetări privind efectele parametrilor regimului tehnologic la sudarea prin rezistență electrică; Raport științific 3 - Cercetări privind comportarea la sudarea prin rezistență electrică a unor oțeluri ; Raport științific 4 - Tehnologie de sudare prin rezistență electrică. Program de experimentări și teste pe probe sudate; Raport științific 5 - Cercetări privind comportarea la sudarea prin rezistență electrică în relief a componentelor subțiri din oțel aluminizat);

- proiectarea tehnologiei de sudare prin rezistență electrică în relief a componentelor subțiri din oțel aluminizat care a fost implementată în compania *American PAN Europe, din Alexandria, Jud. Teleorman*
- realizarea documentației tehnologice pentru sudare (SPS/WPS 320 – 327);
- redactarea manuscrisului pentru teza de doctorat, revizuirea acestuia pe baza propunerilor formulate de membrii comisiei de îndrumare și de conducătorul de doctorat;
- elaborarea manuscriselor și publicarea de articole și lucrări științifice;
- participarea la proiectul de formare a competenţelor intitulat ”OPTIMizarea rezultatelor cercetării aplicative a doctoranzilor și cercetătorilor postdoctorat” – OPTIM Research, organizat de Comitetul Național Român al Consiliului Mondial al Energiei (CNR-CME), Co-organizator de stagii de cercetare aplicativă avansată;
- participarea la programe de pregătire profesională precum: Autodesk Inventor: Essentials (Autodesck Platinum Partner, Man and Machine Education Center, Bucuresti), Conversational English – Europass C1, Certificate of Graduation (British Academy of Business and Communication, 27.06.2020), Robot Operation and Programming (TPEB)-FANUC Automation Romania SRL, 06.03.2023 – 10.03.2023, Laser Safety Training Course (suitable as training for a Laser Safety Officer) coordonat de Dr. Anna Bass - Lasermet LTD, UK, 20.04.2023, Programator Sistem Informatic - Proiect cofinantat de Uniunea Europeana, „CoreComp-Competente pentru angajati”, 27.01.2025 –2026.
- participarea la conferințe de specialitate din țară și din străinătate – Brașov (International Conference Bramat, 16 Martie 2024), București (Workshop DIGITAL 4PPP -24 Noiembrie 2023; Conf. ICMaS, 16 Noiembrie 2023, Conferința Sudura, 3-4 Aprilie 2025), Cluj-Napoca (7-8 Aprilie 2022), Bosnia (International Congress EEM, 20-23 Martie 2023).

CUPRINS

Capitolul 1. Elemente generale privind stadiul cunoașterii în domeniul sudării prin rezistență electrică		8
1.1.	Aspecte generale privind sudarea prin presiune cu rezistență electrică în puncte	7
1.2.	Sudarea prin presiune cu rezistență electrică în relief (SPRER)	9
1.3	Avantaje și dezavantaje ale procedeului SPRER	10
1.4	Controlul parametrilor de proces în timpul sudării	11
1.5	Testarea distructivă și nedistructivă a punctelor la sudarea în relief	12
Capitolul 2. Comportarea la sudarea prin rezistență electrică în puncte a tablelor din oțel		13
2.1.	Factorii care influențează comportarea la sudarea prin rezistență electrică a oțelurilor	13
	2.1.1. Straturile de protecție prezente pe suprafețele componentelor sudate	13
	2.1.2. Viteza de răcire la sudare	14
	2.1.3. Regimul de sudare	14
2.2.	Mecanismul formării punctului de sudură	15
Capitolul 3. Obiectivele și structura tezei de doctorat. Aparatura de cercetare		16
3.1.	Obiectivele tezei de doctorat	16
3.2.	Structura tezei de doctorat	17
3.3.	Aparatura de cercetare utilizată pentru desfășurarea programului experimental	18
Partea experimentală		
Capitolul 4. Cercetări experimentale privind sudarea în relief a componentelor din oțel		19
4.1.	Cercetări experimentale privind sudarea în relief în 3 puncte a componentelor din oțel	19
	4.1.1 Materiale utilizate	19
	4.1.2 Pregătirea pentru sudare	23
	4.1.3 Cercetări preliminare pentru stabilirea regimului de sudare prin rezistență în relief	23
4.2.	Cercetări experimentale privind sudarea în relief în 5 puncte a componentelor din oțel	27
	4.2.1 Materiale utilizate	27
	4.2.2 Pregătirea probelor pentru sudare	28
	4.2.3 Sudarea probelor cu 5 proeminențe	28
4.3	Imperfecțiuni la sudare	30
Capitolul 5. Caracterizarea și testarea probelor sudate prin rezistență electrică în relief		33
5.1.	Analiza microscopică	33
	5.1.1. Analiza materialului de bază	33
	5.1.2 Analiza probelor sudate cu 3 proeminențe	35
5.2	Încercarea la rupere	41
	5.2.1 Rezultatele testului de tracțiune pentru probele sudate cu 3 proeminențe	43
	5.2.2 Rezultatele testului de tracțiune pentru probele sudate cu 5 proeminențe	43
5.3	Măsurări de duritate	44
Capitolul 6. Optimizarea procesului de sudare în relief		45
6.1	Aspecte generale	45
6.2	Realizarea probelor conform programului experimental optimizat	46
Capitolul 7. Concluzii și contribuții. Direcții ulterioare de cercetare		48
	Bibliografie	50

Capitolul 1 ELEMENTE GENERALE PRIVIND STADIUL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL SUDĂRII PRIN REZISTENȚĂ ELECTRICĂ

1.1 Aspecte generale privind sudarea prin presiune cu rezistență electrică în puncte

Sudarea prin presiune cu rezistență electrică în puncte (SPREP) este un procedeu care utilizează efectul rezistiv al curentului electric pentru încălzirea și topirea punctuală a două sau mai multe piese suprapuse, strânse cu o forță determinată între electrozii de contact. În zonele de de contact între suprafaţele pieselor se formează zone limitate de transfer rapid a curentului electric, iar rezistența mare de contact dintre acestea determină încălzirea și topirea zonei aflate sub electrozii de sudare. Indiferent de modul de prelucrare, suprafețele metalice ale componentelor nu sunt perfect plane, ci prezintă o anumită rugozitate.

Punctul de sudură care se obţine are o formă lenticulară, fiind situat în planul de separaţie al componentelor. După poziţia electrozilor de contact se deosebesc mai multe scheme posibile de sudare prin rezistență electrică. La sudarea prin rezistență electrică în puncte directă electrozii de contact sunt plasaţi pe părţile opuse ale componentelor (fig. 1.1)

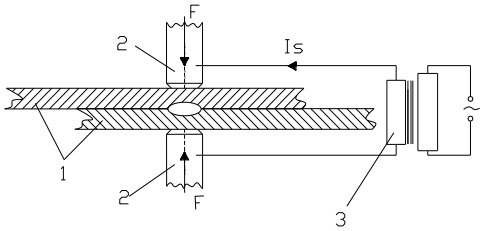


Fig.1.1*. Schema de principiu la sudarea directă prin presiune cu rezistență electrică în puncte. 1. componente de sudat; 2. electrozi de contact; 3. sursă de tensiune pentru alimentare cu curent de sudare [1].*

Zona de contact dintre electrod și tablă este un parametru foarte important care contribuie la obținerea unei calități corespunzătoare a sudurii, în corelație directă cu rezistența electrozilor [16-17]. Se pot analiza variațiile zonei de contact, observând variațiile rezistenței electrodului. Astfel, cu cât rezistența este mai mică, cu atât este mai mare zona de contact dintre componente.

Pentru a măsura rezistența de contact, dispozitivul de testare este conectat la cei doi electrozi, iar la aplicarea forței prescrise fără curgerea curentului, se înregistrează modificarea valorilor rezistenței. Cantitatea de căldură generată în zona punctului de sudură depinde de conductivitatea termică și rezistența electrică a metalului, precum și de timpul de menținere a curentului prin îmbinare [19-24]. Căldura generată prin efect Joule-Lenz poate fi exprimată prin ecuația:

$$\mathbf{Q} = \int_0^t \boldsymbol{R(t)I^2\,(t)dt} \qquad (1.1)$$

Sau prin ecuația simplificată:

$$\mathbf{Q = I^2RtK} \qquad (1.2)$$

în care „Q” este energie termică [kJ sau J], „I” curentul de sudare [A], „R” rezistența electrică totală [Ohm], „t” timpul de aplicare a curentului (se poate exprima în hertz, millisecunde sau microsecunde), K este o constantă termică ce depinde de geometria pieselor, modul de strângere și valoarea forței aplicate la sudare [25]. Pe lângă încălzirea prin efect Joule, în

procesul de sudare cu rezistență există și alte fenomene termoelectrice, cum ar fi efectul Peltier și efectul Thomson.

Rezistențele de contact între electrozi și piese, precum și între piesele suprapuse pentru sudare, de care depinde distribuția temperaturii la nivelul zonei de sudare, sunt: **RΩ** - rezistența ohmică a metalului de bază, **Rpp** - rezistența de contact dintre piesele de îmbinat, **Rcp** - rezistența de contact dintre electrozii din cupru și piesa. Din fig. 1.2 rezultă că **RΩ** crește cu temperatura, în timp ce rezistențele de contact între piesele de sudat (**Rpp**) și între electrodul de cupru și piesa (**Rcp**) scad rapid pe măsură ce crește temperatura pieselor.

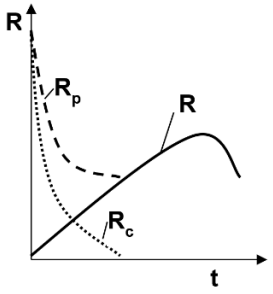


***Fig. 1.2**. Diagrama de variație a rezistențelor la sudarea prin rezistență în puncte.*

Zwolsman [30] a propus o relație pentru estimarea rezistenței de contact, astfel:

$$Rc = \frac{\rho}{2}\sqrt{\frac{\pi Hb(T_1-T)}{3F(T_1-T_2)}}\left(\frac{T}{T2}\right) \qquad (1.3)$$

În care Rc – rezistența de contact, ρ rezistivitatea electrică a materialului, Hb duritatea Brinell la temperatura camerei, F forța de apăsare, T temperatura de operare (K), T1 temperatura de înmuiere (K), T2 temperatura camerei.

Rezistențele de contact care se regăsesc în schema generală a unui proces de sudare prin rezistență electrică sunt reprezentate în fig. 1.3. Cantitatea mare de căldură localizată pe arii mici determină ”prăbușirea” punților inițiale și formarea unor noi vârfuri ale suprafețelor de contact, respectiv noi punți sau căi de curent suplimentare. Deoarece rezistivitatea metalului topit este mai mare decât cea a noilor punți solide, fluxul de curent se transferă mai ales pe acestea, iar procesul continuă până când întreaga interfață este ajunge în stare lichidă.

Rc_1 – rezistența de contact între suprafața electrodului superior și piesa superioară

Rc_2 - rezistența de contact între cele două piese suprapuse

Rc_3 - rezistența de contact între piesa inferioară și suprafața electrodului inferior

R_{B1} – rezistența electrică a electrodului superior; R_{B2} - rezistența electrică a piesei superioare; R_{B3} - rezistența electrică a piesei inferioare; R_{B4} - rezistența electrică a electrodului inferior.

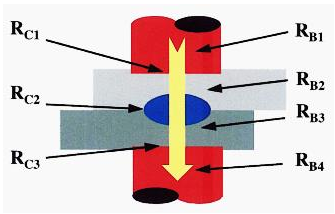


***Fig. 1.3**. Rezistențele electrice și de contact la sudarea prin rezistență în puncte [47].*

Urmează creșterea forței de apăsare a electrozilor pentru forjarea zonei topite. La oprirea curentului, metalul topit se solidifică rapid, formând punctul sudat.

Rezistența electrică totală (R_T) poate fi exprimată cu relația:

$$\mathbf{R_T} = \boldsymbol{R_C^1} + \boldsymbol{R_p} + \boldsymbol{R_C^2} \qquad (1.4)$$

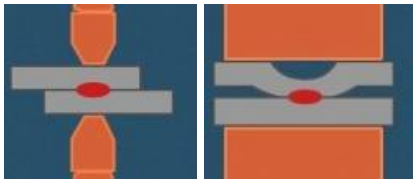
Unde R_C^1 este rezistența de contact între electrozii din cupru și suprafețele pieselor de sudat, R_C^2 este rezistența de contact dintre suprafețele pieselor, iar Rp este rezistența proprie a volumului materialului pieselor care este parcurs de curentul electric la sudare. Valoarea termenului R_C^2 poate fi influențată de gradul de curățire a suprafeței, de prezența unor straturi de acoperire, rugozitate etc. Valoarea rezistenței de contact dintre suprafețele pieselor crește la scăderea rugozității acestora [171], pentru celelalte condiții de lucru neschimbate, astfel:

100μΩ în cazul suprafețelor polizate sau lustruite;120μΩ în cazul suprafețelor prelucrate prin strunjire; 80000μΩ în cazul suprafețelor acoperite cu rugină sau alte impurități.

1.2. Sudarea prin presiune cu rezistență electrică în relief (SPRER)

Procedeul de sudare prin presiune cu rezistență electrică de contact ”în relief” (SPRER) este derivat din schema generală a sudării prin rezistență electrică în puncte (SPREP), cu deosebirea că, în acest caz, zonele de îmbinare au prevăzute nişte puncte de contact obținute prin deformarea locală a suprafeței (amprentare) cu scopul concentrării liniilor de curent în timpul sudării (fig. 1.4). Odată cu creşterea temperaturii până la temperatura de topire, datorită scăderii rezistenţei mecanice a materialelor, proeminenţele se aplatisează sub influenţa forţei de apăsare, şi sudarea decurge în continuare similar cu sudarea în puncte. Diferența principală la sudarea în relief este că se utilizează electrozi cu suprafaţă plană, care sunt racordaţi la secundarul transformatorului electric coborâtor de tensiune. Îmbinarea se formează în puncte distincte, determinate de existenţa unor proeminenţe, practicate pe una dintre componente. Pe suprafața proeminenţelor se realizează o concentrare a curentului electric şi a forţei de apăsare, care determină încălzirea şi deformatea rapidă a acestora.

Obţinerea unor îmbinări de calitate este condiţionată, în primul rând, de o realizare îngrijită a proeminenţelor şi de asigurarea curăţirii suprafeţelor, astfel încât curentul de sudare şi forţa de apăsare să se repartizeze cât mai uniform deasupra proeminenţelor.



a) în puncte *b) în relief*

***Fig. 1.4**. Comparație între schemele de principiu ale sudării prin presiune cu rezistență electrică de contact. a) în puncte; b) în relief [6].*

Sudarea în relief se aplică atât pentru componente groase cât și pentru asamblări diverse, între componente cu grosimi mici sau diferite. Pentru asigurarea echilibrului termic, componenta mai groasă este amprentată pentru a se obține zonele de concentrare ale curentului la sudare. Dimensiunile proeminențelor depind de grosimea și de valoarea rezistenței mecanice a componentelor.

În cazul componentelor groase, este mai dificil de prelucrat respectivele reliefuri, fiind necesare operații speciale de prelucrare. De aceea, în unele cazuri, se preferă realizarea de proeminențe pe componenta mai subțire. Proeminențele pot fi realizate astfel încât să permită sudarea mai multor zone ale piesei în același timp (fig. 1.5).

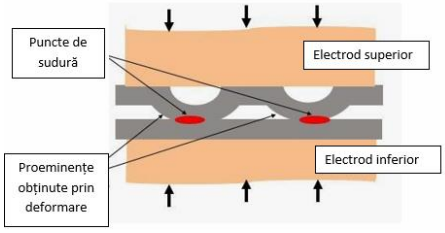


***Fig. 1.5**. Formarea simultană a mai multor puncte de sudură [8].*

În total, procedeul de sudare cu rezistență electrică în relief reprezintă 20-25% din aplicațiile de sudare prin rezistență existente în fabricație [17]. Deoarece încălzirea se concentrează la nivelul proeminențelor cu secțiune redusă, procesul de sudare necesită mai puțină energie și timp decât sudarea tradițională cu rezistență electrică în puncte. Metoda se poate aplica utilizând atât mașini individuale acționate manual, cât și sisteme cu acționare automată.

1.3. Avantaje și dezavantaje ale procedeului SPRER

Principalele avantaje ale procedeului de sudare prin presiune cu rezistență electrică în relief (SPRER) sunt:

- Calitatea sudurii este foarte bună și productivitatea procedeului este foarte mare, putând fi realizate simultan mai multe puncte de sudură (fig. 1.6);



a) b)

Fig. 1.6*. Asamblări realizate prin procedeul SPRER cu mai multe puncte simultan între componente din tablă. a) oțel aluminizat; b) aluminiu [6].*

- Productia poate fi mecanizată sau automată, pot fi realizate asamblări între componente cu grosimi diferite și geometrii diferite; procedeul nu are limitări de grosime a componentelor, poziționarea punctelor de îmbinare fiind opțiunea proiectantului, în funcție de rolul funcțional al asamblării;
- În condiții dificile de sudare efectele de încălzire a componentelor sudate sau de proiectare a stropilor metalici sunt mai reduse, deformarea acestora fiind diminuată;
- Consumul total de energie electrică necesar pentru sudare este mai scăzut comparativ cu procedeul SPREP, ceea ce aduce avantaje economice după implementarea sistemelor de sudare.

Ca dezavantaje pot fi enumerate următoarele:

- Nu toate cuplurile de tipurile de materiale pot fi sudate cu acest procedeu, grosimea sau compoziția chimică fiind uneori o problemă;
- Materialele care nu oferă o rezistență mecanică suficient de bună a proeminențelor nu pot fi asablate în condiții optime. De exemplu unele alame sau aliaje de cupru nu pot fi sudate în mod satisfăcător cu acest procedeu;
- Este necesar un procedeu de prelucrare suplimentară a uneia dintre componente în vederea obținerii proeminențelor cu dimensiuni suficiente pentru a se putea realiza punctele de sudură (costuri de producție și timp de operare suplimentari);
- Punctul de contact al proeminenței trebuie să fie cel puțin egal cu cea mai mică grosime a metalului care se sudează.

- Uneori aspectul punctelor sudate este inestetic, zonele sudate putând fi considerate concentratori de eforturi unitare sau de localizare a coroziunii.
- Electrozii cu care se sudează au suprafaţa de contact mare şi se pot depune straturi desprinse din piesele sudate, necesitând curăţiri periodice.

1.4 Controlul parametrilor de proces în timpul sudării

În aplicațiile de sudare prin presiune cu rezistență electrică în puncte, există o serie de metode utilizate pentru a monitoriza, controla și reacționa la variațiile normale ale procesului, materialelor și condițiilor de programare a echipamentului. Timpul efectiv de sudare poate fi mai lung (10 ms) decât timpul de deformare a proeminenței (5-6 ms). În acest timp, echipamentul pentru sudare trebuie să „monitorizeze" valoarea înălțimii proeminenței (0,5 - 1,0 mm), menținând în același timp valoarea forței de apăsare pentru sudare. În consecință, dificultatea principală este dată de capacitatea sistemului de control al valorilor parametrilor regimului de sudare de a se adapta continuu la modificările de rezistență electrică, nivel de deformare plastică și valoare a forței de apăsare, pentru a realiza o sudură cu calitatea necesară [4].

Forța de apasare trebuie menținută constantă pe toată perioada de sudare, dar poate fi crescută ușor în ultima parte a procesului, pentru a oferi un efect suplimentar de forjare. În funcție de dimensiunea și tipul materialelor sudate, timpul de sudare poate varia de la câteva milisecunde la 1 secundă (respectiv 50/60 cicluri) (fig. 1.7).

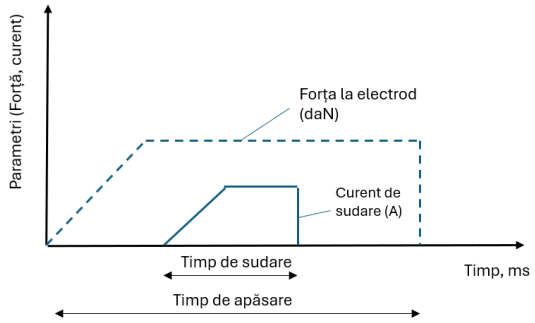


***Fig. 1.7**. Evoluția parametrilor de regim la sudarea în relief.*

Energia totală (Energie = Putere x Timp) poate fi aceeași pentru un proces de sudare plasat în cadranul II și IV, dar viteza de furnizare a energiei este esențială pentru sudarea în relief. Dimensiunea ferestrei de proces poate fi mărită prin selectarea corectă a materialelor (electrozi şi piese), proiectarea formei proeminențelor pieselor, alegerea echipamentelor de sudare și a valorilor parametrilor procesului de sudare. O fereastră mai largă de proces permite un proces robust care nu este sensibil la variațiile normale ale pieselor. Odată cu creşterea numărului de amprente (bosaje), curentul şi presiunea pe un bosaj scad.

În realitate, proeminențele nu se sudează simultan, iar distribuția presiunii şi curentului nu este uniformă. De exemplu, pentru o tablă din oțel cu grosime de 1 mm, apar următoarele valori ale parametrilor: pentru o proeminență curentul de sudare = 8000 A şi presiunea pe o proeminență = 480 kg, pentru 5 proeminențe curentul de sudare = 4600 A şi presiunea pe o proeminență 400 kg. La sudarea în relief a aluminiului, proeminențele se deformează foarte uşor în timpul sudării. Din această cauză, cilindrii pneumatici trebuie prevăzuţi cu un element elastic, plasat între cilindru şi electrod, care să compenseze prăbuşirea amprentelor.

Proeminențele se imprimă pe tabla mai groasă, dar dimensiunile acestora se aleg în funcție de grosimea tablei subţiri. Atunci când se sudează în relief componente care au diferite

grosimi, trebuie plasat un electrod cu conductivitate electrică mai scăzută pe zona componentei mai subțiri [40-42]. Pentru aprecierea gradului de pregătire al suprafețelor, rezistența de contact se poate măsura pe corpuri mici de probă, utilizând instalații speciale plasate în afara mașinii de sudat (fig. 1.8).



***Fig. 1.8**. Aparat pentru măsurarea valorilor rezistențelor electrice la sudarea în relief [25].*

1.5 Testarea nedistructivă și distructivă a punctelor la sudarea în relief

Examinarea nedistructivă poate fi aplicată pentru punctele sudate în relief utilizând metoda cu ultrasunete. Impulsul ultrasonic traversează complet nucleul sudat dintre cele două piese sudate, fiind recepționat de către transductor. În acest fel se verifică intergitatea și continuitatea zonei sudate. Dacă există un defect, unda reflectată va fi asimetrică, cu reflectare la adâncime sau distanță diferită față de valoarea normală (fig. 1.9). Sudarea prin puncte de rezistență este cel mai important proces de îmbinare utilizat în producția de masă a caroseriilor auto, fapt pentru care este necesară asigurarea unui nivel calitativ înalt al punctelor sudate [39].



***Fig. 1.9**. Examinarea nedistructivă a punctelor de sudură cu ultrasunete [26].*

Distribuția temperaturii poate fi calculată din analiza electro-termică pentru un anumit interval de timp, apoi se impune o valoare a sarcinii termice pentru modulul de analiză termomecanică [45, 46]. Această procedură se repetă, un anumit interval de timp (numit rată de reîmprospătare), până când întregul ciclu de sudare este complet finalizat (fig. 1.11).

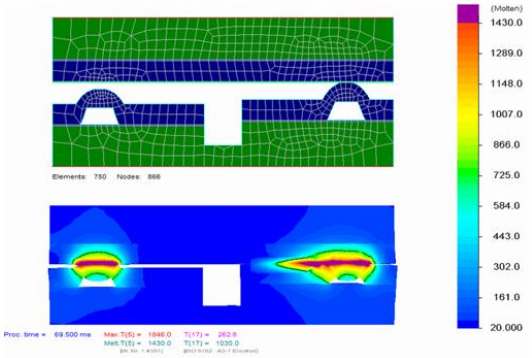


***Fig. 1.11**. Diagrama cu elemente finite a procesului de sudare în relief [28-29].*

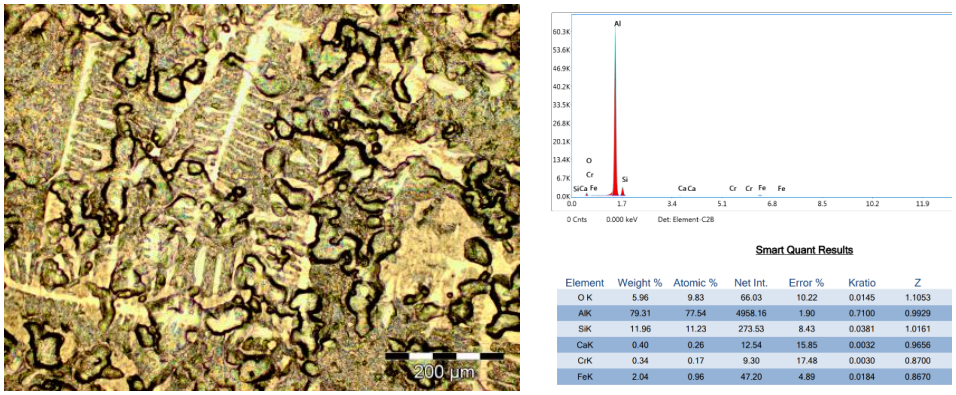
Capitolul 2 COMPORTAREA LA SUDAREA PRIN REZISTENȚĂ ELECTRICĂ A COMPONENTELOR SUBȚIRI DIN OȚEL

2.1 Factorii care influențează comportarea la sudarea prin rezistență electrică a oțelurilor

Componentele subțiri din oțel sunt adesea îmbinate cu procedeul de sudare prin rezistență electrică în puncte, deoarece diferența mare de rezistivitate electrică față de electrozii fabricați din cupru, permite o localizare optimă a zonei topite, la interfața dintre piese.

2.1.1 Straturile de protecție prezente pe suprafețele componentelor sudate

Aspectul suprafeței aluminizate depinde de procedeul de acoperire, grosimea depunerii, compoziția chimică a materialului depus și natura substratului (fig. 2.1.). În prezent, oțelul aluminizat este utilizat pe scară largă la fabricarea formelor pentru coacerea produselor de panificație. Stratul subțire de aluminiu alimentar îmbunătățește rezistența la coroziune și facilitează extragerea produselor din formele de copt. Conform analizei EDS efectuate pe suprafața tablei de oțel aluminizat, compoziția chimică conține (% de greutate): 79,31% Al; 11,96%Si; 2,04 Fe; 0,34%Cr; 0,40%Ca; 5,96%O [62-64] .



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z
O K	5.96	9.83	66.03	10.22	0.0145	1.1053
Al K	79.31	77.54	4958.16	1.90	0.7100	0.9929
Si K	11.96	11.23	273.53	8.43	0.0381	1.0161
Ca K	0.40	0.26	12.54	15.85	0.0032	0.9656
Cr K	0.34	0.17	9.30	17.48	0.0030	0.8700
Fe K	2.04	0.96	47.20	4.89	0.0184	0.8670

a) b)

Fig. 2.1. *Aspectul stratului aluminizat (a) și analiza EDS pe suprafața de acoperire (b) [36, 64].*

2.1.2 Viteza de răcire la sudare

Una dintre principalele probleme care apar la sudarea oțelurilor de mare rezistență este formarea martensitei în zonele încălzite peste temperaturile corespunzătoare punctelor de transformare, ca urmare a răcirii rapide. Pentru grosimi ale componentelor de până la 2 mm, punctul sudat se solidifică de obicei în mai puțin de trei până la patru cicluri de curent. Prin modelare, s-a demonstrat că, și la 500°C, vitezele de răcire la sudarea în puncte au depășit 1000°C/s [79]. Pentru oțeluri, viteza critică de răcire (v) necesară pentru obținerea martensitei în microstructură, este dată de ecuația:

$$\log v = 7{,}42 - 3{,}13\,C - 0{,}71\,Mn - 0{,}37\,Ni - 0{,}34\,Cr - 0{,}45\,Mo \qquad (2.1)$$

2.1.3 Regimul de sudare

Probleme frecvente la sudarea prin rezistență electrică sunt legate de expulzarea metalului topit dintre componente, în etapa de forjare, respectiv formarea de stropi sau acumulări la marginea punctului sudat. Acest fenomen se produce în cazul unor valori excesive ale forțelor de apăsare, la valori prea mari ale curentului și timpului de sudare, atunci când suprafețele nu sunt aliniate corespunzător sau există un joc prea mare între acestea, care permite scurgerea metalului lichid [62-64]. Creșterea valorii ***timpului de sudare*** determină creșterea dimensiunii nucleului topit. Odată cu creșterea curentului, căldura generată în volumul punctului de sudură va fi mai mare, dar, în același timp, creșterea presiunii la electrozi produce scăderea rezistenței de contact, care determină o scădere a cantității de căldură generată prin efect Joule și, în consecință, un volum mai redus al punctului de sudură [76].

Mărimea punctului sudat a reprezentat adesea o măsură a calității îmbinării, dar rezultatele obținute în urma studiilor au demonstrat că valori corespunzătoare ale forței de rupere a punctelor sudate pot fi obținute și în cazul unor suduri multi-punct, cu diametre reduse, la oțeluri cu conținut scăzut de carbon. Testele suplimentare, ca de exemplu încercările de rezistență la oboseală sau la impact, au confirmat aplicabilitatea realizării de îmbinări multi-punct [52]. Valori uzuale pentru diametrul mediu al punctului sudat sunt stabilite în funcție de grosimea componentelor, cu relația:

$$\mathbf{D = 4\sqrt{t}} \text{ sau } \mathbf{D = 5\sqrt{t}} \qquad (2.2)$$

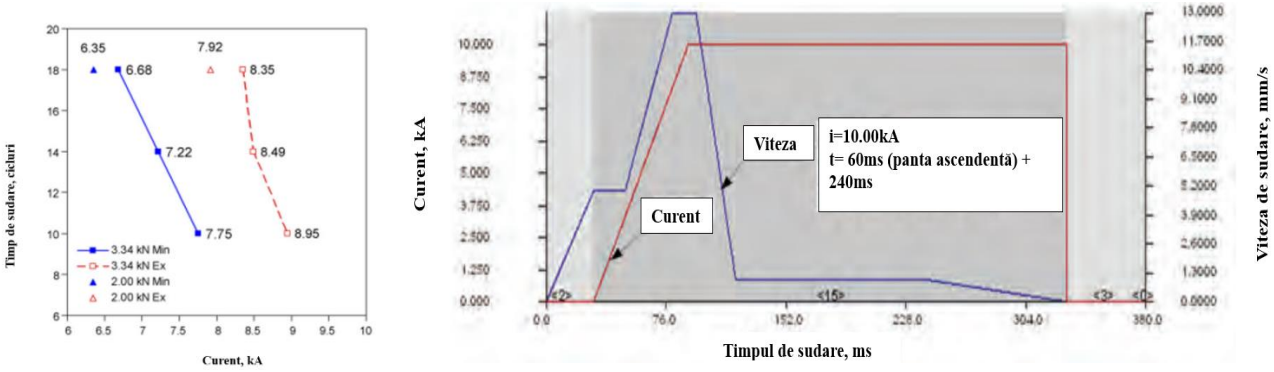
unde t este grosimea materialului, în mm [85]. La oțeluri, cele mai bune rezultate s-au obținut pentru valori ale lui $D = 2.7t + 1.6$ [94, 125].

Rezistența electrică de contact este un factor cheie în procesul de sudare prin rezistență electrică [86]. La scară microscopică, fenomenele de interfață depind de contactul între suprafețe, care adesea este imperfect, deoarece există rugozitate diferită, oxizi sau alte medii dielectrice care generează un efect de micro-constricție a liniilor de curent electric, ceea ce influențează cantitatea de căldură care se generează în micro volumele de material [87-89]. Starea suprafeței de contact introduce incertitudine la sudare, făcând dificilă măsurarea directă a rezistenței dinamice în tipul formării punctului sudat. Proiectarea modelului piesei reale utilizând o rețea neuronală artificială, a demonstrat că impedanța de intrare poate fi utilizată ca element de monitorizare a calității sudurii prin rezistență în puncte. Cu toate acestea, semnificația fizică a modificărilor impedanței de intrare în timpul unui proces de sudare este neclară și calcularea pașilor de impedanță de intrare este complexă și dificil de înțeles [90-91].

Forța de apăsare aplicată la electrod, intensitatea curentului și timpul sunt cei mai importanți parametri la sudarea prin rezistență electrică. Diametrul dorit al nucleului topit depinde de ajustarea corectă a intensității curentului de sudare în funcție de timp. Când timpul este scurt, diametrul nucleului scade, iar atunci când timpul este mare cantitatea de metal topit crește și metalul topit este proiectat în afara zonei de lucru, cu consecința scăderii rezistenței îmbinării [91-92]. Pentru a păstra condiții de încălzire uniformă, forța de apăsare a electrodului trebuie să crească treptat. Când forța este mai mare, se produce o scădere generală a rezistenței electrice dintre cei doi electrozi, care are ca rezultat o creștere a curentului de sudare. La valori

mari ale forței de apăsare rezultă o lățime mai mare a punctului și mai puține goluri în zona de fuziune.

Valoarea curentului de sudare este controlată cu ajutorul comutatorului transformatorului de curent, care determină cantitatea maximă de curent de sudare disponibilă. În fig. 2.4a se prezintă efectul curentului și al timpului de sudare asupra inițierii de expulzări ale picăturilor de metal din zona topită pentru două valori ale forțelor de apăsare aplicate la electrozi. Viteza de deplasare a electrozilor se alege în funcție de forța necesară și rezistența mecanică a materialelor sudate (fig. 2.2b).



a) b)

Fig. 2.2*. Dependența curent-timp la sudarea prin rezistentă electrică în puncte (a) [93]și la sudarea în relief (b)[98].*

Valoarea curentului de vârf Ip se atinge în câteva milisecunde, pe durata numită timp de creștere, tp. Timpul de sudare th este menținut până când curentul de vârf scade cu 50%, iar timpul total de sudare, tl, se menține până când curentul scade la 95% din valoarea maximă [100]. Conform modelului câmpului termic propus de Rosenthal, distribuția temperaturilor generate de o sursă de căldură în mișcare instantanee poate fi reprezentată de un punct aflat la suprafața topită (conducție termică 3-D), o linie (conducție termică 2-D), sau un plan (distribuția căldurii pe suprafață 1-D) care traversează toată grosimea componentelor, conform ecuației:

$$\boldsymbol{T = To + \frac{\left(\frac{Q}{d^{dim}}\right)}{\rho C(4\pi at)^{\frac{dim}{2}}} \exp\left\{-\left(\frac{r}{2a^{\frac{1}{2}}t^{\frac{1}{2}}}\right)2\right\}} \qquad (2.3)$$

în care Q este puterea sursei de căldură (în legătură directă cu curentul de sudare, I), d este grosimea materialului în mm, ρC este căldura specifică volumetrică, r este distanța de la sursa de căldură unde se determină temperatura T, T0 este temperatura inițială a materialului, t este timpul de sudare, „dim” reprezină numărul de dimensiuni (1 la 3) asociat sursei de căldură selectate.

2.2. Mecanismul formării punctului de sudură

La sudarea în relief (prin proiecție), dimensiunile proeminențelor se aleg în funcție de grosimea componentei mai subțiri, de tipul materialelor și de valoarea necesară a rezistenței de rupere a sudurilor. Amprentele se pot realiza cu poansoane calibrate, alegând o formă adecvată a vârfului acestora, în funcție de material.

Capitolul 3 OBIECTIVELE ȘI STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT. APARATURA DE CERCETARE

3.1 Obiectivele tezei de doctorat

Cercetările experimentale au urmărit proiectarea și obținerea unor seturi de îmbinări sudate în relief, utilizând cunoștințele acumulate în cadrul documentării și experimentării în producție, care au permis atingerea următoarelor obiective:

- Stabilirea regimului de sudare prin rezistență electrică în relief la îmbinări cu 3 sau 5 proeminențe sudate simultan, realizate între componente de tip tablă de oțel cu straturi de acoperire din aluminiu cu siliciu;
- Proiectarea și obținerea loturilor de probe sudate prin rezistență electrică în relief
- Caracterizarea și testarea probelor sudate utilizând metode distructive sau nedistructive;
- Publicarea de articole și participarea la manifestări științifice (conferințe, congrese, seminarii științifice) din domeniul ingineriei industriale;
- Acumularea de cunoștințe tehnice și dobândirea aptitudinilor de proiectare a regimurilor de sudare, de elaborare a documentației tehnice și de interpretare a rezultatelor, prin derularea unor programe experimentale și de testare efectuate în laboratoare de specialitate.

3.2 Structura tezei de doctorat

Teza de doctorat conține două mari părți, o parte teoretică ce include capitolele 1, 2 și 3, respectiv o parte experimentală, ce include capitolele 4, 5 și 6 (Fig. 3.1).

La aceste capitole principale se adaugă bibliografia, anexele ce cuprind documentația tehnologică de realizare prin sudare în relief a componentelor de tip tablă din oțel aliminizat, prezentarea parcursului științific al autorului și paginile de introducere.

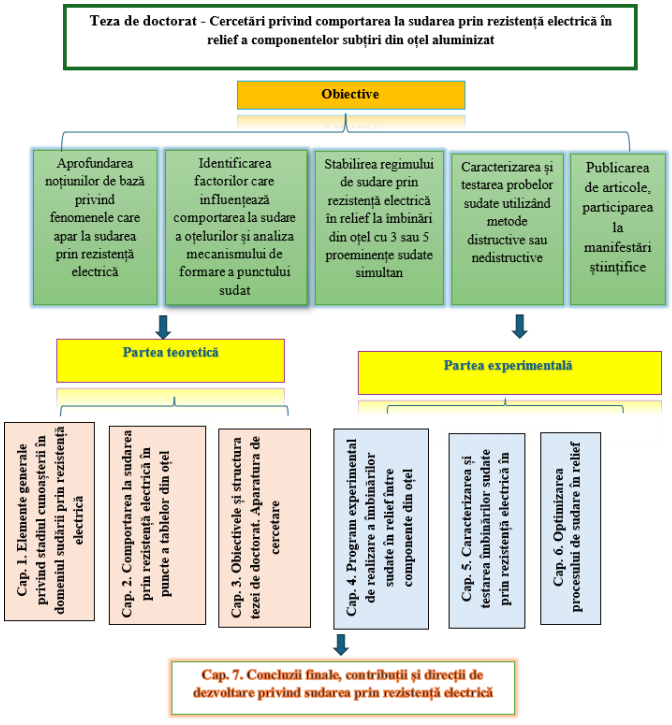
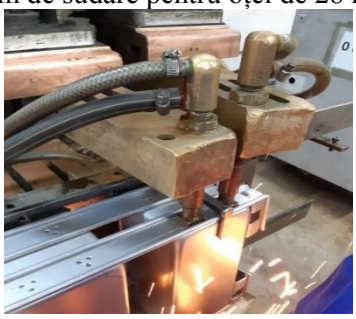
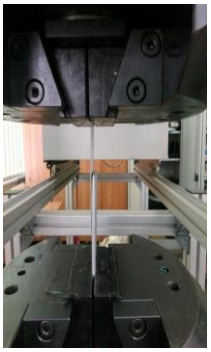


Fig. 3.1 Reprezentarea schematică a structurii tezei de doctorat

3.3 Aparatura de cercetare

Pentru realizarea obiectivelor propuse în cadrul tezei de doctorat s-au utilizat o serie de aparate, mașini și echipamente industriale, care sunt prezentate sintetic în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Aparatura de cercetare utilizată pentru efectuarea experimentelor

Denumire aparat, date tehnice	**Denumire aparat, date tehnice**
Mașina pentru sudare cu rezistență electrică prin proiecție TECNA Seria 8005D (putere maximă de sudare de 200 kVA, curent maxim de sudare pentru oțel de 28 kVA) 	Dinamometru hidraulic pentru măsurarea forței de apăsare la electrozi. Interval de măsurare: maxim 1600 daN. Interval recomandat de utilizare: 200-1400 daN. Cursa necesară a electrodului: mimim 20 mm 
Dispozitiv portabil de măsurare a parametrilor electrici și de timp la sudarea prin rezistență 20 Aparat AMADA WELD TECH MM-315B, dotat cu Monitor portabil, multifuncțional, măsoară curentul de sudare (kA), timpul/ciclurile de sudare (sec), nivelul de conducție electrică (deg), puterea (%).	
Mașina pentru încercarea la tracțiune/compresie „W + b” Walter + bai ag, Elveția, Laboratorul SIM, UPB  	Mașina pentru debitare de precizie a probelor metalografice IsoMet 4000. Laborator UPB. 
Mașina de înglobat la cald probe metalografice SimpliMet 3000. Laborator UPB.	Masina pentru lustruit probe metalografice, EcoMet 250 Pro. Laborator UPB.

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Sistem de curăţire ultrasonic UCI 50, Laborator LAMET, UPB
</td>
<td>Microdurimetru Shimadzu HMV 2TE, Japonia
Domeniul de măsurare: 98.07, 245.2, 490.3, 980.7mN, 1.96, 2.942, 4.903, 9.807, 19.61N.
</td>
</tr>
<tr>
<td>Microscop electronic de baleiaj, Inspect S, FEI, Olanda
Laboraor LAMET,UPB.Echipat cu analizor de compoziţie chimică EDS , AMRTEC tip Z2e
 </td>
<td>Microscop metalografic optic inversat, OLYMPUS GX51, Japonia, echipat cu software de prelucrare imagine AnalySIS
</td>
</tr>
<tr>
<td>Multimetru digital, High Resolution Milliohm Meter, cu rezoluţie sub 0,01m
</td>
<td>
Cuptor pentru tratemente termice Nabertherm LT 15/12/P320</td>
</tr>
</table>

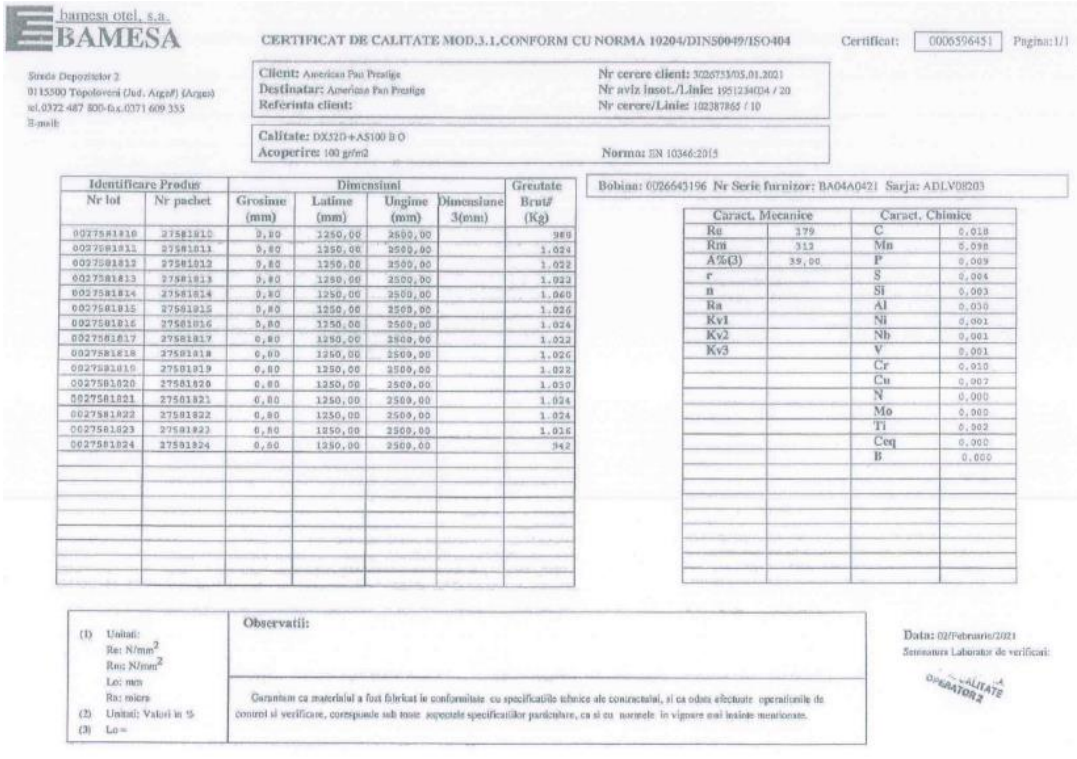
Capitolul 4 CERCETĂRI EXPERIMENTALE DE SUDARE ÎN RELIEF A COMPONENTELOR SUBȚIRI DIN OȚEL ALUMINIZAT

4.1. Cercetări experimentale de sudare prin rezistență electrică în relief cu 3 proeminențe a componentelor subțiri din oțel aluminizat

În acest capitol se analizează efectul parametrilor de proces asupra interfeței obținute cu ajutorul procedeului de sudare cu rezistență electrică prin proiecție (în relief). Se analizează în detaliu geometria zonelor sudate utilizând valori diferite ale parametrilor de sudare, cu evidențierea concentrației elementelor chimice și a fenomenelor asociate datorate compușilor intermetalici care apar pe interfața de sudare. Testele mecanice distructive au permis evaluarea efectului parametrilor de proces asupra caracteristicilor de rezistență ale îmbinărilor din oțel aluminizat sudate în relief.

4.1.1. Materiale utilizate

Piesele metalice care au făcut obiectul cercetărilor experimentale au fost fabricate din tablă de oțel cu continut scazut de carbon, deformabil, laminat și aluminizat (marca comerciala DX 52D conform EN 10154: 2002), cu grosimi de 0,8 și 1,2 mm. Conform certificatului de calitate al materialului (fig. 4.1), oțelul conține elemente precum Al, Cr, Cu, Mn, Si, Ti, Ni, Nb, V, N, C în cantități individuale sub 0,01%.



bamesa otel, s.a.
BAMESA

CERTIFICAT DE CALITATE MOD.3.1.CONFORM CU NORMA 10204/DINS00-09/ISO404 Certificat: 0006596451 Pagina:1/1

Sediu Depozitator 2
0115500 Topoloveni (Jud. Argeș) (Argeș)
tel.0372 487 800-fax.0371 609 355
E-mail:

Client: American Pan Prestige
Destinatar: American Pan Prestige
Referinta client:

Nr cerere client: 3026753/05.01.2021
Nr aviz însot./Linie: 1951234004 / 20
Nr cerere/Linie: 102387865 / 10

Calitate: DX52D+AS100 B O
Acoperire: 100 gr/m2
Norma: EN 10346:2015

Bobina: 0026543196 Nr Serie furnizor: BA04A0421 Sarja: ADLV08203

Identificare Produs		Dimensiuni				Greutate
Nr lot	Nr pachet	Grosime (mm)	Latime (mm)	Ungime (mm)	Dimensiune 3(mm)	Brut/ (Kg)
0027581810	27581810	0,80	1250,00	2500,00		989
0027581811	27581811	0,80	1250,00	2500,00		1.024
0027581812	27581812	0,80	1250,00	2500,00		1.022
0027581813	27581813	0,80	1250,00	2500,00		1.022
0027581814	27581814	0,80	1250,00	2500,00		1.060
0027581815	27581815	0,80	1250,00	2500,00		1.026
0027581816	27581816	0,80	1250,00	2500,00		1.024
0027581817	27581817	0,80	1250,00	2500,00		1.022
0027581818	27581818	0,80	1250,00	2500,00		1.026
0027581819	27581819	0,80	1250,00	2500,00		1.022
0027581820	27581820	0,80	1250,00	2500,00		1.050
0027581821	27581821	0,80	1250,00	2500,00		1.024
0027581822	27581822	0,80	1250,00	2500,00		1.024
0027581823	27581823	0,80	1250,00	2500,00		1.026
0027581824	27581824	0,80	1250,00	2500,00		942

Caract. Mecanice		Caract. Chimice	
Re	179	C	0,018
Rm	313	Mn	0,098
A%(3)	39,00	P	0,009
r		S	0,004
n		Si	0,003
Ra		Al	0,030
Kv1		Ni	0,001
Kv2		Nb	0,001
Kv3		V	0,001
		Cr	0,010
		Cu	0,007
		N	0,000
		Mo	0,000
		Ti	0,002
		Ceq	0,000
		B	0,000

(1) Unitati:
Re: N/mm2
Rm: N/mm2
Lo: mm
Ra: micro
(2) Unitati: Valori in %
(3) Lo =

Observatii:

Garantam ca materialul a fost fabricat in conformitate cu specificatiile tehnice ale contractului, si ca odata efectuate operatiunile de control si verificare, corespunde sub toate aspectele specificatiilor particulare, ca si cu normele in vigoare mai jos/mai mentionate.

Data: 02/Februarie/2021
Semnatura Laborator de verificari:

CALITATE OPERATOR 2

Fig. 4.1 *Certificat de calitate al materialului de bază – oțel nealiat laminat și aluminizat.*

Elementele însoțitoare (S, P) au avut concentrații foarte reduse (S sub 0,004% și P sub 0,009%). Judecând după valorile scăzute ale elementelor de aliere și respectiv al carbonului echivalent (relația 4.1), se poate considera că oțelul are o sudabilitate prin topire excelentă.

$$Ce = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+V+Mo}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} = 0{,}037[\%] \qquad (4.1)$$

Ce = 0,018 + 0,098/6 + (0,01+0,001)/5 + (0,007 + 0,001)/7 = 0,037

Viteza critică de răcire (v) necesară pentru obținerea martensitei în microstructură (Cap. 2, ecuația 2.1) este:

$$\log v = 7{,}42 - 3{,}13\,C - 0{,}71\,Mn - 0{,}37\,Ni - 0{,}34\,Cr - 0{,}45\,Mo = 1{,}986\ ^{o}C/sec \qquad (4.2)$$

Această valoare este destul de mică, ceea ce înseamnă că nu sunt condiții pentru apariția martensitei. Stratul superficial depus prin aluminizare conține unele elemente precum Si (0,5%), Fe (0,7%), Ti (0,1%), Mn (0,9 -1,5%), Zn (0,2%), Zr (0,1%), Mg (0,3%), asa cum rezultă din certificatul de analiză chimică furnizat de compania ThyssenKrupp (fig. 4.2).

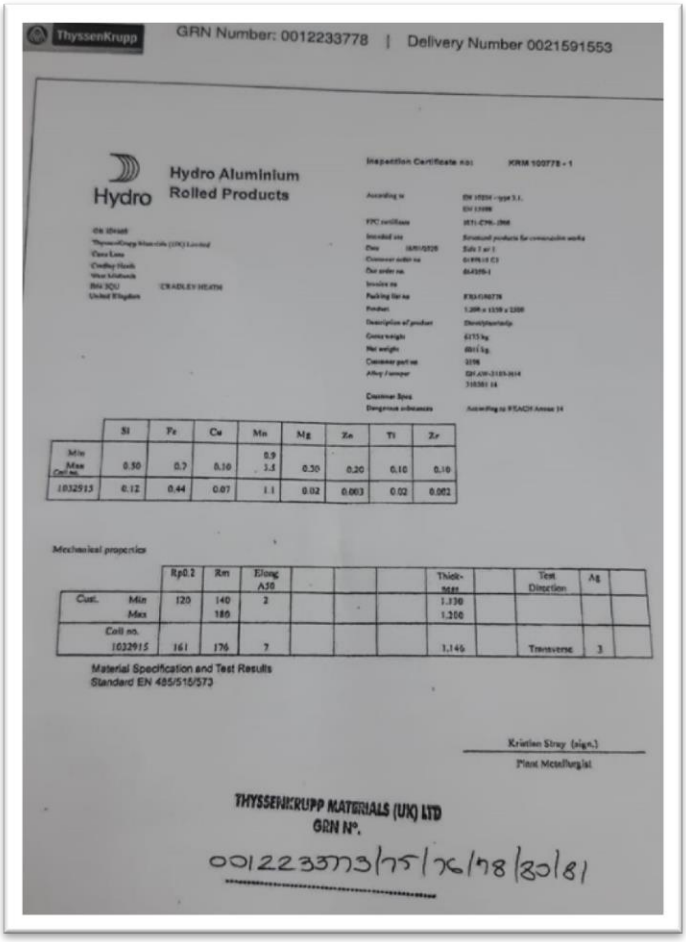
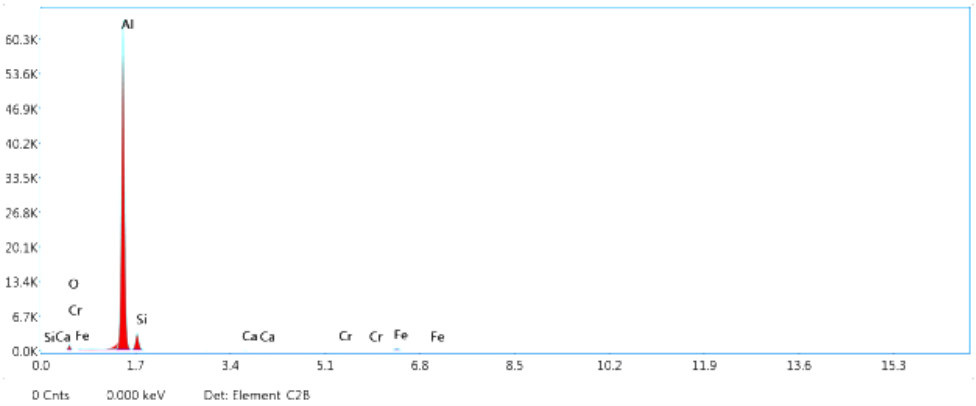


Fig. 4.2 *Certificat de calitate al stratului depus cu aluminiu alimentar pe tabla din oțel.*

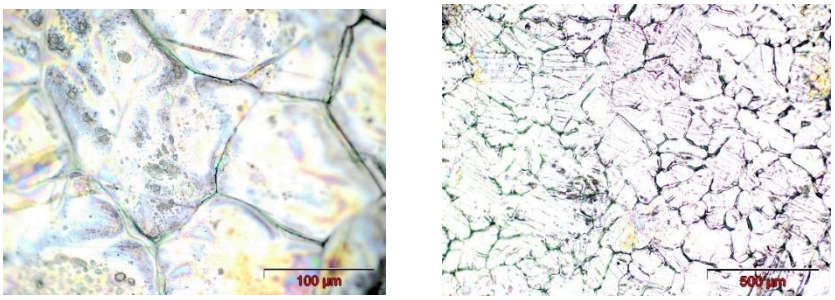
Analiza efectuată cu ajutorul metodei EDAX, utilizând microscopul electronic de baleiaj Inspect S, echipat cu senzor AMETEC Z2e, a indicat prezența principalelor elemente din stratul depus prin aluminizare, printre care și oxigenul (existent sub formă de oxid de aluminiu) (fig. 4.3). Conform analizei EDS efectuate pe suprafata tablei de oțel aluminizat, compoziția chimică conține (% de greutate): 79,31% Al; 11,96%Si; 2,04 Fe; 0,34%Cr; 0,40%Ca; 5,96%O. Compoziția chimică conform standardului de produs pentru oțelul DX52D (1.0350, EN 10154: 2002 Eng. Continuously hot-dip aluminium-silicon (AS) coated steel strip and sheet – Bandă și tablă de oțel acoperite cu aluminiu și siliciu (AS) prin scufundare la cald) este (conform Eng.Technical delivery conditions – condiții tehnice de livrare, EN 10346-2009): C=max. 0,12%; Si=max. 0,5%; Mn=max. 0,6%; P=max. 0,1%; S=max. 0,045%; Ti=max. 0,3% [17]. Proprietățile mecanice ale materialului sunt: limita de rupere Rm= 270-420 MPa, limita de curgere $Rp_{0,2}$ = 140 – 300 MPa, alungirea la rupere A_{50} = 26%. Deși suprafața aluminizată este mai rugoasă și neregulată față de cea acoperită cu Zn (fig. 4.4), stratul subțire de aluminiu alimentar îmbunătățește rezistența la coroziune și facilitează extragerea produselor din formele de copt. În timpul sudării, învelișul aluminizat poate suferi diverse modificări ale grosimii, efecte de vaporizare sau expulzare de pe suprafețe, precum și formarea de fisuri sau aglomerări la marginea punctelor sudate [35] (Fig. 4.5).



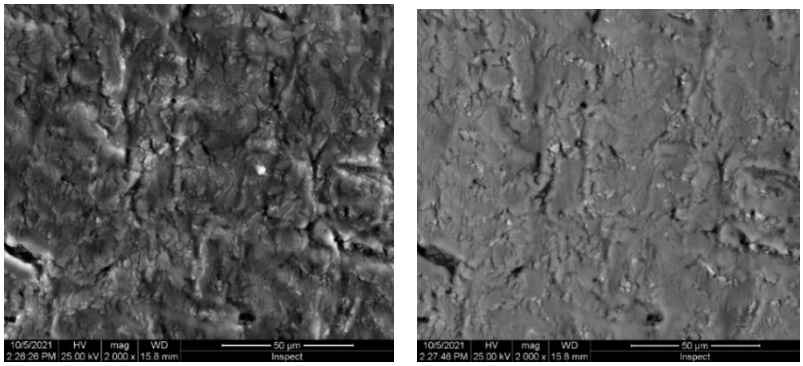
Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	5.96	9.83	66.03	10.22	0.0145	1.1053	0.2195	1.0000
AlK	79.31	77.54	4958.16	1.90	0.7100	0.9929	0.9003	1.0016
SiK	11.96	11.23	273.53	8.43	0.0381	1.0161	0.3137	1.0005
CaK	0.40	0.26	12.54	15.85	0.0032	0.9656	0.8294	1.0129
CrK	0.34	0.17	9.30	17.48	0.0030	0.8700	0.9601	1.0497
FeK	2.04	0.96	47.20	4.89	0.0184	0.8670	0.9848	1.0591

Fig. 4.3 *Analiza ADS de micro-compoziție chimică locală pe suprafața tablei de oțel aluminizat.*



a) Tablă zincată



b) Tablă aluminizată

Fig. 4.4 *Imagini de microscopie electronică SEM de pe suprafața oțelului aluminizat. a) tablă zincată; b) tablă aluminizată. Laborator LAMET.*

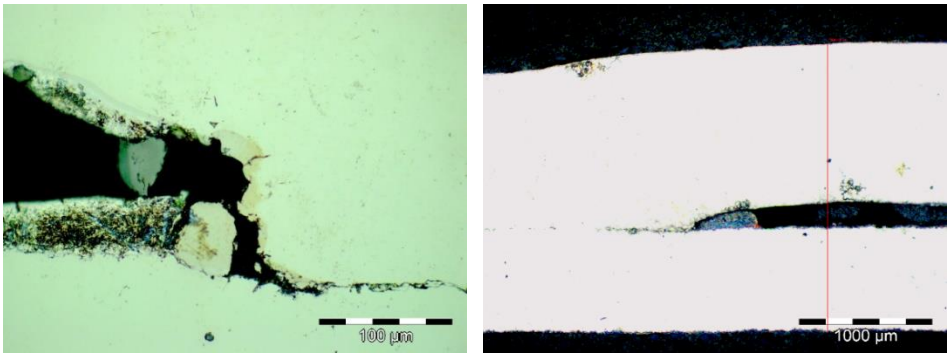


Fig. 4.5 *Defecte de tip aglomerare de compuși și expulzare la marginea punctelor sudate, fisuri sau lipsă de aderență la sudarea în relief a unor table de oțel aluminizate. Laborator LAMET.*

Din acest motiv, în cazul pieselor aluminizate este necesară efectuarea unui set mai mare de probe sudate și teste pentru validarea tehnologiei de sudare și alegerea valorilor optime ale parametrilor de sudare, comparativ cu cele neacoperite. Analiza optică a microstructurii suprafeței de oțel aluminizat indică formațiuni dendritice de aluminiu alfa și compuși interdendritici alcătuiți din elementele de aliere (Fig. 4.6). Piesele care au fost realizate în cadrul programului experimental au fost debitate din tablă de oțel aluminizat cu grosimi cuprinse între 0,8 și 1,2 mm, având lățimi de 32 mm și lungimi de 150 mm.

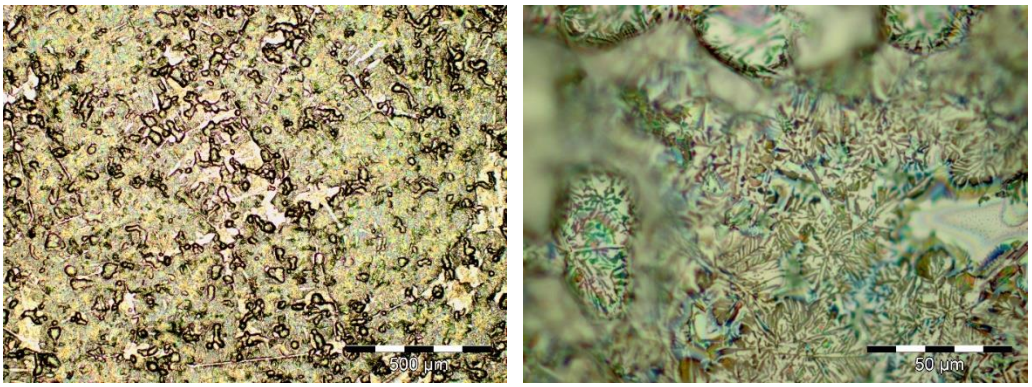


Fig. 4.6 *Aspectul suprafețelor tablelor aluminizate. Microscopie optică. Laborator LAMET.*

4.1.2 Pregătirea pentru sudare

Pentru primul set de experimente, trei proeminențe (1,56 mm înălțime și 5 mm diametru de bază) au fost realizate simultan pe tablele de 1,2 mm grosime, dispuse la distanțe echidistante de 10±0,1 mm, folosind un poanson cu 3 pini și o matriță din oțel pentru scule (fig. 4.7).

S-a ales configurația semi-sferică a amprentelor, pentru asigurarea unor condiții bune de deformare și pentru reducerea efectelor concentratorilor de tensiune. Proeminențele au fost imprimate folosind o presă pneumatică de atelier (WC67Y, Shanghai, China) de 2000 kN, în timp de aproximativ 1,5 -1,6 secunde per operație (fig. 4.8).

Suprafețele probelor au fost apoi curățate cu etanol și uscate, pentru evitarea contaminării înainte de sudare.

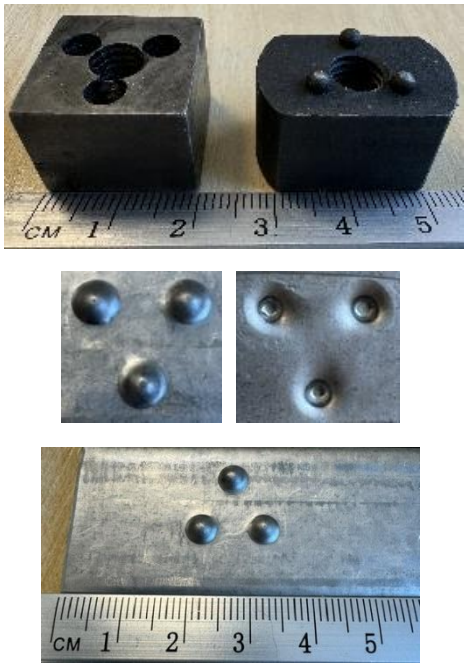


Fig. 4.7 *Matrița și poansonul utilizate pentru executarea proeminențelor și aspectul proeminentelor imprimate pe suprafata tablei (față și verso).*

4.1.3 Cercetări preliminare pentru stabilirea regimului de sudare prin rezistență în relief

Proiectarea regimului termic a avut în vedere efectele principalilor parametri asupra topirii și solidificării punctului de sudură. Curentul de sudare are o influență majoră asupra rezistenței la tracțiune și la forfecare, în timp ce timpul de sudare și diametrul electrodului au efecte secundare. Rezistența îmbinării și extinderea zona punctului de sudură cresc odată cu creșterea curentului de sudare până la valoarea maximă [142]. Creșterea valorii durității zonei de îmbinare este cauzată de formarea compușilor sau a fazelor dure, ca urmare a aportului concentrat de căldură și a răcirii rapide după sudare [143].

Pentru sudare a fost utilizată un aparat pentru sudare electrică prin rezistență TECNA Seria 8005D (Ohio, SUA) (putere maximă de sudare 200 kVA, curent maxim de sudare pentru oțel 28 kVA). Pentru programul experimental s-au folosit electrozi de perechi RWMA Clasa III cu fața plată din cupru de puritate 99,995%, având o suprafață de lucru de 25x25mm (Cap. 3, tab. 3.1).

Mașina pentru sudare prin rezistență electrică și presiune Tecna 8005D este un echipament de curent alternativ monofazat. Aceasta dispune de sisteme de alimentare cu curent și posibilități de automatizare, putând fi integrată într-o celulă robotizată care să permită creșterea productivității și o foarte bună reproductibilitate a proceselor de sudare. Mașina este echipată cu sisteme de comandă manuale sau automate, care permit realizarea atât a operațiilor manuale cât și în regim mecanizat sau robotizat, dispune de accesorii și sisteme de sudare monofazate, pentru lucrul în curent continuu trifazic și surse de sudare de tip invertor.

Pentru programul de experimentări s-au utilizat perechi de electrozi fabricați din cupru, cu fața plată și având suprafața de lucru de 25x25mm (fig. 4.9) sau diametru de 25 mm.

Lungimea fiecarei probe a fost de 150mm, iar lungimea de suprapunere pentru sudare a fost de 52mm. S-au ales aceste valori ale lungimii pentru a se putea realiza ulterior încercarea de rupere prin tractiune. La primul set de probe sudate prin proiecție s-a utilizat semifabricat de tip tablă cu grosimea peretelui de 0,8 ±0,1mm, care s-a asamblat cu tablă având grosimea de 1,2±0,1mm. Pe tablele cu pereți mai groși au fost realizate trei proeminențe, dispuse la distanțe relativ egale, de aproximativ 10 mm, pentru a asigura contactul în trei puncte cu banda de rigidizare. Probele fost sudate folosind valorile parametrilor de regim stabiliți prin încercări (fig. 4.8). În primul set de experimente, s-au efectuat un număr de 3 puncte sudate simultan, pentru a obține un contact ferm între cele două suprafețe ale pieselor sudate (fig. 4.9). Tablele au fost suprapuse pe o lungime de 52 mm, pentru limitarea efectelor de împroșcare cu stropi de metal topit care apar la forjarea punctului de sudură. Lungimea minimă de spurapunere pentru regimurile moi se stabilește cu relația:

$$\mathbf{L_{sup} = 1+14{,}4\sqrt{t}} \qquad (4.3)$$

În care t este grosimea celei mai subțiri componente. Conform acestei relații, lungimea de suprapunere ar fi trebuit să fie de minim 16,77mm, pentru realizarea unui singur punct de sudură.



Fig. 4.8 *Electrozi pentru sudarea în relief.*

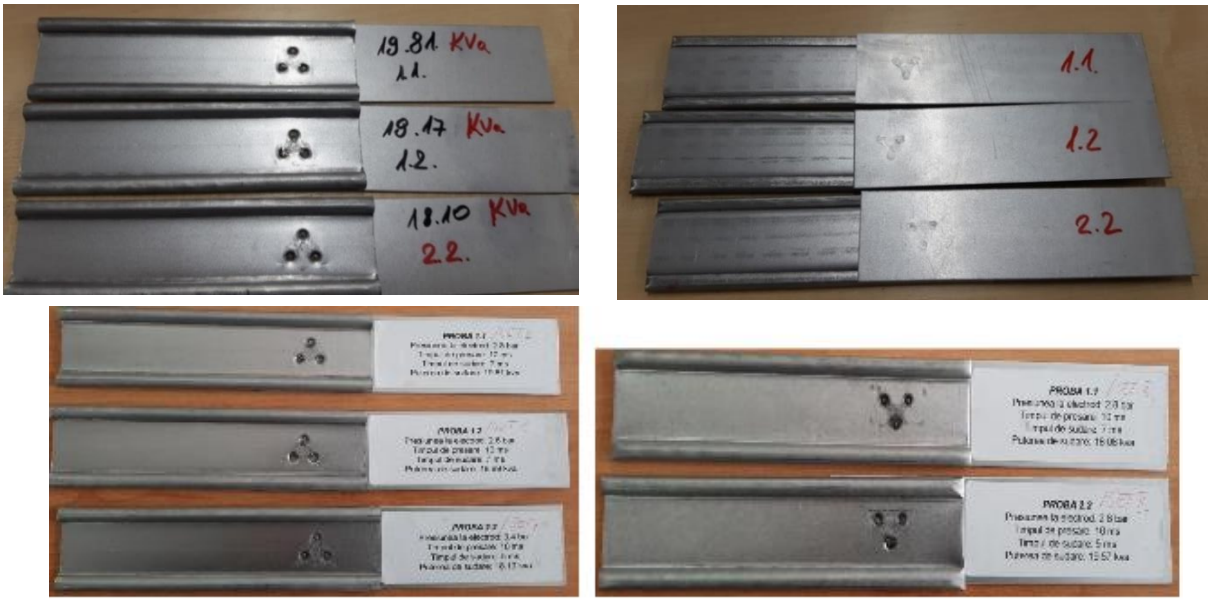


Fig. 4.9 *Seturi de probe sudate utilizând procedeul prin rezistență electrică în relief (față/verso).*

Pentru 3 puncte repartizate echidistant (distanta între puncte alăturate de 10mm), lungimea de suprapunere ar trebui să fie de minim 33,54mm (fig. 4.10). Ca urmare, lungimea adoptată asigură cele mai bune condiții de formare a punctelor.



Apăsare componente *Sudarea propriu-zisă*

Fig. 4.10 *Secvențe din procesul de sudare prin rezistență electrică în relief a probelor cu 3 proeminențe utilizând 2 perechi de electrozi simultan.*

Valorile parametrilor regimului de sudare sunt prezentate în tabelul 4.1. Au fost studiați cei trei factori principali ai regimului de sudare prin proiecție: forța de presare, puterea electrică și timpul de sudare. Forța de presare trebuie setată pentru a realiza doar o deformare mică la vârful proeminenței înaintea trecerii curentului prin îmbinare. Forța de apăsare poate fi menținută constantă pe toată perioada de sudare sau poate fi ușor crescută, în ultima parte a procesului, pentru a oferi un efect de forjare. Pentru valori mici ale parametrilor putere și timp de sudare, rezistența la forfecare a sudurilor a fost scăzută. Alegerea unor valori mari ale puterii și timpului

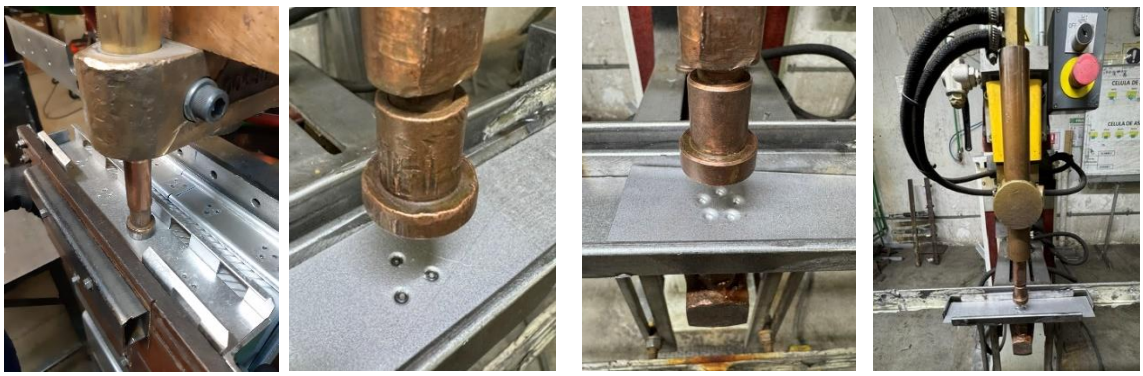
de menținere în timpul sudării duce la încălzirea și topirea excesivă a materialului, ceea ce poate cauza deformarea sau perforarea excesivă a peretelui probei [28, 43, 130].

Pentru a studia efectul valorilor parametrilor regimului de sudare s-au realizat probe sudate cu diferite valori ale acestora, care sunt prezentate în Tabelul 4.1. Într-o primă etapă s-a urmărit analiza efectului parametrilor de regim la sudarea în relief asupra rezistenței punctelor de sudură. Timpul de presare a fost menținut la aceeași valoare pentru toate cele 3 seturi de probe sudate (10 ms), în timp ce timpul de sudare s-a modificat de la 5 la 7 secunde. Presiunea cu care au fost apăsați electrozii pe cele 2 table a fost crescută de la 2,6 la 2, 8 și respectiv la 3,4 bar. Valoarea puterii la sudare a crescut progresiv de la valoarea minimă de 18,10 kVA la 19,18 kVA și apoi la 19,81 kVA.

Tabelul 4.1. Valorile parametrilor regimului de sudare în relief (loturile 1 și 2)

Proba	SET	Presiunea la electrod, bar	Timpul de presare, ms	Timpul de sudare, ms	Puterea la sudare, kVA
1.1	1	2,8	10	7	19,81
1.2	1	2,6	10	7	19,18
2.2	1	3,4	10	5	18,10
1.1	2	2,8	10	7	18,08
2.2	2	2,8	10	5	19,57

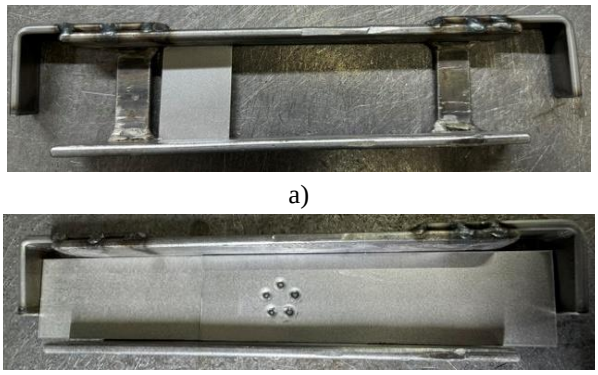
După ce s-au realizat primele seturi de probe cu 3 proeminențe, s-a trecut la execuția seturilor de probe cu 5 proeminențe sudate simultan. Pentru a se putea analiza comparativ rezultatele din cele 2 situații diferite, s-au efectuat noi seturi de probe sudate cu 3 proeminențe dar utilizând câte o singură pereche de electrozi (fig. 4.11a) și apoi în condiții similare, s-a efectuat un nou set de probe sudate cu 5 proeminențe, pentru care s-au păstrat aceleași valori ale regimuluui de sudare (fig. 4.11b).



a) b)

Fig. 4.11*. Imagini din timpul programului experimental de sudare a probelor cu regimuri optimizate. a) cu 3 proeminențe; b) cu 5 proeminențe.*

Așa cum se poate observa din fig. 4.12, de această dată, s-a proiectat și realizat un dispozitiv de poziționare și fixare a probelor în timpul sudării, care nu permite deplasarea sau decalarea acestora în timpul formării punctelor de sudură.



a)

b)

Fig. 4.12*. Dispozitivul proiectat pentru sudarea probelor prin rezistență în relief: a) fară probe; b) cu probe sudate.*

b)

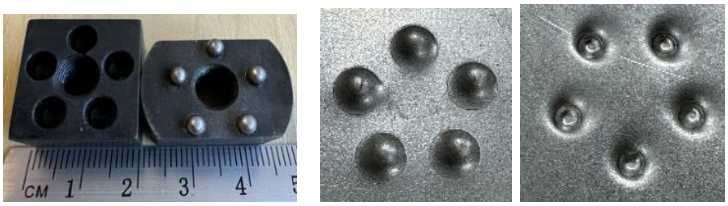
4.2. Cercetări experimentale de sudare în relief cu 5 puncte a componentelor subțiri din oțel aluminizat

4.2.1. Materiale utilizate

Pentru acest set de experimentari s-au utilizat aceleași tipuri de materiale utilizate la cap. 4.1, respectiv oțel moale laminat aluminizat cu grosimi de 0,8 și 1,2mm. Pentru realizarea probelor sudate s-au debitat benzi cu lățime de 35 mm și lungime de 150 mm.

4.2.2. Pregătirea probelor pentru sudare

Pornind de la rezultatele obținute în prima parte a programului experimental s-au proiectat și obținut probe la care s-au realizat 5 proiecții (proeminențe). Pentru aceasta, s-a proiectat și realizat o matriță cu 5 proeminențe. Dimensiunile proeminențelor au fost: înălțimea de 1,55±0,1mm si diametrul la baza de 5±0,1mm (fig. 4.13) și s-au amprentat doar benzile din materialul de bază având grosimea de 1,2mm. Proeminențele au fost dispuse echidistant, intr-un cerc cu diametrul de circa 13±0,1mm. Înainte de sudare, probele au fost curățate și uscate pentru îndepărtarea contaminanților proveniți din procesul de amprentare la rece.



a) b)

Fig. 4.13*. Matrița pentru amprentarea tablelor (a) și aspectul/dispunerea proeminențelor pe semifabricatul de tip tablă aluminizată (b).*

4.2.3 Sudarea probelor cu 5 proeminențe

Pentru sudare, proba mai subțire s-a așezat pe electrodul inferior, iar proba mai groasă, cu proeminențe îndreptate spre placa de jos, a fost plasată deasupra acesteia (fig. 4.14). Dimensiunile efective ale proeminențelor realizate pe componenta cu grosimea de 1,2 mm sunt prezentate în tabelul 4.2. Imprimarea proeminențelor s-a realizat prin ambutisare pe componenta cu grosime mai mare (1,2mm) pentru a asigura o mai bună rezistența la deformarea plastică la cald ce apare în timpul sudării. Dacă rezistența la cald a materialului este redusă, punctele sudate tind să colapseze mai repede în timpul încălzirii rapide sub efectul rezistiv al curentului electric, devenind plate înainte de a se forma nucleul topit. Din această cauză, rezistența finală a punctelor sudate poate fi redusă semnificativ.

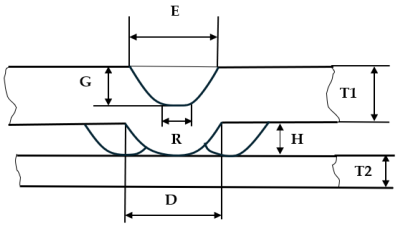


***Fig. 4.14**. Schema de așezare a componetelor pentru sudarea prin proiecție.*

Tabelul 4.2. Dimensiunile proeminențelor* [mm]

Nr. proeminențe	T1/ T2	G	D	H	E	R
3	1,2 / 0,8	2	4	1,60	4,20	1,5
5	1,2 / 0,8	2,3	5,6	1,80	5,8	2

*Precizia de măsurare ± 0,01mm

La sudarea probelor s-a utilizat aceeași mașină TECNA Seria 8005D (fig. 4.15) și perechea de electrozi din cupru cu suprafață plană, dar s-au ales diferite valori ale parametrilor regimului de sudare (Tabelul 4.2).

Probele s-au suprapus tot pe o lungime de 52 mm. De această dată, s-au utilizat benzi fără margime îndoită, fără a mai fi utilizat un dispozitiv special de ghidare, ceea ce a determinat o ușoară dezaxare (rotire față de axa piesei fixe) la sudare. La acest set de probe, pentru un grup de 2 sau 3 piese, s-a modificat doar valoarea unui singur parametru al regimului de sudare, în timp ce toți ceilalți s-au menținut la valori egale.

Parametrii de sudare au efecte diferite asupra diametrului punctului sudat, a gradului de extindere a ZIT-ului, a adâncimii amprentei care se formează deasupra punctului de sudură, a diametrului amprentei și gradului de reducere a grosimii materialului în zona de sudare [144-148, 152]. De aceea, la stabilirea valorilor parametrilor de sudare s-au avut în vedere rezultatele obținute în programul experimental anterior, când s-au realizat probe sudate cu 3 proeminențe (Tabelul 4.3, fig. 4.16). S-a menținut constantă valoarea timpului de apăsare (10 ms) dar s-a variat timpul de sudare (de la 5 la 7 ms), în timp ce puterea a avut valori de la minim 17,7 kVA la maxim 20,5 kVA.

Presiunea la electrod a avut valori diferite, adaptate valorilor parametrilor electrici. S-au realizat probe cu valori mari ale presiunii (4 – 5 bar), precum și probe cu valori mici și medii (2,8

bar respectiv 3,4 bar). Presiunea la electrod pentru oțelul carbon/regim moale se recomandă a fi în domeniul de valori (7-12) daN/mm^2 iar forța de apăsare F în domeniul de valori (50-250)t, respectiv minim 60 – 300 daN [171]. Domeniul de valori ales pentru parametrii regimului de sudare utilizat în cadrul setului final de probe cu 3 sau 5 proeminențe s-a stabilit prin optimizarea cu metoda Taguchi. Limitele superioare și inferioare ale domeniilor de valori pentru cei 3 parametrii de sudare (Putere, timp de sudare și forță de apăsare) s-au stabilit pe baza încercărilor anterioare, astfel încât să se asigure cerințele de proiectare a matricei ortogonale de factori care influențează regimul de sudare.

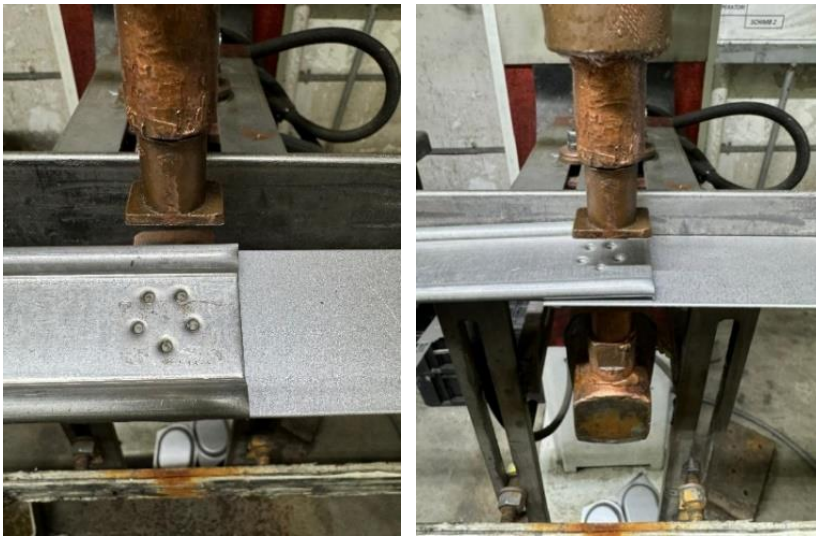


Fig. 4.15 *Realizarea probelor sudate prin rezistență electrică în relief cu 5 proeminențe.*

Tabelul 4.3. Parametrii regimului de sudare pentru setul de probe cu 5 proeminențe

Proba	**SET**	**Presiunea la electrod, bar**	**Timpul de apăsare, ms**	**Timpul de sudare, ms**	**Puterea la sudare, kVA**
0.1	0	5	10	7	19,5
0.2		4	10	7	19,5
1.1	1	2,8	10	5	19
1.2		2,8	10	7	19,6
1.3		2,8	10	5	20,5
2.1	2	3,4	10	5	17,7
2.2		3,4	10	7	19,4
2.3		3,4	10	7	17,8
3.1	3	2,8	10	5	19,4
3.2		2,8	10	5	18,9
3.3		2,8	10	5	20,5

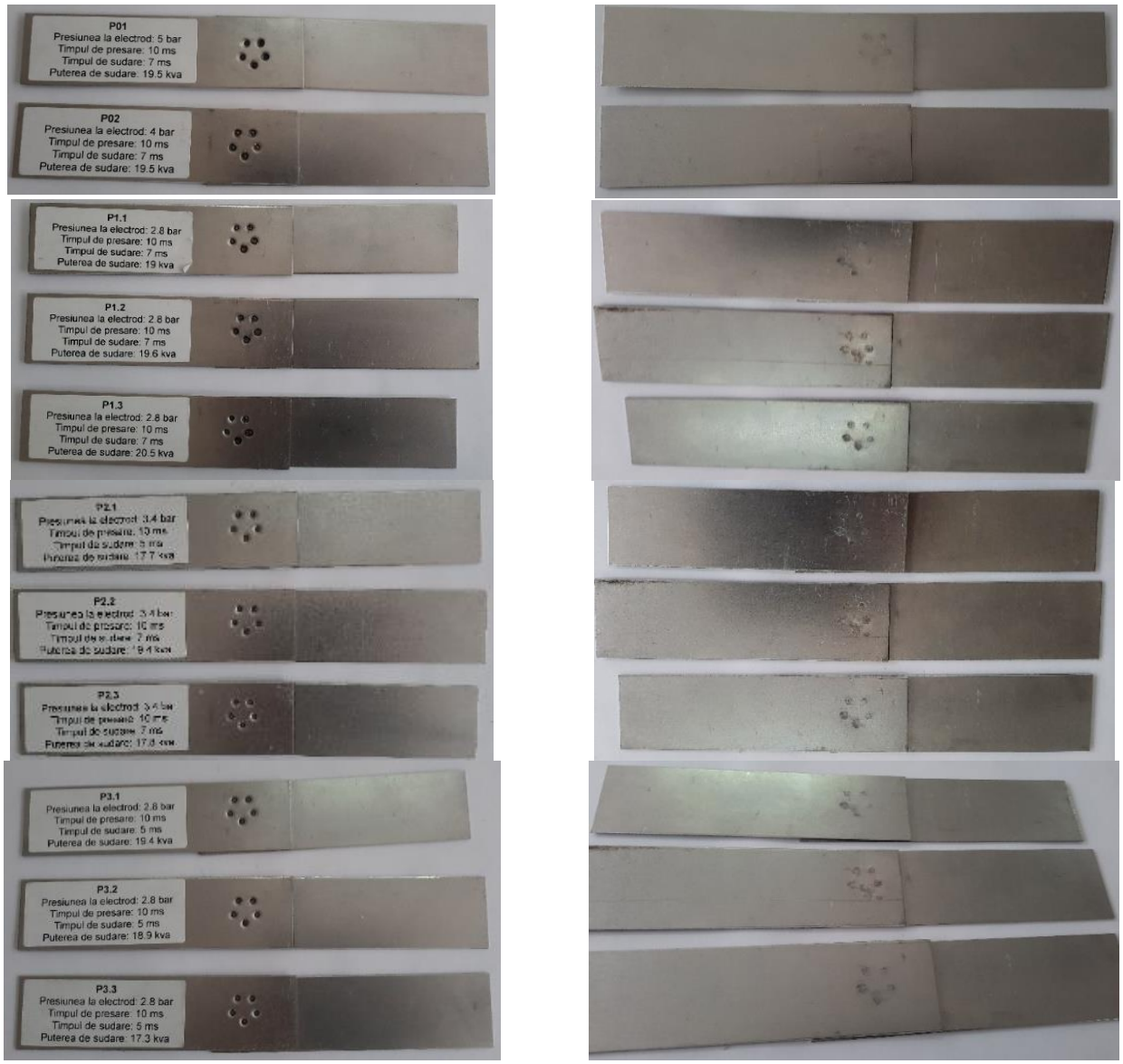


Fig. 4.16*. Setul al III-lea de probe sudate în relief cu 5 proeminențe (față/spate).*

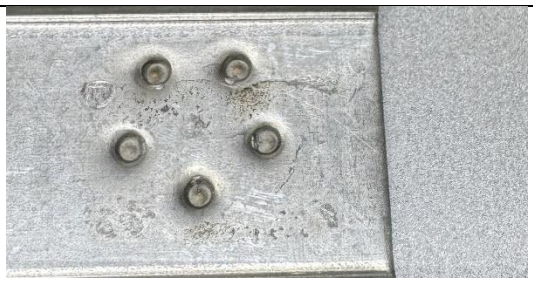
Standardul EN 1993-1-3 [173] recomandă anumite valori pentru lungimea pieselor sudate prin rezistență în puncte sau pentru lungimea de suprapunere. Dacă diametrul unui punct sudat este ds=3mm, atunci valoarea zonei de suprapunere trebuie să fie de minim 5ds, adică 15mm. Deoarece punctele sudate sunt distribuite la distanță de circa 10mm, rezultă că distanța minimă necesară ar trebui să fie 25 mm. De aceea, în cadrul programului experimental s-a realizat o suprapunere de 32- 35mm a tablelor, atât la setul cu 3 proeminențe cât și la cel cu 5 proeminențe.

4.3. Imperfecțiuni la sudare

După sudare, probele au fost examinate vizual, cu ajutorul unei lupe cu putere de mărire de 5x și o lampă de 100 lux. Principalele tipuri de imperfecțiuni identificate la setul de probe sudate cu 3 și 5 proeminențe sunt prezentate în tabelul 4.4.

Tabelul 4.4. Tipuri de imperfecțiuni identificate după sudarea în relief

EXAMINARE VIZUALĂ - *SR EN ISO 17637* – Examinări nedistructive ale îmbinărilor sudate prin topire. Imperfecţiuni evidenţiate: imperfecţiuni de suprafaţă; Sensibilitatea metodei: imperfecţiuni mai mari de 0,1 mm; Particularităţi: decelare cu ochiul liber sau cu aparate optice (mărire până la10x);	 Amprente prea adânci, poziționare incorectă a poansoanelor la amprentare și a electrozilor la sudare
La unele probe sudate s-au identificat imperfecțiuni de tip depuneri sau cruste de oxid care s-au desprins de pe suprafețele pieselor sudate anterior și apoi au aderat la suprafața de sudare. Aceste imperfecțiuni contribuie la înrăutățirea condițiilor de transfer termic în timpul sudării. De aceea, se recomandă curățirea periodică a suprafețelor electrozilor de sudare cu hârtii abrazive fine.	 Depuneri sau cruste de oxid pe suprafața componentelor
Formarea punctelor sudate cu dimensiuni diferite – se produce în cazul în care componentele nu sunt bine aliniate și poziționate, sau când amprentele s-au realizat incorect, ca urmare a fenomenelor de uzură ce au apărut la dispozitivele de deformare, dacă suprafața electrodului este încărcată cu depuneri desprinse de pe suprafețele pieselor.	  Puncte sudate cu dimensiuni diferite
Încărcarea suprafețelor active ale electrozilor cu straturi succesive de aluminiu, desprins de pe tablele aluminizate, determină formarea unor denivelări neomogene, care înrăutățesc modul de transmitere a curentului prin componente la sudare, ceea ce dăunează aspectului și calității punctelor sudate sau pot determina formarea de suduri incomplete.	 Pete de uzură apărute pe suprafața electrodului

Suprafața electrozilor este încărcată cu diferite reziduuri de materiale depuse de la alte piese sudate sau suprafața acestora nu este netedă/curată. Diferite materiale de încărcare se pot imprima sau pot adera la suprafața pieselor sudate, rezultând un aspect inestetic, perforând parțial stratul de protecție sau determinând apariția de mici cratere care favorizează fenomene de corodare preferențială.	 Zgârieturi și pete pe suprafața pieselor sudate

Caracteristicile care s-au avut în vedere la evaluarea îmbinărilor sudate prin rezistență au fost:

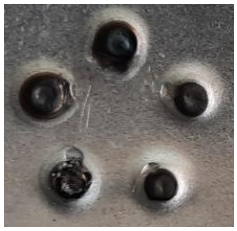
a) **forma punctului sudat** sau **dimensiunea zonei topite**, care este definită ca lățimea punctului de sudură la nivelul interfeței de îmbinare, pe direcția longitudinală. Acest aspect geometric este cel mai important factor în determinarea calității sudurilor prin rezistență electrică în puncte [152]. Dimensiunea zonelor topite, care determină suprafața totală de legătură a îmbinării, este controlată de energia liniară introdusă la sudare (fig. 4.17).



***Fig. 4.17**. Măsurarea diametrului punctului sudat.*

b) **adâncimea amprentei zonei topite în direcția grosimii** - poate afecta proprietățile mecanice ale sudurilor. Aceasta depinde de presiunea aplicată electrodului și de temperatura interfeței electrod/tablă. Creșterea cantității de căldură determină creșterea temperaturii interfeței, ceea ce la rândul său crește gradul de deformare plastică care se produce la nivelul suprafețelor sub presiunea electrodului. Pentru a menține adâncimea de indentare la nivelul minim, parametrii de sudare și geometria/suprafața electrodului trebuie controlați înainte de sudare.

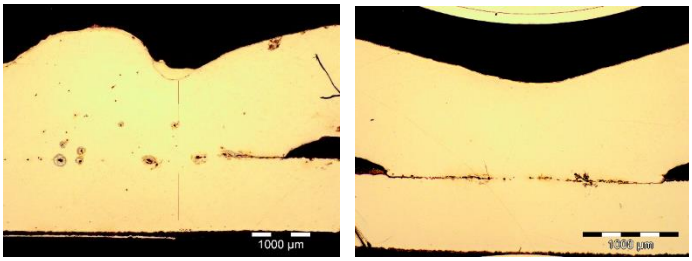
c) **forma crestăturii** la interfața tablă/tablă: deoarece la sudarea în relief se formează o crestătură de-a lungul circumferinței punctului sudat, trebuie ajustate valorile parametrilor de sudare pentru ca aceasta să nu fie prea evidentă. Forma crestăturii, ascuțită sau pătrată, poate afecta comportamentul la rupere al sudurilor (fig. 4.18).

a) 3 proeminențe b) 5 proeminențe

***Fig. 4.18**. Aspectul crestăturilor din jurul punctelor sudate la sudarea în relief.*

d) **prezența unor goluri în zona topită**, la interfața dintre suprafețele pieselor: Există două cauze care determină formarea golurilor în punctele de sudură: expulzarea de metal topit și contracția de solidificare (fig. 4.19).



a) b)

***Fig. 4.19**. Imperfecțiuni pe interfața sudată: a) goluri; b) lipsă de aderență.*

e) **extinderea ZIT-ului** – zona influențată termic poate avea o distribuție diferită dacă se sudează piese cu grosimi diferite, așa cum s-a întâmplat în cazul programului experimental. Extinderea ZIT-ului depinde de valoarea energiei la sudare și de conductivitatea termică a materialelor sudate. Deoarece la răcirea rapidă a oțelurilor se pot forma structuri în afara echilibrului (ex. martensită), în această zonă crește duritatea și scade plasticitatea materialului.

f) **puncte parțial sudate și desprinse** – apar dacă nu s-a localizat/dozat corect cantitatea de căldură necesară formării punctului de sudură (fig. 4.20).



***Fig. 4.20**. Puncte parțial sudate și desprinse la testul de tracțiune.*

g) **localizarea la interfața sudată a unor compuși intermetalici** cu duritate și fragilitate mare, cu dezvoltarea de fisuri – s-a produs acumularea și expulzarea compușilor intermetalici deoarece tablele sudate au fost acoperite din fabricație cu un strat subțire de aliaj Al-Si .

Capitolul 5 CARACTERIZAREA ȘI TESTAREA PROBELOR SUDATE PRIN REZISTENȚĂ ELECTRICĂ ÎN RELIEF

5.1 Analiza microscopică

5.1.1. Analiza materialului de bază

Analiza optică a microstructurii suprafeței de oțel aluminizat a evidențiat formarea unor dendrite de aluminiu alfa și compuși interdendritici între elementele de aliere (Fig. 5.1a).

Conform analizei EDS efectuată pe suprafața tablei de oțel aluminizat (Fig. 5.1b), compoziția chimică conține (% în greutate): 79,31 Al; 11,96 Si; 2,04 Fe; 0,34 Cr; 0,40 Ca; 5,96 O. Elemente precum Ca și O pot proveni și din atmosfera de lucru în care probele au fost expuse pentru o perioadă de funcționare de aproximativ 6 luni. Evoluția concentrației principalelor elemente chimice în vecinătatea stratului aluminizat (Fig. 5.1b) indică o concentrație mai mică de aluminiu la nivelul suprafeței exterioare (consumată pentru formarea oxidului de aluminiu și compusului Al-Si), apoi aceasta crește în zona mijlocie a stratului aluminizat, după care începe să scadă către interfața cu tabla de oțel. În același timp, se observă și difuzia fierului către stratul aluminizat, cu formarea compusului dur Al-Fe [41, 130-131].

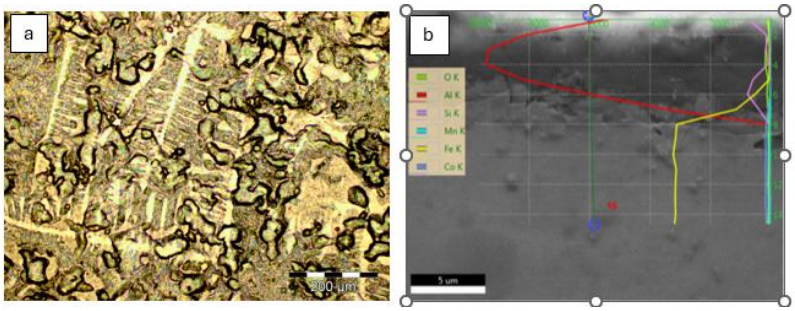


Fig. 5.1. *Analiza microstructurii și a elementelor chimice prezente la nivelul suprafeței oțelului aluminizat. a) aspectul suprafeței aluminizate; b) analiza de distribuție a elementelor chimice de-a lungul interfeței între stratul aluminizat și metalul de bază (oțel nealiat laminat la rece).*

Analiza SEM efectuată pe suprafața tablei aluminizate a indicat un aspect cvasi-uniform al stratului aluminizat (film discontinuu, cu aspect dendritic, având grosime variabilă de circa 20µm) (Fig. 5.2). Analiza de compoziție chimică a evidențiat prezența aluminiului ca element majoritar (peste 79% Al), alături de care se mai găsesc Oxigenul din oxidul de aluminiu (5,96%), Si (11,96%) , Fe (2,04%) și elementele reziduale Ca (0,4%) și Cr (0,34%).

În imaginea detaliată a secțiunii transversale a probei 1.1 (Fig. 5.2), este vizibilă structura stratului aluminizat, care este compus dintr-un strat de aderență subțire, SA (cu grosime de aproximativ 5 microni) situat la interfața cu componenta din oțel și stratul de aliaj Al-Si (AL) (cu grosime de aproximativ 20 microni).

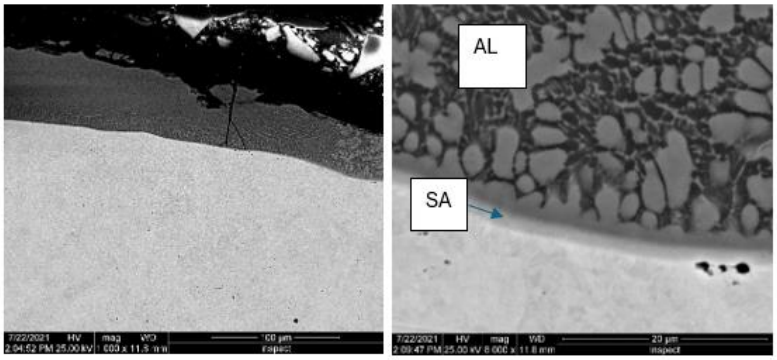


Fig. 5.2. *Imagine în secțiune transversală prin materialul de bază și detaliu pe zona stratului aluminizat existent pe suprafața oțelului [59, 63].*

În materialul de bază (oțel), la mică distanță de stratul de legătură, compoziția chimică conține (% masice): 1,22% Al; 0,94% Si; 96,29% Fe; 1% Co; 0,54%Cu. Analiza compoziției chimice de o parte și de alta a interfeței dintre stratul aluminizat și tabla din oțel este prezentată în Fig. 5.3. La o distanță de circa 15 μm față de interfață (Spot 1 și Spot 2), compoziția chimică în stratul aluminizat conține între 30-31%Al, 3,5 – 3,75%Si, 0,3-2,57 %Mn și 62-65%Fe (elemente care au difuzat din tabla de oțel).

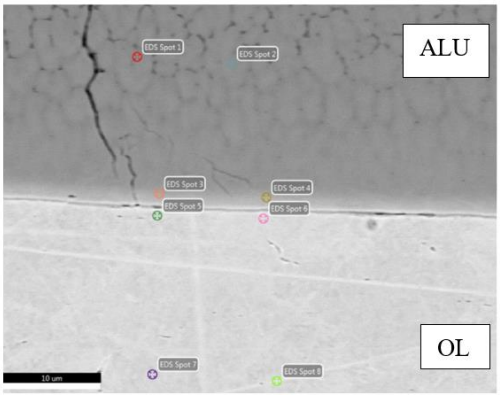


***Fig. 5.3**. Localizarea punctelor de măsurare a compoziției chimice la interfața între stratul aluminizat (ALU) și tabla din oțel (OL).*

5.1.2. Analiza probelor sudate cu 3 proeminențe

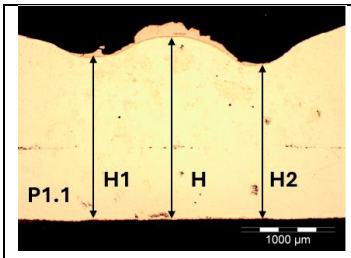
Pentru a studia efectele parametrilor de sudare asupra geometriei punctului de sudură și a modificării grosimii stratului de acoperire s-au realizat secțiuni transversale prin punctele sudate efectuate cu diferite regimuri. Pentru studiul microstructurii și pentru măsurarea microdurității pe zona sudată, s-au realizat secțiuni transversale prin punctele sudate cu ajutorul mașinii de tăiere de înaltă precizie IsoMet 4000. Analiza microstructurală a fost efectuată prin microscopie optică, folosind microscopul Olympus GX51 echipat cu software specializat pentru procesarea imaginilor (AnalySIS) și prin microscopie electronică cu scanare folosind microscopul Inspect S echipat cu senzor Z2e EDAX AMETEC pentru analize de microcompoziție chimică pe arii restrânse. Pentru a evidenția efectul regimului de sudare asupra geometriei zonei sudate și a continuității stratului protector de oxid au fost efectuate secțiuni transversale prin punctele sudate (fig. 5.5). Cu ajutorul software AnalySIS s-au măsurat valorile înălțimii zonelor de vârf și respectiv de adâncitură, care se formează în timpul deformării plastice a materialului la sudare (H, H1, H2), precum și valorile diametrului aparent al punctului sudat (D).



a) b) c)

***Fig. 5.4**. Probe înglobate în rășină pregătite pentru analizele metalografice: a) Proba 1.1, set II; b) Proba 1.2, set I; c)Proba 2.2., set I.*

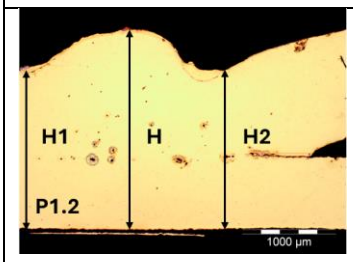
La proba 1.1, deși valoarea puterii a fost mai mică față de cea cu care s-a sudat proba 1.2 (18,08 kVA față de 19,18 kVA), pentru valori identice ale timpului de sudare și de presare, ruperea s-a produs la o valoare superioară (13,764 kN față de 11,738 kN), deoarece presiunea de strângere la sudare a fost mai mare (2,8 bar față de 2,6 bar). Presarea mai puternică a materialului pe proeminență a permis formarea unui punct cu diametru mai mare, care a avut o mai bună rezistență la rupere față de proba similară analizată. În plus, deoarece energia furnizată la sudare a fost mai mică, zona topită a avut o mai bună rezistență la deformare (la colaps) pe perioada formării punctului sudat. În comparație cu proba 2.2, la care puterea la sudare și timpul de presare au avut valori cvasi egale, creșterea valorii presiunii la sudare (de la 2,8 bar la 3,4 bar) nu a determinat îmbunătățirea rezistenței de rupere. Ruperea s-a produs la o valoare a forței de doar 11,455kN. Deși s-a ales o valoare mai mică a puterii la sudare (Proba 1.1/set II, 18.08kVA) dar o valoare mai mare a timpului de sudare (7msec), stratul de protecție realizat din aliaj Al-Si s-a deformat și s-a fisurat, determinând formarea unei îngroșări localizate la vârful punctului sudat, cu grosimea de circa 160 μm (Fig. 5.6).



a. P1.1/set II

Presiunea la electrod, bar	Timpul de presare, ms	Timpul de sudare, ms	Puterea la sudare, kVA
2,8	10	7	18,08

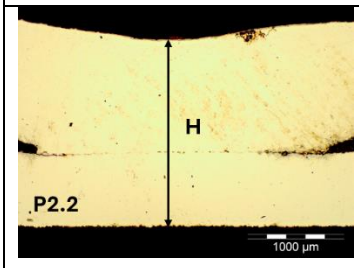
Forța de rupere = **13,764 kN**
Deplasarea la rupere = 10,114 mm
Localizarea ruperii = material de bază



b. P1.2/set I

Presiunea la electrod, bar	Timpul de presare, ms	Timpul de sudare, ms	Puterea la sudare, kVA
2,6	10	7	19,18

Forța de rupere = **11,738 kN**
Deplasarea la rupere = 7,3984mm
Localizarea ruperii = material de bază

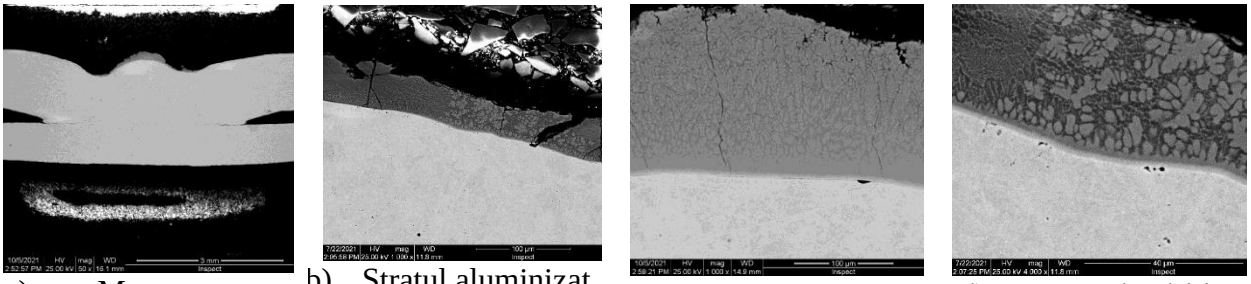


c. P2.2/setI

Presiunea la electrod, bar	Timpul de presare, ms	Timpul de sudare, ms	Puterea la sudare, kVA
3,4	10	5	18,10

Forța de rupere = **11,455 kN**
Deplasarea la rupere = 6,106 mm
Localizarea ruperii = punctul sudat

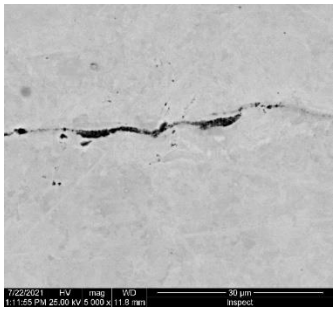
Fig. 5.5*. Secțiuni transversale ale probelor sudate în relief cu 3 proeminențe*



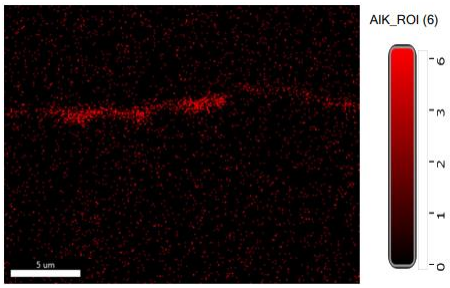
a) Macrostructura punctului sudat b) Stratul aluminizat aderent cu fisuri c) Detaliu pe zona stratului aluminizat d)Structura dendritică a stratului aluminizat

***Fig. 5.6**. Analiza punctului sudat în secțiune transversală pentru proba 1.1, set 1I.*

În timpul sudării, fragmentele rezultate din spargerea stratului de AlSi împreună cu compușii de reacție formați cu impuritățile de pe suprafețele piesei de prelucrat, au fost în mare parte expulzate către zonele laterale ale sudurii (fig. 5.7), ca urmare a presiunii exercitate de electrozi.



a) Zona de analiză a interfeței dintre componentele sudate



b) Imaginea EDAX a zonei selectate pentru analiza

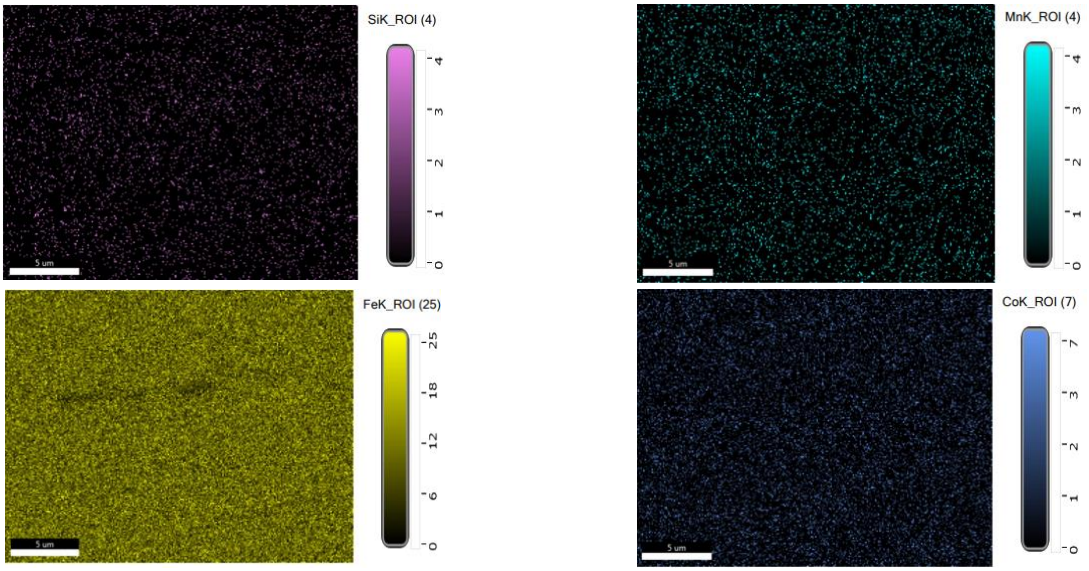
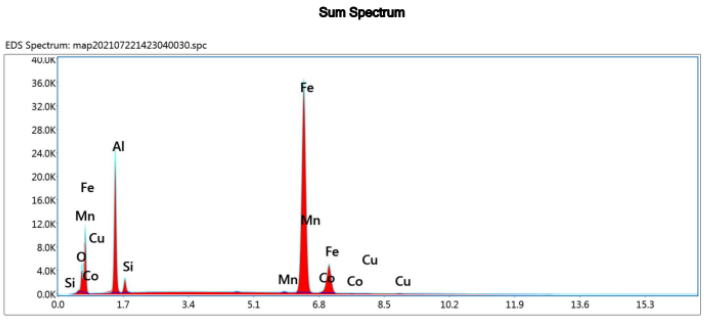


***Fig. 5.7.** Compuși lenticulari, înlănțuiți, presărați pe linia de fuziune a punctului sudat și imagini de distribuție atomică a elementelor pe suprafața selectată. Proba 1.1, Set 2(b).*

Din imaginile de distribuție ale elementelor chimice prezentate în fig. 5.7 se observă formațiunile dendritice bogate în Al (culoare roșu intens) și compușii formați cu Fe, Si sau Cu.

Analiza globală a compoziției chimice (procente masice) realizată prin difracție cu metoda EDAX indică valori de peste 25% pentru Al, peste 70% pentru Fe și peste 2,6 % Si.Mici concentrații de Co provin din materialul de bază (fig. 5.8).



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	0.38	1.01	8.61	14.31	0.0015	1.2049	0.3295	1.0000
AlK	25.61	40.51	833.84	7.70	0.0919	1.0881	0.3294	1.0014
SiK	2.60	3.94	90.31	8.67	0.0097	1.1146	0.3330	1.0024
MnK	0.29	0.23	11.39	17.93	0.0030	0.9432	0.9870	1.1190
FeK	70.23	53.67	2288.00	1.20	0.6734	0.9600	0.9949	1.0039
CoK	0.75	0.54	21.52	12.82	0.0070	0.9400	0.9839	1.0067
CuK	0.14	0.09	2.88	41.70	0.0012	0.9268	0.8988	1.0156

Fig. 5.8 *Analiza globală de compoziție chimică pentru micro-aria selectată (Intensitate radiație versus Energie, keV)*

Din fig. 5.9, care prezintă evoluția concentrației elementelor chimice de-a lungul unei linii ce traverseaza interfața sudată, se observă abundența în stratul de acoperire aluminizat a elementelor Al și Si, precum și difuzia elementelor Fe, Mn și Co, dinspre suprafața piesei de oțel către crustă.

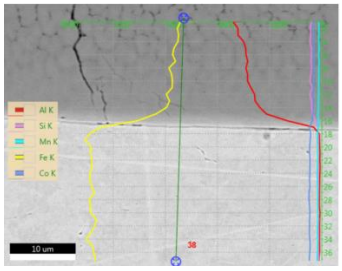


Fig. 5.9*. Distribuția elementelor chimice prin interfața dintre crusta protectoare de oxid de Al-Si și componenta sudată din oțel.*

Din cauza tensiunilor care apar prin deformarea la cald urmată de răcirea bruscă la sudare, în stratul îngoșat de oxid apar frecvent fisuri, care se propagă și se opresc la nivelul suprafeței oțelului (fig. 5.10).

Aceste fisuri măresc riscul de detașabilitate a stratului protector și permit pătrunderea mediului de lucru, determinând corodarea suprafeței. În cazul probei 1.2, stratul aluminizat nu a suferit modificări foarte mari ale grosimii în comparație cu proba 1.1. Crescând valoarea puterii de sudare (de la 18,08 la 19,18kVA), reducând valoarea presiunii la electrod (2,6bar) și menținând un timp de sudare identic (5 msec), s-a obținut o mai bună continutate și o grosime mai uniformă a stratului aluminizat.

Cu toate acestea, neregularitatea grosimii și mici acumulări (indicate de săgeți) pot fi observate pe zonele marginale (de micro-crater) ale punctului sudat (Fig. 5.11), localizate în zona de deformare a proeminenței. La această probă, pe interfața sudurii (LF – linia de fuziune) sunt prezente inclziuni alungite cu dimensiuni mai mari decât cele observate la proba 1.1., fapt care a determinat o valoare mai mică a diametrului efectiv al punctului sudat și, în consecință, o valoare

mai redusă a forței de rupere. Prezența compusilor intermetalici s-a datorat regimului de sudare, care nu a permis expulzarea acestora, secțiunea totală a punctului fiind și mai mult redusă (2,6 față de 3,12mm măsurați la proba 1.1).

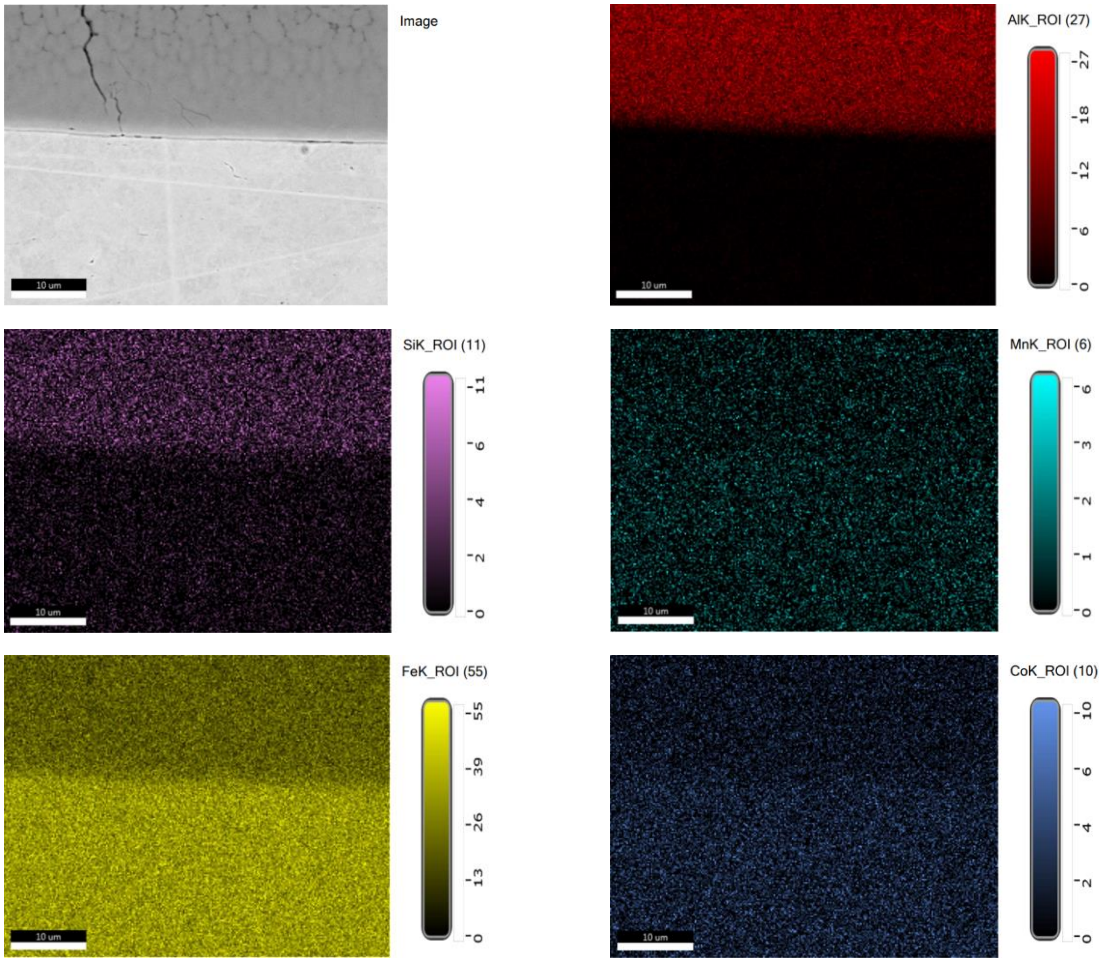


***Fig. 5.10**. Imagini de distribuție atomică a elementelor chimice la nivelul interfeței dintre piesa sudată și crusta de oxid formată la suprafața superioară a acesteia (proba 1.1 set 2).*

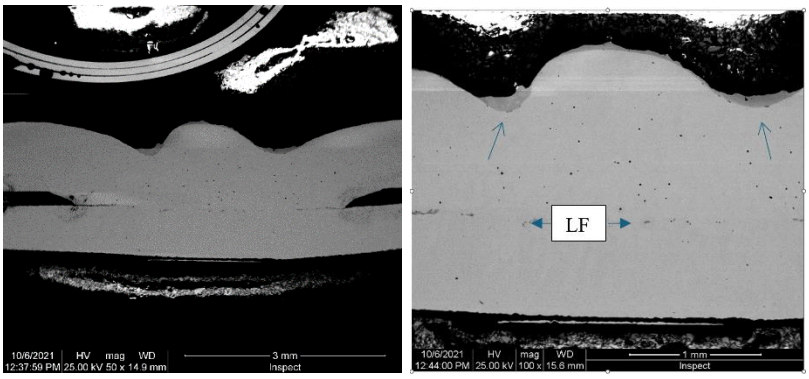


***Fig. 5.11.** Detaliu pe zona punctului sudat în cazul probei 1.2./set 1 cu evidențierea acumulărilor de compuși desprinși din stratul aluminizat.*

Analiza detaliată pe zona de interfață cu stratul aluminizat pentru proba 1.2 este prezentată în fig. 5.12. Datele prezentate în Fig. 5.12 indică scăderea concentrației de Al (procente masice) de la valoarea maximă de peste 88 % (Spot 1, suprafața stratului aluminizat) la 1,11% în substratul de oțel (la circa 20 microni sub interfața sudată). Concentrația medie de Al s-a obținut la circa 2 microni de linia de fuziune, în stratul aluminizat, după care concentrația acestui element a suferit o scădere drastică către 1%. S-a produs totodată și reducerea conținutului de Si, de la maxim 6,66% în zonele superioare ale stratului aluminizat, către 0,92-1% în zonele apropiate de interfața sudată. Compușii formați pe interfața nucleului topit al punctului sudat au compoziții chimice diferite, în funcție de gradul de amestecare și de viteza de reacție a elementelor, în condițiile unor viteze foarte mari de sudare și solidificare, specifice procesului studiat. Compuși de reacție formați pe interfața liniei de fuziune la proba 1.2, set 1 au concentrații mari de Al și Si (18% Al și 2,78% Si în Spot 1, 15,75% Al și 2,66% Si în Spot 2, respectiv 17,5% Al și 7,84% Si în Spot 5).

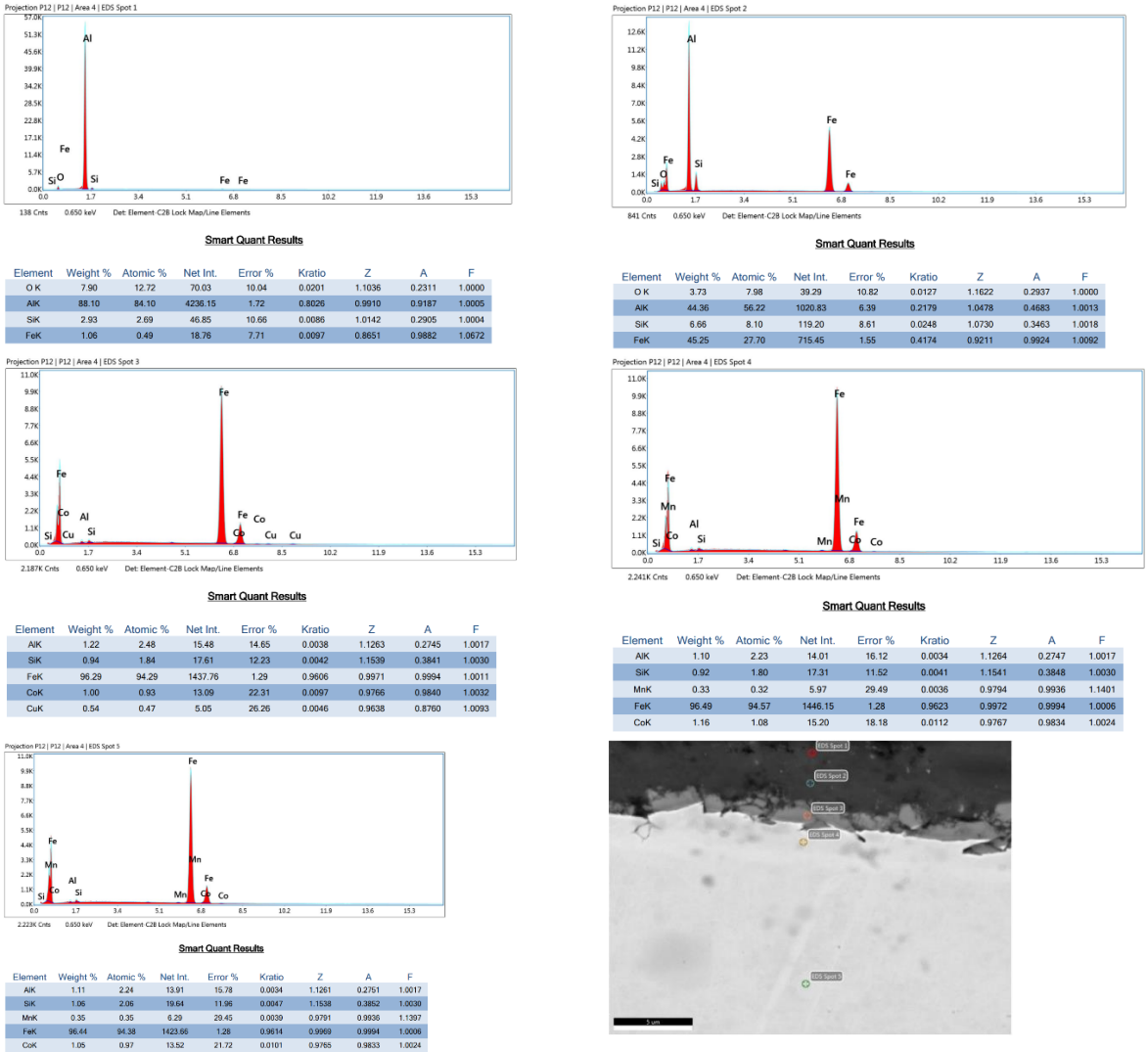
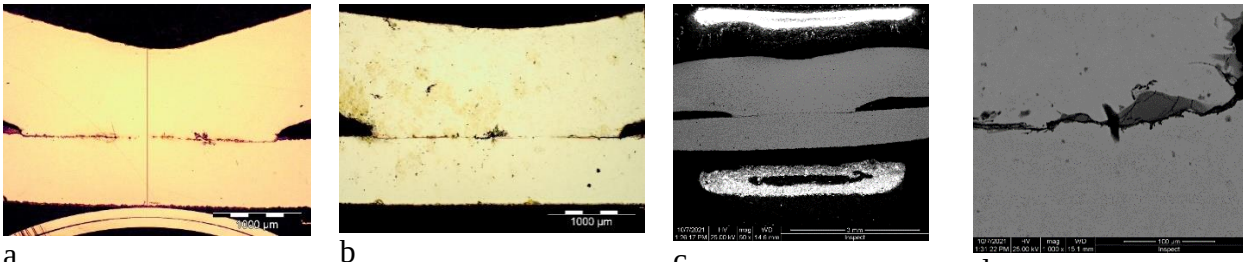


***Fig. 5.12**. Analiza cantitativă de microcompoziție chimică pe zonele adiacente stratului aluminizat în cazul probei 1.2/set 1 (Intensitate radiație versus Energie, keV).*

Proba 2.2 (Fig. 5.13) are un aspect complet diferit de celelalte probe prezentate anterior, deoarece nu mai prezintă zona specifică inelară de deformare a proeminenței pe suprafața punctului de sudură, ci doar o ușoară aplatizare a acesteia. Lungimea totală cumulată a diametrului punctului sudat este cea mai redusă, de doar 1,52mm.



a b c d

Fig. 5.13*. Evidențierea zonelor marginale ale punctului sudat cu acumulări de incluziuni în cazul probei 2.2/set 1. Imagini de microscopie optică (a) și de microscopie electronică SEM (b, imagine de ansamblu a zonei sudate; c) detaliu pe zona de la capătul suprafeței punctului sudat, unde se observă acumularea de compuși).*

5.2 Încercarea la rupere

Pentru a evalua rezistența la forfecare a punctelor sudate, probele au fost supuse testului de tracțiune continuă. Sarcina de forfecare a punctului unic poate fi calculată folosind relația:

$$\tau = \frac{4F}{\pi D^2} \qquad (5.1)$$

unde F este forța de rupere și D este diametrul punctului sudat.

Valorile lui τ pentru proba 1.1 a fost de 208,7 MPa, pentru proba 1.2 a fost de 183,2MPa iar pentru proba 2.2 a fost de 103,2MPa.

S-au efectuat probe de testare cu lățimea de 32 mm și lungimea de 150 mm. Pe aceste probe s-au realizat câte 3 proeminențe, cu aceleași dimensiuni (adâncime și diametru). La sudare, s-a realizat o suprapunere a probelor pe o lungime de 32 mm. Condițiile de încercare au fost:

- viteza de încercare: 5mm/min ->10mm, 10mm/min ->20mm, 20mm/min ->60mm
- distanța dintre bacuri: 147mm
- rata de achiziție a datelor: 0,001/s

Imagini ale pieselor sudate din timpul solicitării la tracțiune continuă sunt prezentate în Fig. 5.14. Cu ajutorul programului integrat de prelucrare a datelor cu care este echipată mașina pentru încercarea la tracțiune s-au efectuat achiziții ale deplasării (în timpul deformării plastice și curgerii în stare solidă) odată cu creșterea valorii forței la tracțiune, care sunt reprezentate cumulat sub formă de curbe tensiune versus deformație (diagrame Hooke). Totodată, s-au trasat curbele de evoluție la încercarea de tracțiune continuă (diagramele Hooke) pentru fiecare probă sudată (Fig. 5.15). Se consideră bune probele la care ruperea se localizează în materialul de bază și la care valoarea forței de rupere este mai mare sau cel mult egală cu cea a materialului de bază. Valorile efective ale forțelor și deplasărilor înregistrate pentru seturile de probe sudate sunt prezentate în tabelul 5.1.

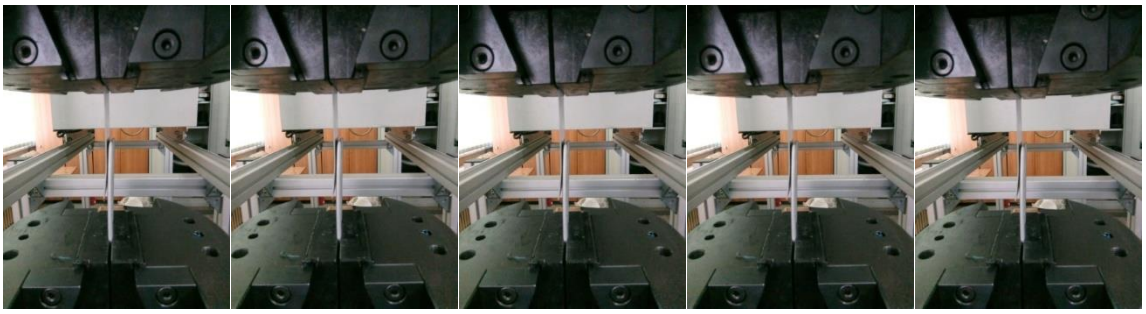


Fig.5.14 *Comportarea pieselor sudate în timpul solicitării la tracțiune.*

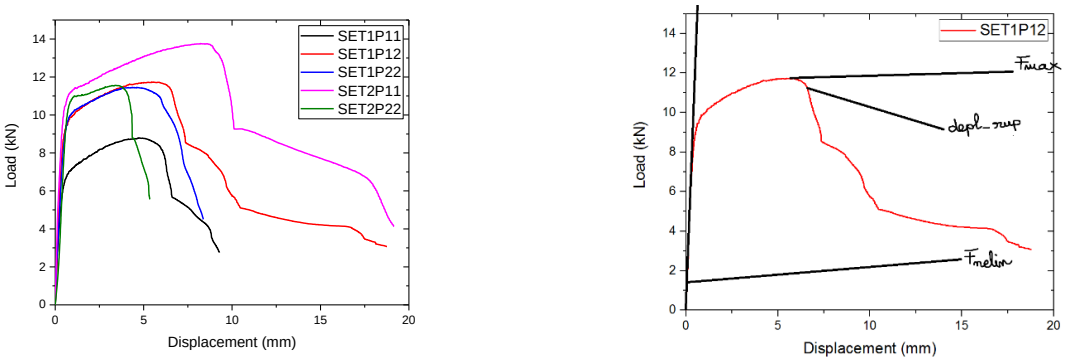


Fig. ***5.15*** *Diagramele Hooke - Forță (Load) – Deplasare (Displacement) cumulate pentru setul de probe sudate (a) și explicații privind zonele reprezentative ale diagramei Hooke (b).Fnelin – forța neliniară; Fmax – Forța maxima, depl-rup – deplasarea la rupere.*

5.2.1 Rezultatele testului de tracțiune pentru probele sudate cu 3 proeminențe

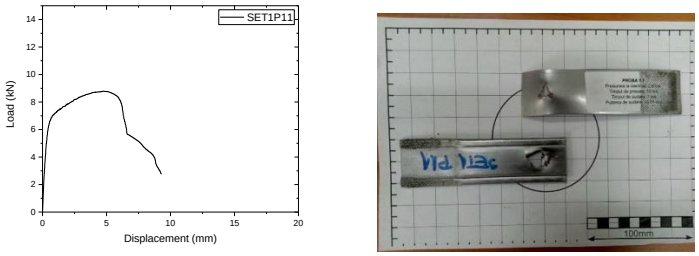


Fig. 5.16 *Diagrama Hooke și aspectul probei P1.1, SET I, după rupere. Ruperea s-a realizat la o forță maximă de 8,789kN, cu cedarea materialului de bază.*

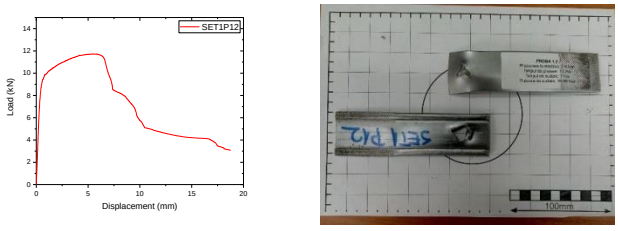


Fig. 5.17 *Diagrama Hooke și aspectul probei P12, SET I după rupere. Ruperea s-a realizat la o forță maxima de 11,738kN, cu cedarea materialului de bază.*

Tabelul 5.1. Rezultate ale testului de tracțiune pentru probele sudate în relief cu 3 proeminențe

Cod Proba	Set	Fmax [kN]	Fnelin [kN]	Deplasare la rupere [mm]
P1.1	SET1	**8,789**	2,1843	6,6149
P1.2	SET1	11,738	1,2933	7,3984
P2.2	SET1	11,455	2,2005	6,106
P1.1/2	SET2	**13,764**	4,5396	10,114
P2.2/2	SET2	11,557	4,8762	4,3574

Din analiza rezultatelor testului de tracțiune continuă se observă că cea mai mare valoare a forței de rupere s-a obținut pentru proba P1.1/set 2. Imperfecțiunile localizate pe linia de topire a sudurii au determinat cedarea prematură a unor îmbinări sudate în timpul exploatării la temperaturi cuprinse între 180-200^{o}C. În timpul sudării, pe zona nucleului topit, stratul protector din aliaj de aluminiu a fost mai întâi topit, apoi solidificat rapid.

5.2.2 Rezultatele testului de tracțiune pentru probele sudate cu 5 proeminențe

La lotul de probe cu 5 proeminențe, condițiile de încercare au fost similare cu cele stabilite pentru lotul de probe sudate cu 3 proeminențe. Valorile parametrilor de testare la încercarea de tracțiune sunt prezentate în tabelul 5.2. Pentru o mai ușoară interpretare a rezultatelor și studierea efectelor parametrilor de sudare asupra rezistențelor la rupere, s-au reprezentat cumulat diagramele Hooke ale celor 4 seturi de probe sudate.

În figura 5.18 se prezintă diagrama tensiune/deformație pentru cele 2 probe sudate P01 și P02. În figura 5.19 se prezintă diagramele Hooke pentru setul de probe P1.1, P1.2 și P1.3. În figura 5.26 se prezintă diagramele Hooke pentru setul de probe P3.1, P3.2 și P3.3.

Tabelul 5.2. Rezultate ale testului de tracțiune pentru probele sudate în relief cu 5 proeminențe

Cod Probă	Rigiditate [kN/mm]	Fmax [kN]	Rupere		Energie consumată [kN*mm]
			Forța [kN]	Deplasare [mm]	
P0.1	35,335	16,56	16,553	3,7054	53,91
P0.2	32,948	15,956	15,738	3,6037	50,38
P1.1	32,076	16,246	16,081	3,8674	53,39
P1.2	33,446	16,282	16,243	5,042	72,71
P1.3	31,401	16,342	16,168	4,4323	62,67
P2.1	31,257	14,946	14,9	1,8215	21,73
P2.2	32,561	16,075	16,005	4,163	57,89
P2.3	30,812	14,448	13,557	2,1532	25,34

P3.1	31,936	15,177	15,032	2,4794	31,75
P3.2	31,783	15,636	15,217	2,7246	33,16
P3.3	31,735	14,831	14,29	1,827	17,58

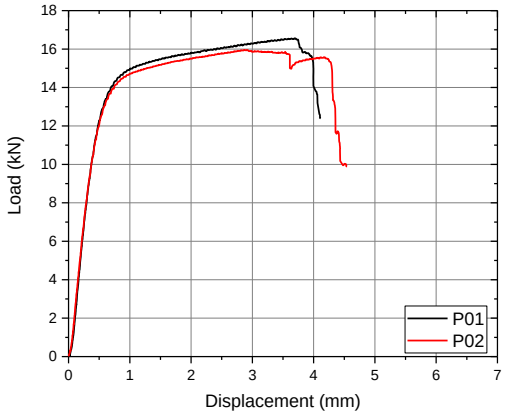


Fig. 5.18 *Diagrama Hooke pentru probele P01 și P02. Cedarea s-a produs mai întâi la proba P02, la F=15,738kN, în timp ce proba P01 a cedat la F = 16,553kN.*

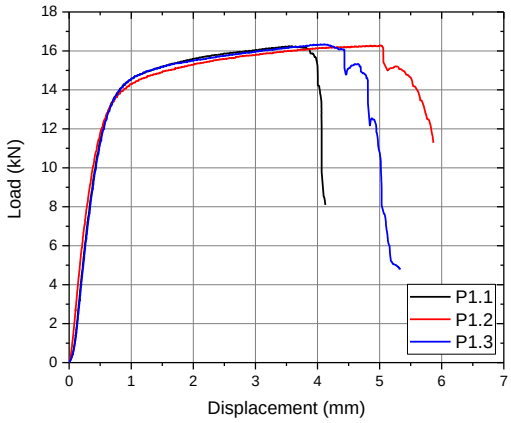


Fig. 5.19 *Diagrama Hooke pentru probele P1.1, P1.2 și P1.3. Cedarea s-a produs mai întâi la proba P1.1, la F=16,081kN, urmată de proba P1.3 care a cedat la F = 16,168kN*

5.3 Măsurări de duritate

Determinarea experimentală a microdurității s-a efectuat cu echipamentul Shimadzu HMV 2T în următoarele condiții de lucru: temperatură +25°C (temperatura de referință +23 ±5°C) și umiditate 55%. Microduritatea a fost măsurată pe secțiunea transversală a probelor sudate, aplicând sarcina de indentare de 0,2 N și timpul de indentare de 10s. Valorile sunt prezentate în Tabelul 5. 3.

Tabelul 5.3. Valori ale durității probelor sudate în relief cu 3 proeminențe

Proba/ Zona de măsurare	**Valori individuale, $HV_{0.2}$**	**Valoare medie, $HV_{0.2}$**	**Deviația Standard**	**Coeficient de variație**
Material de bază	155, 152, 158, 156, 157	156	2.30	1.48
Proba 1.1				
Strat aluminizat	870, 856, 864, 864, 851	861	7.48	0.87
Linia de fuziune	193, 187, 184, 190, 185	188	3.70	1.97
ZIT	161, 158, 165, 155, 153	158	4.77	3.01
Proba 1.2				
Linia de fuziune	190, 185, 188, 183, 181	185	3.65	1.97
ZIT	160, 152, 160, 158, 155	157	3.46	2.21
Proba 2.2				
Linia de fuziune	178, 170, 179, 178, 176	176	3.63	2.06
ZIT	152, 155, 153, 159, 153	154	2.79	1.81

Capitolul 6 OPTIMIZAREA PROCESULUI DE SUDARE ÎN RELIEF

6.1. Aspecte generale

Una dintre metodele mult utilizate pentru optimizarea parametrilor regimurilor de prelucrare este cea propusă de Geniki Taguchi [157-159]. Cu ajutorul acestei metode se pot elimina valorile parametrilor care duc la obținerea de variații ale calității produselor în timpul fabricării acestora. Mai precis, trebuie dezvoltată acesa strategie care permite optimizarea valorilor celor mai importanți parametrii ai procesului. Procesul de optimizare a procedeului de sudare în relief trebuie să parcurgă următoarele etape: Proiectarea sistemului de sudare, Proiectarea parametrilor tehnologici (măsurabili), Stabilirea limitelor de toleranță pentru valorile parametrilor

Pentru punerea în practică a metodei Taguchi trebuie stabilit Planul factorial (de elaborare a strategiei de efectuare a experimentelor) în cadrul căruia se definesc **variabilele de intrare** care interacționează cu **factorii de rezultat** (de ieșire), determinând obținerea rezultatelor cu un nivel de încredere acceptabil. Clasificarea experimentelor factoriale se face cu relația:

$$N = L^m \tag{6.1}$$

În care L reprezintă numărul de niveluri ale fiecărui factor de influență, iar m este numărul de factori ai procesului tehnologic ce afectează calitatea procesului de sudare [158-160].
În cazul procesului de sudare analizat în teza de doctorat există 4 factori de influență de intrare (F1 – Presiunea la electrod cu valori de 2,8 și 3,4; si 5 bar; F2 - Timpul de sudare, cu valori de 4; 5; 6 și 7 ms; F3 - Puterea la sudare cu valori între 17,7; 19; 19,5 și 20,5 kVA; F4 - Timpul de presare cu valoare unică de 10ms). Rezulta ca N = 4^3= 64. Deoarece F4 are valoare unică, nu se va introduce în matricea factorilor de influență. Prezentarea sintetică a factorilor de influență este redată în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1. Factori care influențează procesul de sudare prin rezistență electrică în relief

Parametru	**Simbol (unități de măsură**	**Niveluri ale factorilor de influență**			
		F1	**F2**	**F3**	**F4**
Puterea la sudare	Ps (kVA)	17,7	19	19,5	20,5
Timpul de sudare	*t* (ms)	4	5	6	7
Presiunea la electrozi	*P* (bar)	2,8	3,4	4	5

În cazul procesului de sudare analizat în teza de doctorat există 4 factori de influență de intrare (F1 – Presiunea la electrod cu valori de 2,8; 3,4; 4 și 5 bar; F2 - Timpul de sudare, cu valori de 4; 5; 6 și 7 ms; F3 - Puterea la sudare cu valori între 17,7; 19; 19,5 și 20,5 kVA; F4 - Timpul de presare cu valoare unică de 10ms). Deoarece F4 are valoare unică, nu se va introduce în matricea factorilor de influență. Aplicând în relația 6.1 datele de intrare, rezultă că sunt necesare minim N = 4^3 = 64 experimente. Conceptul de ”parametru robust”, introdus de Genichi Taguchi, are ca scop proiectarea unui plan de experimente, în cadrul căruia se analizează interacțiunea dintre variabilele de control și abaterea necontrolabilă, care se realizează prin

setările factorilor de control ce permit minimizarea variației răspunsului factorilor necontrolați [158]. Pentru a evalua semnificația parametrilor procesului, metoda Taguchi folosește o măsură statistică a performanței numită raport semnal-zgomot (S/Z), care ia în considerare atât valoarea medie a valorilor cât și variabilitatea acestora. Raportul S/Z este raportul dintre valoarea medie (semnal) și abaterea standard (zgomot), depinzând de caracteristicile de calitate ale produsului/procesului de optimizat. Rapoartele standard S/Z utilizate în mod curent sunt: valoarea nominală-este cea mai bună (NB), mai mic cu cât mai bine (MicB) și mai mare cu cât mai bine (MareB).

6.2. Realizarea probelor sudate conform planului experimental optimizat

Pe baza datelor de intrare, s-a trecut la **faza a doua** a metodologiei de optimizare.

Mai întâi s-au debitat fâșii de material (oțel aluminizat având grosimi de 0,8mm și 1,2mm), cu lățimea de 40mm și lungimea de 150 mm, utilizând o mașimă de debitat cu cuțit ghilotină. Apoi, s-a realizat amprentarea probelor cu grosime de 1,2mm, câte 16 probe cu 3 proeminențe și respectiv, 16 probe cu 5 proeminențe. Dimensiunile zonei amprentate sunt reprezentate schematizat în Fig. 6.1 și valorile măsurate s-au centralizat în Tabelul 6.2.

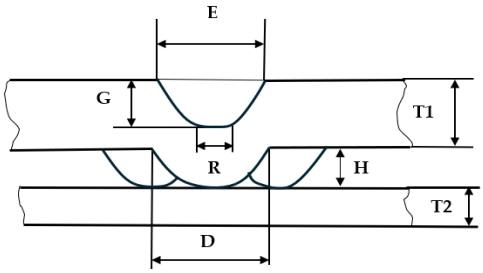


***Fig. 6.1**. Schema de măsurare a proeminențelor.*

Tabelul 6.2. Dimensiunile calculate/măsurate ale proeminențelor* [mm]

Număr proeminențe	T1	T2	G	D	H	E	R
3	1,2	0,8	2	5	2	2,6	1.5
5	1,2	0,8	2,3	5,4	2.3	3	2

*Precizia de măsurare ± 0.01mm; **D se determina cu formula: D=E+2xT1;

S-a trecut apoi la efectuarea probelor sudate sub forma a 2 seturi, un set de 16 probe sudate cu 3 proeminențe și un set de 16 probe sudate cu 5 proeminențe (Fig. 6.2). Pentru toate probele sudate s-a păstrat aceeași valoare a timpului de presare de 10ms.

6.3. Testarea distructivă a probelor sudate

Probele sudate au fost apoi supuse testului de rupere continuă, cu aceeași aparatură ca și cea utilizată pentru probele analizate în capitolul 5. Rezultatele obținute la încercarea de rupere prin forfecarea punctelor pentru setul de probe sudate cu 3 proeminențe realizate în cadrul procedurii de optimizare se prezintă în Tabelul 6.3.

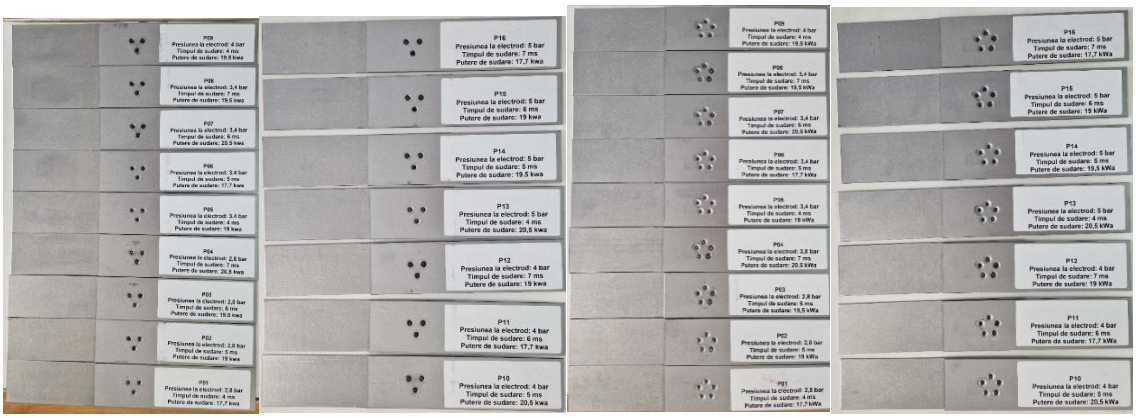


***Fig. 6.2**. Setul de probe sudate prin rezistență electrică cu 3 si 5 proeminențe.*

Tabelul 6.3. Planul experimental detaliat pentru setul I (3 proeminențe)

Nr. exp.	Parametri			Răspuns		
	Presiune, *Pr*, bar	**Timp, *T*, ms**	**Putere, *P*, kWA**	**Forța maximă de rupere F_r, kN**	**Deplasarea în timpul ruperii D_r, mm**	**Localizare/mod rupere**
1	**2,8**	**4**	**17,7**	**8,5851**	**1,5323**	Material de bază
2	2,8	5	19	10,723	2,9071	Material de bază
3	2,8	6	19,5	10,535	2,7287	Material de bază
4	2,8	7	20,5	10,680	2,4025	Material de bază
5	3,4	4	19	10,202	2,8863	Material de bază
6	3,4	5	17,7	10,941	3,022	Material de bază
7	3,4	6	20,5	10,772	2,9455	Material de bază
8	3,4	7	19,5	10,904	3,0986	Material de bază
9	4	4	19,5	10,924	3,3854	Material de bază
10	4	5	20,5	10,782	3,299	Material de bază
11	**4**	**6**	**17,7**	**11,033**	**3,1994**	Material de bază
12	4	7	19	10,944	3,08	Material de bază
13	5	4	20,5	10,964	3,1621	Material de bază
14	5	5	19,5	10,984	3,3373	Material de bază
15	5	6	19	10,805	3,1982	Material de bază
16	5	7	17,7	10,901	3,265	Material de bază

Din tabelul 6.3 se observă că valoarea medie a deformării la rupere în cazul setului de probe sudate cu 3 proeminențe este de circa **2,86** mm. În tabelul 6.3 au fost subliniate situațiile limită, respectiv cea mai slabă probă și cea mai bună probă testată. Reprezentarea grafică a curbelor tensiune-deformație pentru setul I (optimizat) la probele sudate în relief cu 3 proiecții este prezentată cumulat (Fig. 6.3 si Fig. 6.4). Diametrul necesar al unui punct este dat de relația D = 4t. In acest caz, este sigur că se va rupe componenta cu grosimea cea mai mică, t=0,8mm.

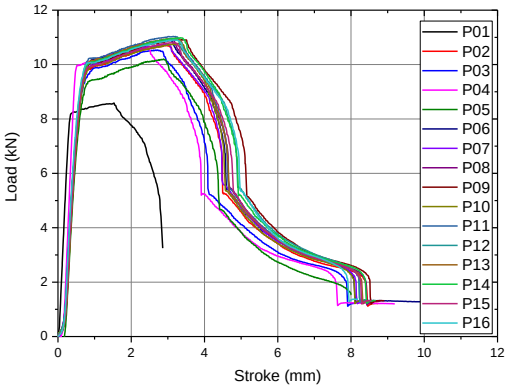


***Fig. 6.3**. Curbele tensiune-deformație la încercarea de rupere continuă pentru setul I - optimizat de probe sudate în relief cu 3 proeminențe.*

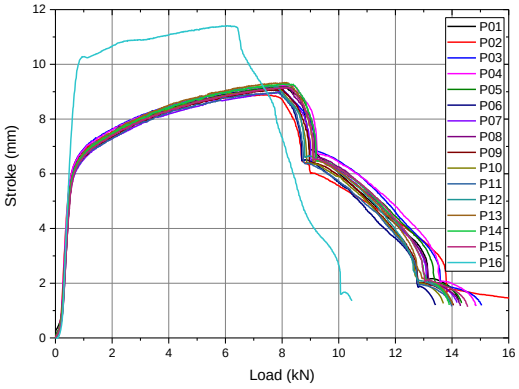


***Fig. 6.4** Curbele cumulate tensiune-deformație la încercarea de rupere continuă pentru setul II optimizat de probe sudate în relief cu 5 proeminențe.*

Tabelul 6.4. Planul experimental detaliat pentru setul II de probe (5 proeminențe)

Nr. experiment.	Parametri			Răspuns		
	Presiune, *Pr*, bar	Timp, *t* ms	Putere, *P*, kWA	Forța maximă de rupere F_r, kN	Deplasarea în timpul ruperii D_r, mm	Modul/locul de rupere
1	**2,8**	**4**	**17,7**	9,1656	7,9475	Material de bază
2	2,8	5	19	**8,8854**	7,2448	Material de bază
3	2,8	6	19,5	9,156	7,745	Material de bază
4	2,8	7	20,5	9,2385	8,0252	Material de bază
5	3,4	4	19	9,1857	8,1314	Material de bază
6	3,4	5	17,7	9,1032	7,4998	Material de bază
7	3,4	6	20,5	9,0174	7,9234	Material de bază
8	3,4	7	19,5	9,1857	8,0537	Material de bază
9	4	4	19,5	9,0933	7,9519	Material de bază
10	4	5	20,5	9,1692	7,8556	Material de bază
11	4	6	17,7	8,991	7,7833	Material de bază
12	4	7	19	9,2319	7,6202	Material de bază
13	5	4	20,5	9,3375	8,0887	Material de bază
14	5	5	19,5	9,2715	**8,3984**	Material de bază
15	5	6	19	9,156	8,22	Material de bază
16	**5**	**7**	**17,7**	**11,406**	6,1885	Material de bază

Capitolul 7 CONTRIBUȚII ȘI CONCLUZII. DIRECȚII DE CERCETARE ULTERIOARE

7.1. CONCLUZII GENERALE

Studiul documentar care a fost efectuat în prima parte a tezei de doctorat a permis desprinderea unor concluzii legate de particularitățile procedeului de sudare prin rezistență electrică în relief, după cum urmează:

1. O condiție de bază la sudarea în relief este capacitatea de a sparge sau îndepărta rapid stratul de oxid sau de acoperire de pe suprafața pieselor, astfel încât să se asigure un bun contact mecanic și implicit a unui contact electric corect între cele două materiale de bază.
2. Metodele de testare distructivă includ și testul de rezistență la tracțiune, testul de exfoliere, testul de forfecare, teste de rezistență la coroziune, analize prin microscopie optică sau electronică pe secțiuni transversale din îmbinarea sudată, analize de micro-compoziție chimică pe zonele de fuziune etc.
3. Variațiile de grosime, ale rezistenței la tracțiune, ale durității, precum și gradul de finisare al suprafeței sau gradul de curățire a pieselor care se sudează au un efect semnificativ asupra calității sudurii.
4. Răcirea rapidă la sudarea prin rezistență electrică poate genera efecte de durificare și fragilizare în cazul oțelurilor nealiate cu conținut mai mare de carbon și mangan, ca urmare a apariției microstructurilor cu martensită și bainită.

Concluzii rezultate din derularea programului exprimental de sudare a unor componențe subțiri din oțel aluminizat

1. În timpul sudării, stratul protector din aliaj AlSi se fragmentează, se topește și dă naștere unor compușii de reacție împreună cu impuritățile existente pe suprafețele piesei de sudat. Acesta este în final expulzat către zonele laterale ale sudurii (fig. 5.7), ca urmare a presiunii exercitate de electrozi în timpul sudării.
2. Valoarea foarte mare a durității stratului aluminizat situat deasupra punctului de sudură (861 HV0.2) se datorează formării compușilor duri Al-Fe, deoarece fierul difuzează din tabla de oțel în timpul sudării. În urma măsurătorilor compoziției chimice pe micro-zona adiacentă stratului de aluminiu, s-a determinat o concentrație de 2% Fe.
3. Imperfecțiunile care s-au observat pe linia de topire a sudurii au contribuit la cedarea prematură a îmbinărilor sudate în timpul exploatării la temperaturi cuprinse între 180-200^{o}C. Stratul protector din aliaj de aluminiu a suferit modificări în timpul procesului de sudare, fiind topit apoi solidificat rapid, generând tensiunile de contracție care au provocat fisurarea/ întreruperea stratului protector, ceea ce a permis expunerea zonelor neprotejate la acțiunea mediului de lucru (ulei fierbinte, abur, temperaturi de aproximativ 180-200^{o}C).
4. Suprafețele de rupere ale celor 3 puncte sudate au forme și arii diferite, ca urmare a uzurii suprafeței electrodului (apăsarea este neuniformă la nivelul celor 3 puncte, a deformării tablelor în timpul apăsării sau a poziționării incorecte, precum și din cauza dezechilibrului termic ce apare la trecerea curentului electric oțelul aluminizat.

5. Valorile optime ale parametrilor regimului de sudare în cazul probelor cu 5 proeminențe au fost: presiunea la electrod 2,8 bar, tipul de sudare 7ms și puterea 19,6 kVA. În acest caz, valorile forțelor de rupere la tracțiune (16,553 kN) sunt cu 20% peste valoarea celor obținute în cazul probelor cu 3 proeminențe, respectiv Fmax = 13,674 kN.

7.2.1. *Contribuții teoretice*

- Documentarea asupra particularităților procedeului de sudare prin rezistență electrică în relief, în vederea elaborării programului experimental;
- Analiza efectelor straturilor de protecție existente pe suprafețele probelor sudate asupra mecanismului de formare a punctului de sudură; Proiectarea unui program experimental de obținerea și testare a probelor sudate în relief cu 3 și 5 proeminențe; Identificarea factorilor de influență asupra procesului de sudare, analiza condițiilor de solicitare ale produselor sudate, identificarea factorilor perturbatori (fluctuațiile de curent, limitele de măsurare ale aparaturii utilizate, gradul de uzură al aparatelor de sudare, pierderi de presiune în sistemul hidraulic de presare etc) în vederea optimizării valorilor parametrilor regimului de sudare.

7.2.2. *Contribuții științifice*

- Proiectarea tehnologiei de sudare prin rezistență electrică în relief a unor componente cu grosimi diferite (0,8 și respectiv 1,2mm) realizate din oțel aluminizat; Proiectarea documentației tehnologice de fabricare a reperelor sudate cu procedeul de sudare prin rezistență electrică în relief, proiectarea și realizarea unui dispozitiv de poziționare a probelor sudate; Realizarea a 4 seturi de câte 16 probe sudate cu diferite regimuri ale parametrilor de sudare, pentru 3 și 5 proeminențe; Elaborarea și realizarea unui program experimental de testare distructivă a probelor sudate, studiul modului de rupere și analiza valorilor parametrilor: Forță de rupere, deformație la rupere; Efectuarea unui amplu program de caracterizare microstructurală a punctelor sudate în cadrul programului experimental, utilizând microsopia optică, microscopia electronică de baleiaj SEM, Studiul fenomenelor de difuzie a elementelor chimice provenind din stratul aluminizat prin interfața sudată, analize de micro-compoziție chimică locală cu metoda EDAX, identificarea modificărilor microstructurale, a fazelor și constituenților metalografici, punerea în evidență a fenomenelor de difuzie a elementelor chimice prin interfața depunerii sudate; Proiectarea și derularea unui amplu program de optimizare a valorilor parametrilor regimului de sudare utilizând metoda Taguchi;

Bibliografie selectivă

1. Larsson J.K., Bengtsson L., "The Overlooked Joining Technology of Fasteners for Modern Car Body Structures – Latest Experience From Nut and Bolt Attachment to Advanced High Strength Steels," in proceedings from 11th European Automotive Engineers' Council (EAEC), **2007**.
2. O'Brien R.L., Welding Handbook: Welding Processes (Miami: American Welding Society, **1991**, II, pp. 562-563.
3. Tolf E.G., Hedegard J, "Resistance Nut Welding: Weldability to Ultra High Strength Steels and Joint Properties," in proceedings from 59th Annual Assembly of IIW (International Institute of Welding), Quebec, August-September **2006**.
4. R. Khezri, Static Strength of Weld Nuts on Carbon and Boron Sheet Steels, report IM-2007-104, Stockholm: KIMAB - Corrosion and Metals Research Institute, March **2007**.

5. J.W. Ringsberg, P. Orvegren, H.F. Henrysson, and G. Kerstrm, "Sheet Metal Fatigue Near Nuts Welded to Thin Sheet Structures in Car Bodies," proceedings from FATIGUE 2006 – 9th International Fatigue Congress, Atlanta, May **2006**.
6. Voiculescu, I., **Oprea, A.V**., Vasile, I.M., Case Study About Resistance Projection Welding of Aluminized Steel Parts, Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, Vol. 32, p. 23-29, **2021**. **DOI:** https://doi.org/10.35219/awet.2021.03, cited by Mikno, Z. Analysis of projection welding in relation to the non-parallelism of electrodes. *Int J Adv Manuf Technol* **135**, 2087–2095 (2024). https://doi.org/10.1007/s00170-024-14653-x
7. **Oprea, A.V**, Ciocoiu, R. C., Vasile, I.M. Lala, C. G., Geanta, V., Voiculescu, I., Study about multipoint projection welding of aluminized steel plates, VIII International Congress "Engineering, Environment and Materials in Process Industry ",Bosnia, Febr. **2023**.
8. **Oprea, A.V, „**Cercetări privind efectul parametrilor regimului de sudare prin rezistență electrică în relief asupra rezistenței la rupere a componentelor din oțel", Conferința Sudura, Cluj, 7-8 Aprilie **2022**.
9. Goral, M.; Pytel, M.; Ochal, K.; Drajewicz, M.; Kubaszek, T.; Simka, W.; Nieuzyla, L. Microstructure of Aluminide Coatings Modified by Pt, Pd, Zr and Hf Formed in Low-Activity CVD Process. Coatings, **2021**, 11, 421. https://doi.org/10.3390/ coatings11040421
10. **Oprea, A.V.,** Voiculescu, I., Simulation of the projection welding process, Workshop DIGITAL 4PPP, 24 Nov. **2023**, Bucharest, Romania.
11. **Oprea, A.V.**, Vasile, I. M., Ciocoiu, R.C., Voiculescu, I., The Effect of Protrusions Number at Projection Welding Process, International Conf. Bramat, **2024**, Brasov, Romania, poster.
12. **Oprea, A.V.**, Vasile I. M., Voiculescu I., Ciocoiu R. C., The Multipoint Relief Projection Study, PriMera Scientific Engineering, Volume 3 Issue 1, July **2023**, ISSN: 2834-2550, doi:10.56831/PSEN-03-061, https://primerascientific.com/pdf/psen/PSEN-03-061.pdf.
13. **Oprea, A.V.,** Voiculescu, I., Ciocoiu, R.C., Vasile, I.M., Research Regarding Multi-Point Projection Welding Process, Conf. ICMaS, 2023, 16. Nov, Bucharest, Romania.
14. Wang Min, Welding methods of aluminized steel pipe, Journal of Tool & Equipment and Engineering, **2003** (153): 47-48.
15. Patel, N.; Parihar, P.L.; Makwana, J.S. Parametric Optimization to Improve the Machining Process by Using Taguchi Method: A Review. *Materials Today: Proceedings* **2021**, *47*, 2709–2714.
16. Wang, X., Zhang, Y., Effects of Welding Procedures on Resistance Projection Welding of Nuts to Sheets, ISIJ International **2017**, Vol. 57 No. 12, pp. 2194–2200.
17. Mathiszik, Ch., Johannes Koal, J., Zschetzsche, J., Füssel U., Schmale H.C., Study on precise weld diameter validations by comparing destructive testing methods in resistance spot welding, Welding in the World (**2024**) 68:1825–1835 https://doi.org/10.1007/s40194-024-01747-z.
18. Sherepenko, O.; Kazemi, O.; Rosemann, P.; Wilke, M.; Halle, T.; Jüttner, S. Transient Softening at the Fusion Boundary of Resistance Spot Welds: A Phase Field Simulation and Experimental Investigations for Al-Si-coated 22MnB5. Metals **2019**, DOI: 10.13140/RG.2.2.32009.93280
19. Wang, X., Zhang, Y., Effects of Welding Procedures on Resistance Projection Welding of Nuts to Sheets, ISIJ International **2017**, Vol. 57 No. 12, pp. 2194–2200.
20. **Oprea A. V.,** Ciocoiu R. C., Constantin G., Voiculescu I., Optimization of Parameters in Multi-Spot Projection Welding of Thin Aluminized Steel Sheets, APPLIED SCIENCES-BASEL, Volume 15, Issue 19, DOI 10.3390/app151910530, Article Number 10530, Published SEP 29 2025,Indexed2025-10-20, WOS:001593458800001, eISSN 2076-3417