

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI
Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

CERCETĂRI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR STRATURILOR DEPUSE PRIN SUDARE CU ALIAJE MULTI-ELEMENT

Doctorand
Ing. George SIMION

Conducător științific
Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU

Conducător științific în cotutelă
Prof. univ. dr. ing. habil. Ionelia VOICULESCU

Seria I 4: INGINERIE INDUSTRIALĂ Nr. 96
GALAȚI - 2024

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI
Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**CERCETĂRI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR STRATURILOR DEPUSE
PRIN SUDARE CU ALIAJE MULTI-ELEMENT**

Doctorand
Ing. George SIMION

Președinte

Prof. univ. dr. ing. DHC Cătălin FETECĂU

Conducător științific

Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU

Conducător științific în cotutelă

Prof. univ. dr. ing. habil. Ionelia VOICULESCU

Referenți științifici

Prof. univ. dr. ing. Gheorghe OANCEA

Prof. univ. dr. ing. ec. Dumitru NEDELCU

Prof. univ. dr. ing. habil. Gabriel-Radu FRUMUȘANU

Seria I 4: INGINERIE INDUSTRIALĂ Nr. 96
GALAȚI - 2024

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINTE INGINEREȘTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINTE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria E 3: **Marketing**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**
- Seria SJ: **Drept**

Domeniul fundamental ȘTIINTE UMANISTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINTE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINTE BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**
- Seria F: **Farmacie**

MULȚUMIRI

Elaborarea acestei lucrări de doctorat nu ar fi fost posibilă fără sprijinul și îndrumările directe sau indirecte ale unor oameni deosebiți, cărora doresc să le adresez alee mulțumiri și să îi asigur de toată considerația, prețuirea și recunoștința mea.

În primul rând, îmi exprim profunda recunoștință față de coordonatorul meu științific, doamna prof. univ. dr. ing. Elena Scutelnicu, din cadrul Facultății de Inginerie a Universității „Dunărea de Jos” din Galați, pentru ghidarea atentă, răbdarea și susținerea constantă, pe tot parcursul programului de studii universitare de doctorat. Înalta ținută academică, expertiza și observațiile critice valoroase au fost esențiale, atât pentru dezvoltarea mea profesională, cât și pentru realizarea acestei lucrări și valorificarea rezultatelor cercetărilor științifice. Cu măiestrie m-ați ghidat în fundamentarea științifică, în pregătirea doctorală, prin sprijinul necondiționat în elaborarea articolelor și lucrărilor susținute în cadrul conferințelor naționale și internaționale și publicate, ulterior, în reviste și volume cu impact în lumea științifică.

Alee mulțumiri adresez, în egală măsură, doamnei prof. univ. dr. ing. habil. Ionelia Voiculescu, din cadrul Universității Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București, pentru coordonarea științifică și sprijinul acordat în interpretarea și prelucrarea rezultatelor experimentale. Alături de doamna prof. univ. dr. ing. Elena Scutelnicu, doamna prof. univ. dr. ing. habil. Ionelia Voiculescu a reprezentat un reper profesional, susținându-mă în depășirea unor obstacole apărute în programul de cercetare științifică.

Mă simt foarte onorat și mulțumesc, pe această cale, membrilor comisiei de doctorat că au acceptat să facă parte din comisia de susținere publică a tezei mele de doctorat și, totodată, le mulțumesc pentru analiza atentă și evaluarea profesionistă a rezultatelor cercetărilor științifice, prezentate în această lucrare. Adresez sincere și calde mulțumiri distinșilor referenți oficiali - domnul prof. univ. dr. ing. Gheorghe Oancea de la Universitatea Transilvania din Brașov, domnul prof. univ. dr. ing. ec. Dumitru Nedelcu de la Universitatea „Gheorghe Asachi” din Iași, domnul prof. univ. dr. ing. Gabriel-Radu Frumușanu de la Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați - pentru observațiile formulate asupra fondului și formei lucrării și pentru informațiile și sfaturile utile pe care le-am primit, în special, în perioada de finalizare a tezei de doctorat.

Mulțumesc doamnei prof. univ. dr. ing. Julia Mîrza-Roșca, cercetător și director al Laboratorului de Nanoștiințe și Nanomateriale al Universității Las Palmas de Gran Canaria, Spania, pentru observațiile prețioase și pentru sprijinul tehnic care mi-au fost de un real folos pe parcursul elaborării tezei de doctorat.

Adresez calde mulțumiri membrilor comisiei de îndrumare, formată din domnul prof. univ. dr. ing. Cătălin Fetecău, doamna conf. univ. dr. ing. Carmen Cătălina Rusu, domnul conf. univ. dr. ing. Dan Cătălin Bîrsan, pentru sprijinul permanent, pentru observațiile și discuțiile constructive asupra obiectivelor tezei de doctorat și metodologiei de cercetare care mi-au permis să identific cele mai bune soluții tehnice în rezolvarea tematicii de mare actualitate și interes pentru industrie.

Mulțumesc domnului conf. univ. dr. ing. Octavian Mircea și domnului șef lucrări univ. dr. ing. Luigi-Renato Mistodie pentru încrederea oferită în perioada de formare profesională, pentru stimularea interesului meu pentru cercetare și pentru sprijinul acordat în realizarea experimentelor, domnului prof. univ. dr. ing. Costel Iulian Mocanu pentru sprijinul acordat în determinarea nivelului de tensiuni, generat de procesul de depunere prin sudare a aliajului multi-element, domnului șef lucrări univ. dr. ing. Vasile Bașliu, din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați, și doamnei conf. univ. dr. ing. Georgiana Chișiu, din cadrul Universității Naționale de Știință și Tehnologie Politehnica București, pentru suportul tehnic acordat în pregătirea și investigarea probelor.

Mulțumesc domnului ing. Liviu Bogdan, de la Liberty Galați, care a facilitat sponsorizarea activităților mele experimentale, prin furnizarea de materiale metalice, colegilor și colaboratorilor din cadrul Departamentului Ingineria Fabricației pentru sprijinul moral și pentru discuțiile tehnice care mi-au oferit noi perspective asupra temei de cercetare și m-au stimulat în finalizarea demersului științific.

Mulțumesc personalului auxiliar didactic și nedidactic, în special domnului Paul Mironov, pasionat de modelarea metalului prin sudare, un adevărat creator de artă și frumos, care m-a ajutat în realizarea probelor și depunerea straturilor din aliaje multi-element pe substratul din oțel.

Mulțumesc conducerii Universității „Dunărea de Jos” din Galați și conducerii Școlii Doctorale de Inginerie Mecanică și Industrială care au creat mecanismele ce mi-au permis desfășurarea în bune condiții a cercetărilor, au sprijinit dezvoltarea infrastructurii și m-au susținut financiar pe perioada studiilor doctorale.

Sunt profund recunoscător părinților mei și familiei mele, cărora le mulțumesc, pentru încurajările permanente și sprijinul necondiționat pe care mi le-au acordat pe toată perioada studiilor de doctorat.

Metodologia de cercetare și identificarea soluțiilor tehnice optime pentru rezolvarea unei teme de mare actualitate, cu aplicații în domenii industriale strategice, precum și elaborarea tezei de doctorat, care sper să contribuie semnificativ la creșterea gradului de cunoaștere în domeniul dezvoltării materialelor avansate, au reprezentat adevărate provocări pentru cariera mea de inginer.

Mulțumesc tuturor celor, nominalizați sau nu anterior, care mi-au fost alături în această aventură a cunoașterii și îi asigur de prețuirea și recunoștința mea. Pentru mine a fost o onoare să colaborez cu cercetători de excepție, a căror rezultate științifice sunt recunoscute la nivel internațional și sper ca teza de doctorat să reprezinte o deschidere spre noi perspective și direcții de cercetare în domeniile fabricației și dezvoltării de materiale avansate.

Galați, 2024

Cu deosebită considerație,

Ing. George SIMION

CUPRINS

| | | |
|--|-----------|-----------|
| Introducere | 9 | 8 |
| Introduction | 12 | - |
| Listă de notații și abrevieri | 15 | - |
| Listă de figuri | 17 | - |
| Listă de tabele | 25 | - |
| 1. Stadiul actual al dezvoltării aliajelor multi-element | 27 | 11 |
| 1.1. Introducere | 27 | 11 |
| 1.2. Caracterizarea aliajelor cu entropie înaltă | 28 | 11 |
| 1.2.1. Caracterizarea chimică a aliajelor cu entropie înaltă | 28 | 11 |
| 1.2.2. Caracterizarea mecanică a aliajelor cu entropie înaltă | 33 | 12 |
| 1.3. Procedee de fabricație a aliajelor multi-element | 39 | 12 |
| 1.3.1. Procedee de obținere a semifabricatelor din aliaje multi-element | 39 | 12 |
| 1.3.2. Procedee de depunere a aliajelor multi-element | 42 | 13 |
| 1.4. Concluzii | 46 | 14 |
| 1.5. Motivația alegerii temei și direcțiile de cercetare | 47 | 14 |
| 2. Metodologia de cercetare, materiale și echipamente | 49 | 16 |
| 2.1. Obiectivele tezei de doctorat și metodologia de cercetare | 49 | 16 |
| 2.2. Materiale utilizate în programul experimental | 50 | 17 |
| 2.3. Echipamente utilizate în programul experimental | 51 | 18 |
| 2.3.1. Echipament multi-proces pentru depunere și retopire prin sudare | 51 | 18 |
| 2.3.2. Echipamente pentru analiza structurii și măsurarea microdureții | 53 | 18 |
| 2.3.3. Echipamente pentru analiza rezistenței la uzură și la coroziune | 55 | 19 |
| 2.3.4. Echipamente pentru determinarea valorilor temperaturii și tensiunilor | 56 | 19 |
| 2.4. Concluzii | 58 | 19 |
| 3. Procedeu original de obținere a aliajelor multi-element | 59 | 20 |
| 3.1. Introducere | 59 | - |
| 3.2. Descrierea procedurii. Elemente originale. Studii de caz | 60 | 20 |
| 3.2.1. Procedeu nou de obținere a aliajelor multi-element din clasa AlCrFeNi | 60 | 20 |
| 3.2.2. Depuneri cu aliaje multi-element din clasa AlCrFeNi – Studii de caz | 61 | 21 |
| 3.3. Concluzii | 63 | 22 |
| 4. Cercetări experimentale privind proprietățile aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} deșus prin sudare WIG | 64 | 23 |
| 4.1. Desfășurarea programului experimental | 64 | 23 |
| 4.1.1. Selectarea verigelor pentru realizarea materialului de adaos | 64 | 23 |
| 4.1.2. Studii preliminare pentru determinarea parametrilor optimi de proces | 65 | 24 |
| 4.1.3. Parametrii de depunere prin sudare pentru obținerea aliajului multi-element AlCr _{0,7} FeNiMo _{0,1} | 69 | 24 |

| | | |
|--|------------|-----------|
| 4.2. Analiza proprietăților straturilor de aliaj multi-element | 71 | 26 |
| 4.2.1. Determinarea experimentală a masei de aliaj multi-element depus | 71 | - |
| 4.2.2. Codificarea variantelor tehnologice aplicate | 72 | 26 |
| 4.2.3. Analiza structurii și compoziției chimice a aliajului multi-element | 73 | 26 |
| 4.2.4. Determinarea profilului de variație al durtății în aliajul multi-element | 120 | 34 |
| 4.2.5. Determinarea rezistenței la uzură a aliajului multi-element | 123 | 35 |
| 4.2.6. Determinarea rezistenței la coroziune a aliajului multi-element | 127 | 36 |
| 4.2.7. Aplicații industriale | 133 | 38 |
| 4.3. Concluzii | 133 | 39 |
| 5. Modelarea și simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} | 136 | 41 |
| 5.1. Introducere | 136 | - |
| 5.2. Modelarea și simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element AlCr _{0,7} FeNiMo _{0,1} | 137 | 41 |
| 5.2.1. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG fără retopire ulterioară | 138 | 41 |
| 5.2.2. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG cu retopire longitudinală | 144 | 43 |
| 5.2.3. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG cu retopire transversală | 149 | 45 |
| 5.2.4. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG cu retopire combinată | 154 | 47 |
| 5.3. Concluzii | 160 | 49 |
| 6. Validarea experimentală a modelului numeric dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} | 162 | 50 |
| 6.1. Program experimental pentru validarea modelului numeric | 162 | 50 |
| 6.1.1. Proiectarea și realizarea standului pentru determinarea experimentală a valorilor temperaturilor și nivelului de tensiuni | 162 | 50 |
| 6.1.2. Caracterizarea materialelor utilizate în programul experimental | 164 | 51 |
| 6.1.3. Parametrii procesului de depunere prin sudare WIG | 165 | 51 |
| 6.2. Modelarea cu elemente finite a câmpului de temperaturi și a nivelului de tensiuni | 165 | 52 |
| 6.2.1. Dezvoltarea și discretizarea modelului geometric | 165 | 52 |
| 6.2.2. Analiza cu elemente finite a câmpului termic | 167 | 52 |
| 6.2.3. Analiza cu elemente finite a nivelului de tensiuni echivalente Von Mises | 168 | 53 |
| 6.3. Validarea experimentală a modelului numeric | 169 | 53 |
| 6.4. Concluzii | 171 | 55 |
| 7. Concluzii finale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare | 172 | 56 |
| 7.1. Concluzii finale | 172 | 56 |
| 7.1.1. Stadiul dezvoltării aliajelor multi-element | 172 | 56 |
| 7.1.2. Procedeu original de obținere a aliajelor multi-element prin sudare WIG | 174 | 56 |
| 7.1.3. Caracterizarea aliajului AlCr _{0,7} FeNiMo _{0,1} obținut prin sudare WIG | 175 | 57 |
| 7.1.4. Modelarea și simularea procesului de depunere a aliajului AlCr _{0,7} FeNiMo _{0,1} , cu sau fără retopire, și validarea modelului numeric | 178 | 59 |
| 7.2. Contribuții personale | 179 | 59 |
| 7.3. Perspective și direcții viitoare de cercetare | 180 | 61 |

| | | |
|--------------------------------|------------|-----------|
| Bibliografie | 182 | 62 |
| Activitatea științifică | 200 | 69 |
| Curriculum Vitae | 203 | - |

***Precizare:** În rezumatul tezei de doctorat se păstrează numerotarea ecuațiilor, figurilor și tabelelor din teza de doctorat.*

INTRODUCERE

Cercetarea și dezvoltarea de noi materiale joacă un rol esențial în avansarea tehnologică și în îmbunătățirea calității vieții. Așa cum istoria umanității este împărțită în perioade precum epoca pietrei, epoca bronzului sau epoca fierului, se poate considera că dezvoltarea de noi materiale și a procedeelelor de obținere a acestora a stat la baza evoluției societății. Fiecare avans în calitatea și diversitatea materialelor a permis inovații semnificative care au determinat progrese majore în diverse domenii, îmbunătățind astfel alimentația, medicina și alte ramuri care contribuie la starea de confort a oamenilor.

Începând cu secolul XIX știința materialelor a evoluat rapid, fiind dezvoltate și îmbunătățite oțelurile, superaliajele și materialele plastice și ceramice. În ultimele două decenii, o nouă categorie de materiale a atras atenția cercetătorilor din întreaga lume – aliajele cu entropie înaltă. Aceste noi materiale au particularitatea de a nu avea un element chimic dominant, fiind alcătuite din cel puțin patru sau cinci elemente componente.

Procentele elementelor chimice principale din aceste aliaje cu entropie înaltă pot fi variate în diferite proporții; în plus acestea pot fi microaliate cu alte elemente chimice, astfel că, posibilele combinații sunt practic nelimitate. Cercetările legate de aliajele cu entropie înaltă avansează continuu fiind investigate proprietăți precum duritatea; rezistența; ductilitatea; stabilitatea la temperatură ridicată sau scăzută; rezistența la oboseală, uzură și coroziune, multe dintre acestea depășindu-le pe cele ale aliajelor tradiționale [1,2].

În ciuda progreselor realizate, cercetarea și înțelegerea actuală a aliajelor cu entropie înaltă reprezintă doar începutul explorării acestui domeniu. Noi informații, observații și rezultate sunt dezvăluite în mod constant în lucrările publicate care au ca temă de cercetare aceste noi aliaje. Fazele structurale au o influență semnificativă asupra proprietăților mecanice ale aliajelor cu entropie ridicată, astfel, structura cubică cu fețe centrate generează o rezistență mai scăzută și o plasticitate mai ridicată în timp ce structura cubică cu volum centrat determină o rezistență mai ridicată dar și o plasticitate mai scăzută. Diversitatea vastă a posibilelor compoziții chimice generează un număr considerabil de aliaje care necesită analize. Schimbarea concentrației unui singur element chimic din cadrul aceleiași clase de aliaje poate avea un impact semnificativ asupra microstructurii și proprietăților acestora [3].

Pe măsură ce numărul de experimente dedicate studiului aliajelor cu entropie înaltă a crescut, unii cercetători au sugerat că entropia nu este neapărat caracteristica principală care conferă proprietățile unice acestor materiale. În consecință, au fost propuse denumiri alternative, precum aliaje multi-element, aliaje multi-component sau aliaje complexe compoziționale. Aceste termeni alternativi reflectă mai bine diversitatea și complexitatea compozițională a acestor aliaje, sugerând că proprietățile lor excepționale nu se datorează exclusiv entropiei ridicate, ci și interacțiunilor complexe dintre numeroasele elemente constitutive [4].

Deși un număr semnificativ de rezultate obținute de către cercetătorii care au studiat proprietățile aliajelor multi-element au fost promițătoare, aceste materiale încă întâmpină dificultăți în a se impune în domeniul industrial. Principalul motiv pentru această situație poate fi

considerat costul ridicat de producție, generat atât de prețul materiei prime utilizate, cât și de echipamentele și procesele tehnologice necesare pentru fabricarea lor. Astfel, pentru a facilita adoptarea pe scară largă a aliajelor multi-element în industrie, este necesară dezvoltarea de strategii eficiente pentru reducerea costurilor de producție. Acestea ar putea include optimizarea proceselor de fabricație, utilizarea de materii prime alternative mai economice și inovarea în domeniul tehnologiilor de procesare.

Analiza stadiului actual de dezvoltare în domeniul aliajelor multi-element, a condus la *ideea dezvoltării unei metode inovative de obținere a acestor materiale speciale, care ar facilita utilizarea lor pe scară largă în domenii industriale strategice (militar, naval etc.).*

În cadrul programului a fost conceput, optimizat și pus în practică un nou procedeu de obținere a unor depuneri cu aliajul multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi. Alegerea acestui tip de aliaj este motivată de proprietățile mecanice superioare - duritate, rezistență la uzură și rezistență la coroziune – caracteristici care îl recomandă pentru utilizarea în aplicațiile în care se urmărește îmbunătățirea proprietăților suprafețelor oțelurilor carbon obișnuite. Acest procedeu este eficient din punct de vedere economic și astfel, poate contribui la realizarea transferului aliajelor multi-element din domeniul de cercetare în cel industrial. Noutatea acestui procedeu a fost recunoscută prin acordarea brevetului de invenție nr 135988/29.03.2024, care a fost recompensat cu numeroase medalii, premii și trofee la Saloanele de Inventică EUROINVENT (Iași, 2023), UGAL INVENT (Galați, 2023), INVENTICA (Iași 2024) și alte evenimente științifice.

Direcțiile de cercetare stabilite pentru derularea programului experimental și atingerea obiectivelor tezei de doctorat sunt organizate astfel:

- Dezvoltarea unui procedeu inovativ de obținere a aliajelor multi-element.
- Optimizarea procesului de depunere prin sudare, în vederea obținerii unor depuneri de calitate a aliajului multi-element, clasa de aliere AlCrFeNi, pe un substrat din oțel obișnuit.
- Studiarea proprietăților aliajelor multi-element, depuse prin sudare pe un substrat de oțel carbon, în vederea caracterizării mecanice și metalurgice a acestor aliaje.
- Modelarea cu elemente finite și simularea procesului de depunere, în vederea investigării efectelor termice și mecanice, generate în timpul procesului de sudare (distribuția câmpului termic, cicluri termice, tensiuni și deplasări cauzate de transferul de căldură).

În capitolul 1 al tezei de doctorat este dezvoltat stadiul actual al cercetărilor în domeniul dezvoltării aliajelor multi-element. Au fost studiate aspecte privind compoziția chimică și caracteristicile mecanice ale acestora și au fost analizate principalele procedee de obținere a aliajelor multi-element, atât în formă brută, cât și sub formă de depuneri. În finalul capitolului au fost prezentate motivația alegerii temei, obiectivele și direcțiile de cercetare abordate în cadrul programului de studii de doctorat.

În capitolul 2, au fost prezentate principalele echipamentele și metode utilizate în metodologia de cercetare. Rezultatele obținute în urma programului experimental au fost investigate cu sprijinul colaboratorilor din trei centre universitare: *Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București și Universitatea Las Palmas de Gran Canaria, Spania.*

În capitolul 3 este descris conceptul teoretic al procedeuului original de obținere a aliajelor multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi. Procedeuul constă în dezvoltarea unui fascicul de baghete, cu compoziții și/sau diametre diferite și depunerea prin topire a acestuia, prin procedeu de sudare Wolfram Inert Gaz (WIG), pe suprafața unui material substrat. Fasciculul poate conține una sau mai multe baghete din aluminiu, oțel inoxidabil și din aliaj nichel-crom. Compoziția chimică a aliajului multi-element poate fi controlată prin diametrul și numărul baghetelor utilizate. Un alt element original al metodei inovative se referă la topirea ulterioară a straturilor depuse, prin procedeu WIG, fără material de adaos, pe direcție transversală, longitudinală și combinată, în

raport cu direcția de depunere inițială, cu rol de tratament termic și omogenizare a compoziției chimice.

În capitolul 4 sunt investigate proprietățile straturilor depuse prin sudare cu aliaj multi-element. A fost necesară optimizarea parametrilor de sudare, în scopul obținerii unor depuneri fără defecte, în special fisuri. Epruvetele au fost analizate din punct de vedere chimic și mecanic. Analiza compoziției chimice a arătat ca elementele chimice sunt uniform distribuite în materialul depus. Au fost evaluate modificările de structură, duritatea, rezistența la uzură și la coroziune a straturilor depuse prin sudare, în vederea identificării de aplicații industriale în care se poate aplica soluția tehnică originală de obținere a depunerilor din aliaj multi-element, clasa de aliere AlCrFeNi. De asemenea, au fost prezentate avantajele acestei metode originale, în comparație cu aliajele tradiționale utilizate, în mod curent, în industrie.

În capitolul 5, a fost dezvoltat un model cu elemente finite pentru modelarea și simularea procesului de depunere a aliajului multi-element pe un substrat din oțel carbon S235. Scopul acestui demers a fost de a analiza efectele termice (câmpuri și cicluri termice), nivelul de tensiuni și deplasările cauzate de transferul termic din timpul procesului de depunere prin sudare.

În capitolul 6, sunt prezentate și analizate rezultatele validării experimentale a modelului numeric dezvoltat. În perioada derulării programului de studii de doctorat, a fost proiectat și realizat un dispozitiv original, cu ajutorul căruia au fost determinate experimental variațiile de temperatură, prin metoda termocuplurilor, și tensiunile dezvoltate în structura metalică, prin metoda tensometriei.

În capitolul 7, sunt prezentate concluziile finale ale studiului proprietăților straturilor depuse prin sudare WIG, cu sau fără retopire, din aliaj multi-element, depus pe materialul substrat din oțel. În același capitol, sunt prezentate contribuțiile personale la creșterea nivelului de cunoaștere în domeniul dezvoltării materialelor avansate, cum sunt și aliajele multi-element. În final, sunt prezentate câteva direcții viitoare de cercetare care, cu siguranță, vor deschide noi perspective pentru explorări ulterioare și la obținerea unor rezultate care vor stârni, în continuare, interesul cercetătorilor și reprezentanților din industrie.

CAPITOL 1

Stadiul actual al dezvoltării aliajelor multi-element

1.1. Introducere

Din cele mai vechi timpuri, civilizația umană a depus eforturi continue pentru descoperirea de noi metale și aliaje, dar și pentru dezvoltarea de materiale inovative care au avut un rol esențial în îmbunătățirea calității vieții, prin extinderea gamei de aplicații tehnice. Începând cu epoca bronzului, aliajele au fost dezvoltate, în mod tradițional, conform paradigmei „elementului chimic de bază”. Prin această metodă de elaborare, au fost alese unul sau două elemente chimice principale, cum ar fi cuprul în bronzuri, fierul în oțeluri, aluminiul în aliajele pe baza de aluminiu sau nichelul și cromul în super aliaje. Aceste elemente chimice erau amestecate în proporții prestabilite, la care, prin adăugarea altor elemente de aliere, în procente mai scăzute, se puteau obține materiale cu proprietăți superioare [5].

În ultimele decenii, datorită evoluției și rezultatelor înregistrate în domeniul elaborării materialelor, o categorie nouă de aliaje a început să capteze atenția cercetătorilor pe plan mondial și anume aliajele cu entropie înaltă (HEA – High Entropy Alloys) [3,4,6–14]. Aceste aliaje sunt compuse din cel puțin patru sau cinci elemente chimice cu concentrații cuprinse între 5 și 35%, fără ca vreunul dintre acestea să fie dominant. Pe lângă elementele chimice principale, aliajele HEA pot fi microaliante, în concentrații mai mici de 5%, și cu alte elemente, în scopul îmbunătățirii caracteristicilor mecanice ale materialului.

Compoziția specifică și distinctivă a aliajelor multi-element conferă aliajelor cu entropie înaltă proprietăți mecanice speciale, cum sunt rezistență și duritate înaltă, rezistență la uzură, la coroziune și la oxidare la temperaturi ridicate și o bună stabilitate structurală. Aceste proprietăți speciale fac din aliajele cu entropie înaltă, materiale adecvate pentru o gamă largă de aplicații industriale [15,16].

Datorită capacității aliajelor cu entropie înaltă de a-și menține proprietățile mecanice, atât la temperaturi scăzute [17,18], cât și la temperaturi ridicate [19,20], înlocuirea, în aplicațiile industriale, a aliajelor tradiționale cu HEA este cât se poate de firească.

1.2. Caracterizarea aliajelor cu entropie înaltă

1.2.1. Caracterizarea chimică a aliajelor cu entropie înaltă

În mod tradițional, metalele pure și aliajele utilizate în aplicații industriale se bazează aproape în întregime pe un compus sau un element principal. Materialele metalice pure, cu un grad de impurificare minim, sunt folosite în industria bijuteriilor, în diverse aplicații din domeniile electric, optic sau în alte aplicații specializate. Adăugarea de elemente de aliere are ca efecte îmbunătățirea caracteristicilor mecanice, fizice și chimice, materialele obținute devenind extrem de interesante și versatile pentru utilizarea, pe scară largă, în industrie. Metalurgii au explorat dezvoltarea de noi aliaje, prin combinarea a mai multor elemente chimice, în proporții ridicate și aproximativ egale.

În urmă cu două decenii, două grupuri de cercetători au propus, în mod independent, investigarea unei noi categorii de aliaje care conține elemente chimice multiple, în concentrații aproximativ echiatomice. Cele două echipe au fost conduse de cercetătorii Yeh J.W. și Cantor B. și au publicat primele articole la sfârșitul anului 2004 [21,22]. Jien- Wei Yeh și echipa sa au avansat un raționament interesant pentru investigarea acestor aliaje, sugerând ipoteza că prezența a mai multor elemente (cinci sau mai multe), în proporții aproape egale, ar crește entropia configurațională suficient de mult, pentru a depăși tendința de formare a compușilor intermetalici care pot avea efecte negative asupra proprietăților aliajelor.

Ei au introdus un termen nou și sugestiv pentru această clasă de materiale care conține cinci sau mai multe elemente chimice, în concentrații relativ egale de 5%...35%, denumind-o aliaje cu entropie înaltă. Alți cercetători au sugerat nume alternative, cum ar fi aliaje multi-component (multi-component alloys), aliaje complexe compoziționale (compositionally complex alloys) sau aliaje multi-element (multiprincipal-element alloys). În ciuda faptului că unii cercetători consideră că entropia nu este factorul principal, responsabil pentru structura și proprietățile acestor aliaje, termenul „aliaje cu entropie înaltă” este cel care, în mod probabil, se va impune [4].

Aliajele cu entropie înaltă prezintă caracteristici specifice, comparativ cu aliajele convenționale, diferența fiind dată de existența mai multor elemente chimice în proporții aproximativ echimolare, fără a exista un element chimic dominant. Din acest motiv, în aliajele cu entropie înaltă apar efecte specifice a căror influență este mult mai pronunțată, în comparație cu aliajele tradiționale. Yeh J.W. a investigat și a identificat aceste efecte, cu referire la efectul de entropie înaltă (high entropy effect), efectul de difuziune lentă (sluggish diffusion), deformarea severă a rețelei cristaline (severe lattice distortion) și efectul de cocktail (cocktail effect).

1.2.2. Caracterizarea mecanică a aliajelor cu entropie înaltă

Din analiza literaturii de specialitate, s-a constatat că proprietățile mecanice ale aliajelor cu entropie înaltă au fost subiectul unor ample cercetări, fiind investigate duritatea [23–27], rezistența la compresiune [28–31], rezistența la întindere [32–37], rezistența la uzură [38–42], rezistența la oboseală [43–47], rezultatele demonstrând că aceste aliaje au proprietăți care permit extinderea ariei de aplicații industriale.

Deși există aliaje cu entropie înaltă care prezintă, la temperatura mediului ambiant, proprietăți mecanice superioare aliajelor tradiționale, caracteristica principală care recomandă utilizarea HEA pentru anumite aplicații industriale este capacitatea lor de a-și menține proprietățile la temperaturi ridicate sau scăzute.

1.3. Procedee de fabricație a aliajelor multi-element

1.3.1 Procedee de obținere a semifabricatelor din aliaje multi-element

Cea mai uzuală metodă de obținere a semifabricatelor din aliaje multi-element este topirea în cuptoare cu arc electric și atmosferă controlată a elementelor chimice componente, aflate sub formă de pulberi sau bare, tije, profile etc. [48–50]. Procesul implică formarea unui arc electric între un electrod nefuzibil și amestecul de metale care urmează să fie topit [51].

Pentru a asigura o omogenitate crescută a aliajului multi-element, amestecul rezultat este supus mai multor cicluri de întoarcere și retopire [52–54]. Prin acest procedeu, cercetătorii întâmpinate în urma aplicării acestei tehnologii de fabricație constă în apariția unei structuri eterogene, caracterizate prin segregarea elementelor chimice din componența aliajului multi-

element, în special atunci când sunt implicate elemente cu densitate mare și temperatură de topire înaltă, cum ar fi W, Ta sau Nb [55–57].

În literatura de specialitate sunt prezentate și alte procedee prin care se pot obține semifabricate din aliaje multi-element, printre care se pot enumera:

- Sinterizarea [27,30,58].
- Fabricație aditivă [59,60],
- Metoda de solidificare Bridgman [61–63],
- Topirea prin inducție [64–66],
- Alierea mecanică [67,68].

1.3.2. Procedee de depunere a aliajelor multi-element

Comparativ cu materialele tradiționale, costurile de producție asociate aliajelor multi-element sunt semnificativ mai ridicate, fiind determinate de complexitatea proceselor tehnologice necesare pentru obținerea semifabricatelor din aliaje multi-element, de costurile cu materia primă și de costurile instalațiilor de elaborare.

Din cauza costurilor ridicate de obținere a aliajelor multi-element, cercetătorii și-au îndreptat atenția și au început să investigheze diverse metode de îmbunătățire a calității și proprietăților suprafețelor materialelor tradiționale, dar cu costuri mult mai scăzute. Aceste metode se referă la depunerea de filme subțiri, dar și la depunerea de straturi de grosimi mai mari [69–74]. Procesul de placare a oțelurilor tradiționale cu aliaje multi-element reprezintă o perspectivă viabilă pentru transferul tehnologic de obținere a unor materiale inovatoare, din sfera cercetării către industrie. În literatura de specialitate au fost identificate mai multe procedee pentru depunerea de aliaje multi-element pe suprafața unui material substrat, substrat care, în mod obișnuit, este din oțel carbon. În cele ce urmează, sunt prezentate câteva metode de obținere a unor depuneri cu proprietăți speciale, cum sunt aliajele cu entropie medie și înaltă:

- Pulverizarea cu magnetron [75–79],
- Placarea prin procedeul LASER [80–83],
- Placarea prin procedeul de sudare Wolfram Inert Gaz (WIG) [84,85],
- Placarea prin sinterizare [86,87].

Spre deosebire de metodele de obținere prin topire în cuptoare cu arc electric a lingourilor din aliaje cu entropie înaltă, procedeele de depunere prezintă avantajul unei solidificări rapide, determinată de grosimile mici ale straturilor. Conform studiilor existente în literatura de specialitate, solidificarea rapidă este considerată benefică pentru aliajele cu entropie înaltă, deoarece sunt limitate atât transformările de fază care au loc în cazul unei răcirii lente, cât și difuzia elementelor și formarea compușilor intermetalici [69].

Dezavantajele metodelor prezentate mai sus sunt legate de grosimea mică a straturilor depuse prin pulverizare, utilizarea unor instalații complexe cu costuri ridicate, cum sunt magnetronul, instalațiile LASER, precum și necesitatea unor operații tehnologice pregătitoare, cum ar fi obținerea amestecului de pulberi și aplicarea unor proceduri premergătoare pentru topirea acestuia pe suprafața materialului substrat. De asemenea, se impune realizarea și manipularea sârmelor obținute din amestecul de diverse elemente chimice, ceea ce înseamnă operații suplimentare în procesul tehnologic. Sintetizând informațiile privind nivelul cercetărilor în domeniul obținerii de aliaje cu entropie înaltă și medie, se constată că se impune dezvoltarea unor noi procedee de depunere a aliajelor multi-element, care să le facă eficiente și atractive, din punct de vedere al costurilor, pentru o gamă largă aplicații industriale.

1.4. Concluzii

În urma identificării și analizei detaliate a literaturii de specialitate, referitoare la stadiul actual de dezvoltare a aliajelor multi-element, se pot sintetiza următoarele concluzii:

- Aliajele cu entropie înaltă sunt compuse din cel puțin patru sau cinci elemente chimice, având concentrații cuprinse în intervalul 5-35%, în proporții echiatomice sau aproximativ echiatomice, fără ca un element chimic să fie considerat dominant în compoziția chimică.
- Au fost identificate aliaje cu entropie înaltă care au caracteristici mecanice deosebite la temperatura mediului ambiant, însă principala caracteristică ce le recomandă pentru utilizarea în aplicații industriale și pentru înlocuirea unor aliaje tradiționale este capacitatea acestora de a-și menține proprietățile la temperaturi ridicate sau scăzute.
- Principalele procedee clasice de obținere a semifabricatelor din aliaje cu entropie înaltă sunt topirea în cuptoare cu arc electric și atmosferă controlată și topirea prin inducție.
- Depunerea aliajelor multi-element pe substrat de material convențional se realizează prin pulverizare magnetică în sistem magnetron, placare cu LASER, electrodepunere, pulverizare cu plasmă.
- Pentru obținerea aliajelor multi-element care să satisfacă, concomitent, criteriul calității și pe cel de cost, este nevoie de continuarea investigațiilor pentru dezvoltarea de tehnologii de fabricație inovative, eficiente și mai puțin costisitoare, dar și de cercetări complexe interdisciplinare pentru a identifica aplicațiile industriale cele mai potrivite.

1.5. Motivația alegerii temei și direcțiile de cercetare

Motivația alegerii temei, abordate în cadrul tezei de doctorat, este creșterea gradului de cunoaștere în următoarele direcții:

- dezvoltarea procedeelelor de obținere a aliajelor multi-element care să satisfacă criteriul calității și să ofere avantaje economice certe beneficiarilor industriali;
- dezvoltarea de rețete noi pentru obținerea de aliaje multi-element cu entropie medie;
- studierea comportării și proprietăților aliajelor multi-element;
- identificarea și extinderea ariei aplicațiilor industriale.

În urma analizei stadiului actual, axat pe obținerea aliajelor multi-element, a fost identificată oportunitatea dezvoltării unei metode inovative de obținere a acestor materiale speciale care va face posibil transferul tehnologic din domeniul cercetării în industrie. În această lucrare, va fi prezentată o tehnologie inovativă de depunere a aliajelor multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi și vor fi investigate proprietățile acestor aliaje, pentru a identifica cele mai adecvate aplicații industriale. Alegerea acestui tip de aliaj este motivată de proprietățile mecanice superioare - duritate, rezistență la uzură și rezistență la coroziune – caracteristici care îl recomandă pentru utilizarea în aplicațiile în care se urmărește îmbunătățirea proprietăților suprafețelor oțelurilor carbon obișnuite. Noutatea și originalitatea procedeeului de obținere a aliajelor multi-element, dezvoltat în cadrul programului de studii doctorale, au fost brevetate, autorii obținând brevetul de invenție nr. 135988/29.03.2024, premiat cu numeroase medalii, premii, trofee la Saloanele de Invenție EUROINVENT (Iași, 2023), UGAL INVENT (Galați, 2023), INVENTICA (Iași, 2024) și cu ocazia premierii rezultatelor cercetărilor de către instituție.

Direcțiile de cercetare stabilite pentru derularea programului experimental și atingerea obiectivelor tezei de doctorat sunt organizate astfel:

- Dezvoltarea unui procedeu inovativ de obținere a aliajelor multi-element.
- Optimizarea procesului de depunere prin sudare, în vederea obținerii unor depuneri de calitate a aliajului multi-element, clasa de aliere AlCrFeNi, pe un substrat din oțel obișnuit.

- Studiarea proprietăților aliajelor multi-element, depuse prin sudare pe un substrat de oțel carbon, în vederea caracterizării mecanice și metalurgice a acestor aliaje:
 - Analiza macroscopică a probelor obținute, pentru a evalua calitatea, aspectul și înălțimea straturilor depuse. Se urmărește obținerea unor depuneri fără defecte vizibile, cum ar fi goluri, nepătrunderi sau pori.
 - Analiza microscopică a epruvetelor, pentru investigarea zonei de trecere și a uniformității liniei de fuziune, pentru evaluarea gradului de omogenitate și determinarea granulației materialului depus. Pot fi detectate defecte microscopice, cum ar fi fisuri, pori, incluziuni nedorite și alte discontinuități care ar putea afecta integritatea stratului depus și calitatea aliajului multi-element.
 - Analiza compoziției chimice a stratului depus, pentru a stabili gradul de participare al materialului de bază la formarea băii de metal topit. De asemenea, se poate determina distanța pe care se observă fenomenul de difuzie a elementelor chimice, din materialul depus în materialul substrat și invers.
 - Determinarea profilului de variație al microdureității aliajului, pentru a stabili grosimea minimă până la care stratul depus poate fi prelucrat mecanic sau se poate uza în exploatare.
 - Determinarea rezistenței la uzură și a rezistenței la coroziune a aliajului depus, în vederea realizării unei analize comparative cu materialele tradiționale, utilizate în prezent în aplicații industriale, și care ar putea fi înlocuite cu aliajele multi-element.
- Modelarea cu elemente finite și simularea procesului de depunere, în vederea investigării efectelor termice și mecanice, generate în timpul procesului de sudare (distribuția câmpului termic, ciclurile termice, nivelul de tensiuni și deplasările cauzate de transferul termic). Metoda este un instrument extrem de util în optimizarea parametrilor procesului de fabricație, în cazul de față al procesului de depunere prin sudare a unor aliaje multi-element cu entropie medie.

CAPITOL 2

Metodologia de cercetare, materiale și echipamente

2.1. Obiectivele tezei de doctorat și metodologia de cercetare

Obiectivele principale ale tezei de doctorat au fost dezvoltarea unui nou procedeu de depunere a aliajelor multi-element și investigarea proprietăților straturilor depuse prin sudare WIG, pentru atingerea cărora a fost stabilită metodologia de cercetare, prezentată în figura 2.1.

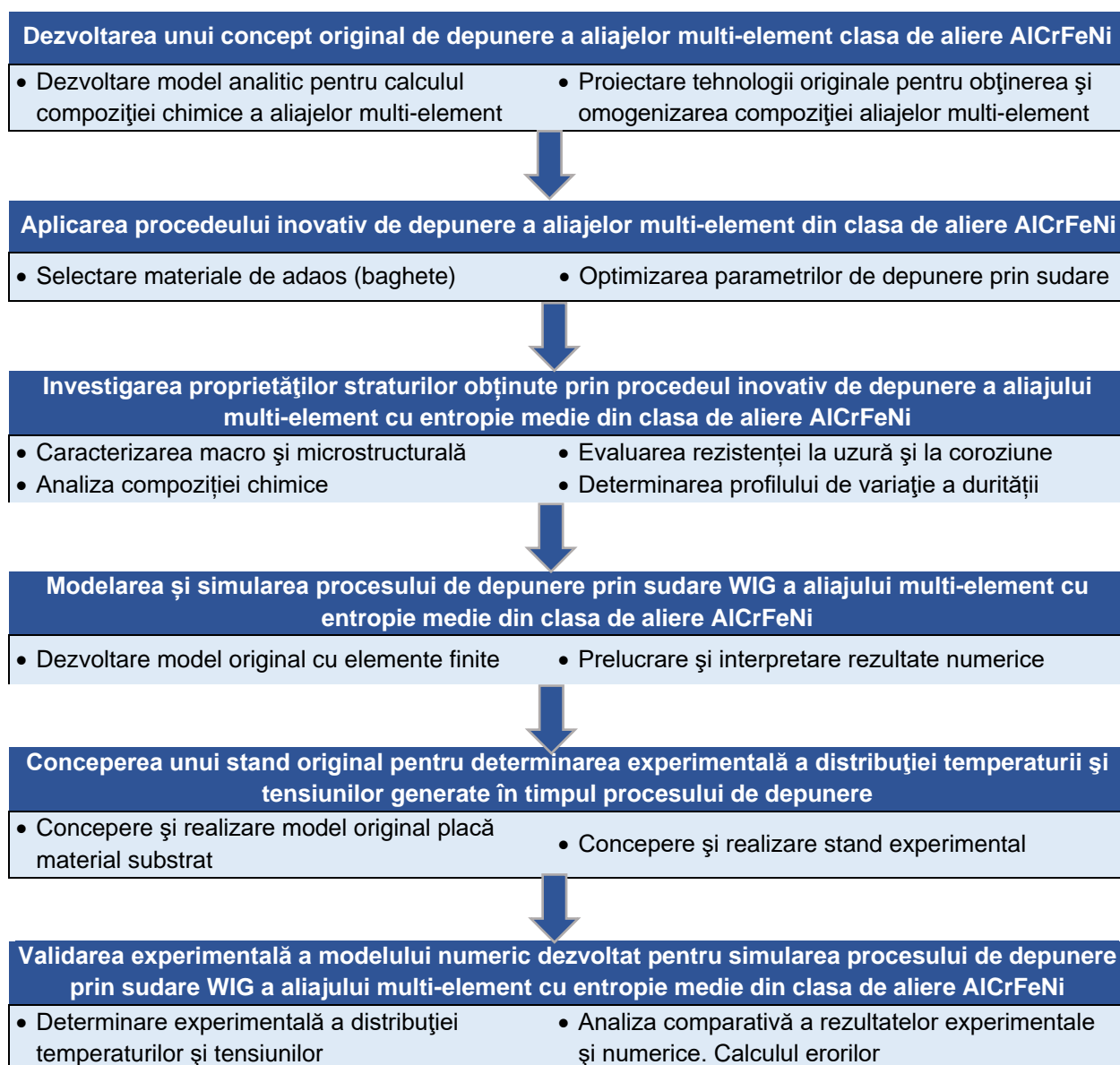


Fig. 2.1. Metodologia de cercetare aplicată pentru realizarea obiectivelor tezei de doctorat

2.2. Materiale utilizate în programul experimental

Materialul substrat utilizat în testele experimentale este oțelul structural S235 (EN 10025 – 2) ale cărui compoziție chimică și caracteristici mecanice, furnizate de producătorul LIBERTY Galați, sunt prezentate centralizat în tabelele 2.1 și 2.2. În vederea realizării practice a depunerilor cu aliajul multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi, au fost debitate plăci cu dimensiunile 40x100x12[mm], conform schemei din figura 2.2. Pentru a preveni incluziunile nedorite, contaminarea băii de metal topit cu oxizi și apariția altor defecte care pot fi dezvoltate în procesul de depunere, suprafața tablelor a fost curățată prin polizare.

Tabel 2.1. Compoziția chimică a oțelului substrat S235 (conform certificat producător)

| Material | C | Mn | Si | P | S | Al | Cu | Cr |
|----------|------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|------|
| S235 | 0,12 | 0,75 | 0,17 | 0,016 | 0,011 | 0,038 | 0,06 | 0,04 |
| | Ni | V | Mo | Ti | B | N | Fe | - |
| | 0,03 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,0002 | 0,0064 | 98,22 | - |

Tabel 2.2. Caracteristicile mecanice ale oțelului substrat S235 (conform certificat producător)

| Material | Limita de curgere σ_y [MPa] | Rezistența la rupere σ_r [MPa] | Alungirea [%] | Duritate Vickers [HV] |
|----------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------|-----------------------|
| S235 | 320-350 | 440-450 | 32 | 155-190 |

Pentru depunerea prin sudare WIG (Wolfram Inert Gaz), în mediu de gaz protector inert, a materialului de adaos și obținerea aliajului multi-element, a fost realizat un fascicul de trei baghete, diferite din punct de vedere al compoziției chimice: o baghetă de aluminiu ALTIG AL99.7 (EN ISO 18273: S Al 1450 (Al99.5Ti)), o baghetă din oțel inoxidabil INTERROD 22 9 3 (EN ISO 14343-A: W 22 9 3 N L) și o baghetă din aliaj Ni-Cr NIROD 625 (EN ISO 18274-A: S Ni 6625 (NiCr22Mo9Nb)), ale căror compoziții chimice sunt prezentate în tabelele 2.3, 2.4 și 2.5.

Tabel 2.3. Compoziția chimică a baghetei de aluminiu ALTIG AL99.7

| Si | Mn | Cr | Cu | V | Ti | Al | B | Fe | Zn | Mg |
|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|
| 0,06 | <0,01 | <0,17 | <0,01 | 0,01 | 0,01 | 99,8 | <0,01 | 0,09 | <0,01 | <0,01 |

Tabel 2.4. Compoziția chimică a baghetei din oțel inoxidabil INTERROD 22 9 3

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | N |
|-------|------|------|-------|-------|------|-----|------|------|------|
| 0,013 | 0,49 | 1,51 | 0,016 | 0,001 | 23,1 | 8,7 | 3,18 | 0,11 | 0,16 |

Tabel 2.5. Compoziția chimică a baghetei din aliaj Ni-Cr NIROD 625

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Nb | Cu | Ti | Al | Co | Fe |
|------|-----|------|-------|-------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|-----|
| 0,06 | 0,1 | 0,02 | 0,003 | 0,001 | 22,2 | 64,4 | 8,8 | 3,68 | 0,01 | 0,19 | 0,1 | 0,01 | 0,3 |

2.3. Echipamente utilizate în programul experimental

2.3.1. Echipament multi-proces pentru depunere și retopire prin sudare

Metoda aplicată pentru topirea fasciculului de baghete, în scopul obținerii depunerilor din aliaj multi-element, este procedeul de sudare WIG, cu electrod nefuzibil, în mediu de gaz protector Ar. Echipamentul de sudare multi-proces SAF-RO DIGIWAVE III 420, utilizat pentru procesele de depunere și retopire, face parte din infrastructura de cercetare a *Centrului de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV)*, din cadrul *Facultății de Inginerie, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați (UDJ Galați)*.

2.3.2. Echipamente pentru analiza structurii și măsurarea microdureității

Șlefuirea suprafețelor și aducerea lor la luciu metalic s-a realizat cu un echipament specific Remet LS 1, existent în infrastructura *Centrului de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (CC SUDAV)*. S-a aplicat o procedură de șlefuire umedă, utilizând succesiv hârtii abrazive cu granulații de 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000 și pâslă îmbibată cu pudră diamantată.

Analiza structurii straturilor depuse și retopite s-a realizat prin tehnicile de microscopie optică și electronică de baleiaj SEM (Fig. 2.8.), în Laboratorul LAMET din *Departamentul de Ingineria Calității și Tehnologii industriale, Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București (UNSTP București)*.



Fig. 2.8. Microscop electronic de baleiaj (Laborator LAMET, UNSTP București)



Fig. 2.9. Durimetru FALCON 500 (CC SUDAV, UDJ Galați)

Profilul de variație al microdureității HV₀₅ în straturile de aliaj multi-element a fost determinat cu echipamentul de măsurare a durezzaților FALCON 500 (Fig. 2.9) și programul software IMPRESSIONS™, existente în infrastructura de cercetare a *Centrului de Cercetări Avansate în*

Domeniul Sudării (SUDAV), din cadrul Facultății de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați.

2.3.3. Echipamente pentru analiza rezistenței la uzură și la coroziune

Proprietățile tribologice ale aliajului multi-element, depus prin sudare pe un substrat de oțel, au fost evaluate prin testul de abraziune umedă, desfășurat în cadrul *Laboratorului de Metrologie* din *Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București*, folosind echipamentul CSEM CALOWEAR.

Evaluarea rezistenței la coroziune a straturilor de aliaj multi-element a fost realizată în *Laboratorul de Nanoștiințe și Nanomateriale, Universitatea Las Palmas de Gran Canaria* (ULPGC), Spania, prin teste specifice, utilizând o soluție de clorură de sodiu (NaCl) 3,5% și un potențostat SP-150 produs de Biologic, Seyssinet-Pariset, Franța.

2.3.4. Echipamente pentru determinarea valorilor temperaturii și tensiunilor

În vederea măsurării temperaturilor, au fost utilizate șase termocupluri imersate de tip K. Valorile temperaturilor au fost înregistrate cu dispozitivul de achiziții date Lutron BMT-4208SD.

Măsurarea tensiunilor s-a realizat cu ajutorul mărcilor tensometrice de tipul 10/20 LY11. Mărcile au fost aplicate pe plăcuțe din oțel S235 cu dimensiunile 100x20x2mm.

Datele furnizate de măsurătorile cu mărcile tensometrice au fost colectate cu ajutorul dispozitivului de achiziții date de tip Quantum X, și, ulterior, au fost prelucrate cu programul software "CatmanEasy-AP". Conexiunea între mărcile tensometrice și dispozitivul de achiziție a datelor s-a realizat prin intermediul unui cablu de transmisie de date și a unor mufe cu opt porturi.

2.4. Concluzii

În acest capitol au fost prezentate principalele materiale, metode de cercetare, echipamente și dispozitive care au fost utilizate în derularea programului de cercetări avansate din cadrul programului de studii universitare de doctorat, desfășurat în următoarele locații:

- *Școala Doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială (SDIMI), Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați (UDJ Galați);*
- *Centrul de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (CC SUDAV), Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați (UDJ Galați);*
- *Laboratorul LAMET și Laboratorul de Metrologie, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București (UNSTP București);*
- *Laboratorul de Nanoștiințe și Nanomateriale, Universitatea Las Palmas de Gran Canaria, Spania (ULPGC).*

Trebuie menționat că anumite echipamente, cum sunt cele destinate testării rezistenței la uzură sau coroziune, măsurării temperaturilor, tensiunilor, necesită calibrare periodică, în scopul eliminării erorilor de măsurare și asigurării validității și preciziei rezultatelor cercetărilor.

CAPITOL 3

Procedeu original de obținere a aliajelor multi-element

Cercetările derulate în cadrul programului de studii de doctorat s-au concretizat în acordarea brevetului de invenție nr. 135988/29.03.2024 care se referă la un procedeu original de obținere a unor aliaje multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi. Invenția prezintă elemente de originalitate și progres tehnic, oferind o soluție economică avantajoasă pentru obținerea unor straturi depuse din aliaje multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi, cu grosimi variabile, neîngrădite de procesul tehnologic, prin aplicarea unei tehnologii de depunere prin sudare, în mediu de gaz protector inert (Ar), cu materiale de adaos standardizate, fără operații tehnologice pregătitoare [88].

3.2. Descrierea procedurii. Elemente originale. Studii de caz

Unul dintre obiectivele importante ale tezei de doctorat a fost dezvoltarea unei metode originale și inovative, avantajoase din punct de vedere economic, pentru obținerea unor straturi din aliaje multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi, cu proprietăți mecanice mult superioare celor ale substratului. Aceste straturi, cu grosimi variabile, nu sunt limitate de procesul tehnologic și sunt realizate printr-un procedeu convențional de depunere prin sudare (WIG), utilizând materiale de adaos standardizate, fără necesitatea efectuării de operații pregătitoare.

Cercetătorii care s-au concentrat pe investigarea aliajelor multi-element din clasa AlCrFeNi au concluzionat că aceste materiale prezintă rezistență mecanică, duritate și rezistență la uzură remarcabile [31,87,89,90], fiind adecvate pentru aplicații industriale în care suprafețele componentelor trebuie să aibă caracteristici mecanice superioare.

3.2.1. Procedeu nou de obținere a aliajelor multi-element din clasa AlCrFeNi

Procedeu de fabricație constă în topirea, prin metoda WIG, a unui fascicul de baghete cu compoziții chimice diferite și diametre identice sau diferite, cu scopul de a realiza depuneri cu aliaje multi-element, cu compoziție chimică controlată, pe un substrat din oțel carbon obișnuit. În funcție de caracteristicile mecanice urmărite, elementele chimice care intră în compoziția aliajului multi-element pot avea diferite procente atomice. De asemenea, aliajul multi-element poate fi microaliat și cu alte elemente chimice - C, Nb, Mn, Mo, Ta, W etc. - care exercită o influență pozitivă asupra proprietăților aliajelor. Fasciculul de baghete este introdus în spațiul arcului electric, format între electrodul nefuzibil de wolfram și materialul substrat. Pentru a asigura acoperirea uniformă a întregii suprafețe cu aliaj multi-element, cordoanele depuse sunt suprapuse parțial, succesiv, pe o lățime de aproximativ 30-60% din lățimea unei depuneri. Întreg procesul de depunere prin sudare se desfășoară într-o atmosferă de gaz protector inert (Ar). În scopul creșterii gradului de omogenizare chimică și a îmbunătățirii proprietăților mecanice ale aliajului depus, se realizează, ulterior, o retopire prin procedeu WIG, fără material de adaos suplimentar, pe direcție transversală, longitudinală sau combinată (transversală și longitudinală),

față de direcția inițială de depunere. Principiul acestui procedeu este schematizat în figura 3.1 unde 1 reprezintă electrod de wolfram, 2 - gaz de protecție (Ar), 3 - aliaj multi-element depus, 4 - fascicul de baghete, 5 – substrat (material de bază).

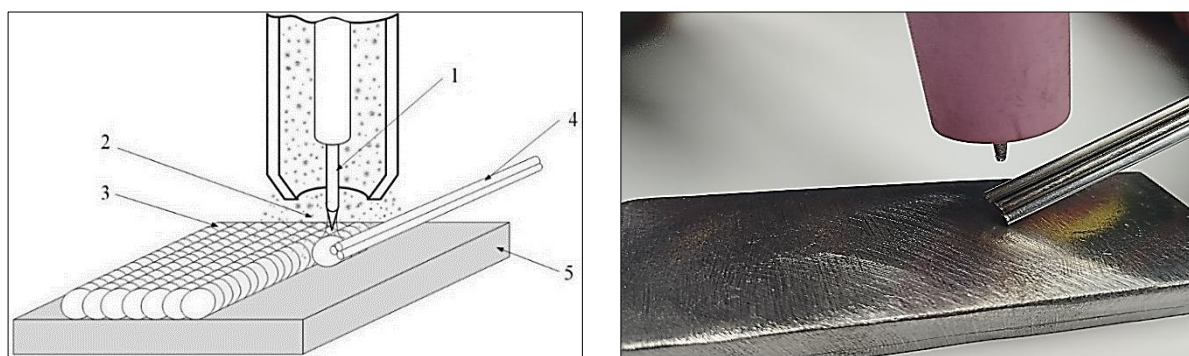


Fig. 3.1. Procedeu de obținere a aliajelor multi-element prin depunere prin sudare WIG

3.2.2. Depuneri cu aliaje multi-element din clasa AlCrFeNi – Studii de caz

Compoziția chimică a aliajului multi-element este controlată riguros prin intermediul compoziției chimice, a numărului și a diametrului baghetelor care formează fasciculul cu rol de material de adaos. Realizarea unor aliaje multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi, cu diferite compoziții chimice, obținute prin tehnica de depunere prin sudare WIG a unui fascicul de baghete, este exemplificată prin studiile de caz 1-2, selectate din cele 4 cazuri descrise în teza de doctorat.

Studiu de caz 1: fasciculul de sârme este format din baghete de Al, oțel inoxidabil și aliaj NiCr, baghetele având diametre identice de 2mm. Prin cântărire și pe baza certificatelor de compoziție chimică, furnizate de producător, se determină, prin calcul analitic, compoziția chimică și raportul atomic al noului aliaj multi-element. Astfel, rezultă aliajul AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, conform informațiilor din tabelul 3.2.

Tabel 3.2. Compoziția chimică a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}

| Elem. chim. | C | Mn | Si | S | P | Cr | Fe | Ni | Mo | Nb | Al | N |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| m [g] | 0,03 | 0,37 | 0,3 | 0,01 | 0,01 | 10,92 | 16,66 | 17,42 | 3 | 0,88 | 8,47 | 0,02 |
| wt [%] | 0,056 | 0,633 | 0,509 | 0,019 | 0,021 | 18,793 | 28,68 | 29,995 | 5,157 | 1,514 | 14,581 | 0,042 |
| at [%] | 0,23 | 0,57 | 0,9 | 0,03 | 0,01 | 17,88 | 25,4 | 24,9 | 2,66 | 0,55 | 26,73 | 0,15 |

Simbolizare: m este masa, wt – raport masic, at – raport atomic

Studiu de caz 2: în acest caz se urmărește reducerea riscului de fisurare a materialului depus prin sudare, prin diminuarea concentrației de Al la valori masice sub 7%, utilizând o baghetă de Al cu un diametru mai mic. Fasciculul de baghete, cu diametre diferite, este compus dintr-o baghetă din Al cu diametrul de 1,6mm, o baghetă din oțel inoxidabil cu diametrul de 2,4mm și o baghetă din aliaj NiCr cu diametrul de 2,4mm. Rezultă, astfel, aliajul Al_{0,5}Cr_{0,7}FeNiMo_{0,1} care are compoziția chimică prezentată în tabelul 3.3.

Tabel 3.3. Compoziția chimică a aliajului multi-element cu entropie medie Al_{0,5}Cr_{0,7}FeNiMo_{0,1}

| Elem. chim. | C | Mn | Si | S | P | Cr | Fe | Ni | Mo | Nb | Al | N |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| m [g] | 0,05 | 0,53 | 0,43 | 0,02 | 0,02 | 15,71 | 23,98 | 25,09 | 4,31 | 1,27 | 5,43 | 0,04 |
| wt [%] | 0,061 | 0,688 | 0,544 | 0,021 | 0,023 | 20,446 | 31,196 | 32,641 | 5,612 | 1,647 | 7,065 | 0,046 |
| tt [%] | 0,27 | 0,67 | 1,05 | 0,03 | 0,01 | 20,99 | 29,82 | 29,33 | 3,12 | 0,65 | 13,98 | 0,17 |

3.3. Concluzii

Studiile realizate în acest capitol, referitoare la un procedeu nou de obținere a aliajelor multi-element și care este și subiectul brevetului de invenție nr. 135988/29.03.2024, au condus la următoarele concluzii importante pentru domeniul elaborării de noi materiale, adecvate pentru aplicații industriale în care sunt cerute proprietăți speciale:

- Aliajele multi-element din grupa de aliere AlCrFeNi se pot obține prin aplicarea acestei metode inovative, utilizând vergele din aluminiu, oțel inoxidabil și din aliaj Ni-Cr.
- Prin tehnica inovativă prezentată în acest capitol – topirea și depunerea prin sudare WIG a unui fascicul de baghete - se pot realiza placări de calitate cu aliaje multi-element, obținându-se o îmbunătățire semnificativă a calității suprafețelor.
- Compoziția chimică a aliajelor multi-element, obținute prin noul procedeu brevetat, poate fi controlată prin selectarea atentă a vergelelor care intră în componența fasciculului de sârme, numărul și diametrele acestora.
- Aliajele multi-element obținute vor avea în compoziția chimică și alte elemente de microaliere, conținute de vergelele selectate - Nb, Mn, Mo, Ta, W s.a. - elemente care și-au dovedit efectele pozitive asupra proprietăților aliajelor convenționale.
- Noul procedeu de obținere a depunerilor de aliaje multi-element, care constă în aplicarea unei proceduri de sudare uzuale și utilizarea unor materiale de adaos standardizate și existente, deja, pe piață, oferă o soluție economică avantajoasă pentru a fi luată în calcul posibilitatea transferului tehnologic din laboratoarele de cercetare în mediul industrial.

CAPITOL 4

Cercetări experimentale privind proprietățile aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} depus prin sudare WIG

4.1. Desfășurarea programului experimental

4.1.1. Selectarea vergelelor pentru realizarea materialului de adaos

În programul experimental al studiilor doctorale, au fost executate depuneri de aliaj multi-element, clasa AlCrFeNi, pe un material substrat din oțel S235, prin topirea unui fascicul format din trei baghete, fiecare baghetă având compoziție chimică diferită (Fig. 4.1). Prin topirea simultană a celor trei baghete într-o baie comună de metal topit, formată în timpul procesului de sudare WIG, se obține aliajul multi-element cu compoziția chimică dorită. În cazul de față, fasciculul de vergele de sudare, fiecare vergea având diametrul de 2,4mm, a fost realizat dintr-o baghetă de aluminiu ALTIG AL99.7, o baghetă de oțel inoxidabil INTERROD 22 9 3 și o baghetă din aliaj Ni-Cr NIROD 625.

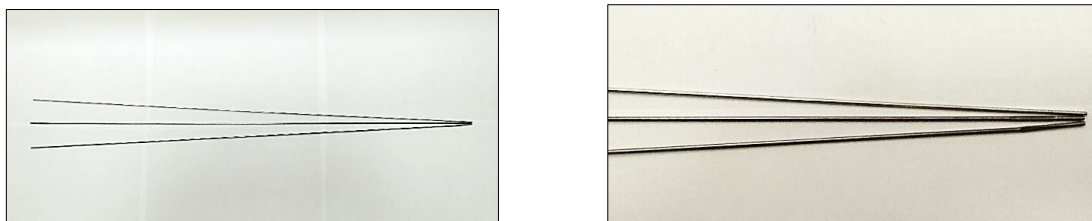


Fig. 4.1. Formarea fasciculului de baghete de sudare

Înainte de a fi topite și depuse pe substrat, baghetele, care au același diametru (2,4mm), au fost cântărite, rezultatele arătând o masă medie de 12,2g pentru bagheta de aluminiu ALTIG AL99.7, 36,17g pentru bagheta din aliaj Ni-Cr NIROD 625 și 35,26g pentru bagheta din oțel inoxidabil INTERROD 22 9 3. Pe baza măsurătorilor și certificatelor de compoziție chimică, furnizate de producătorii vergelelor, a fost determinată, prin calcul analitic, compoziția aliajului AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} microaliat cu Nb, Mn, Si, Ti, Cu, C, și Co, conform informațiilor din tabelul 4.1.

Tabel 4.1. Compoziția chimică a aliajului AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} determinată prin calcul analitic

| Elem. chim. | C | Mn | Si | S | P | Cr | Fe | Ni | Mo | Nb | Al | N | Co | Cu | Ti |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| m [g] | 0,01 | 0,54 | 0,21 | 0,00 | 0,01 | 16,14 | 22,33 | 26,36 | 4,31 | 1,33 | 12,24 | 0,06 | 0,004 | 0,04 | 0,07 |
| wt [%] | 0,008 | 0,641 | 0,254 | 0,001 | 0,009 | 19,3 | 26,7 | 31,51 | 5,155 | 1,592 | 14,631 | 0,067 | 0,004 | 0,046 | 0,082 |
| at [%] | 0,03 | 0,58 | 0,45 | 0,001 | 0,004 | 18,37 | 23,37 | 26,18 | 2,66 | 0,85 | 26,84 | 0,24 | 0,004 | 0,04 | 0,08 |

4.1.2. Studii preliminare pentru determinarea parametrilor optimi de proces

4.1.2.1. Determinarea experimentală a parametrilor primari de sudare

După stabilirea parametrilor primari de sudare: $I_s=220A$, $U_a=15V$ $v_s=10,8cm/min$ au fost executate depuneri succesive, de cordoane de sudură pe plăcile din oțel cu dimensiunile $40 \times 100 \times 12mm$. În final, au fost studiate proprietățile a patru probe distincte (Fig.4.3): o probă (a) pe care a fost depus inițial aliajul din clasa AlCrFeNi (Fig. 4.3a) și trei probe (a), (b), (c) la care materialul depus inițial a fost retopit, prin metoda WIG, fără utilizarea unui material de adaos. Această abordare tehnologică a avut scopul de a maximiza omogenitatea chimică și de a îmbunătăți proprietățile mecanice ale aliajului multi-element depus. Operațiile de retopire au fost executate longitudinal (Fig. 4.3b), transversal (Fig. 4.3c) și combinat (longitudinal și transversal, Fig. 4.3d), în raport cu direcția de depunere inițială.

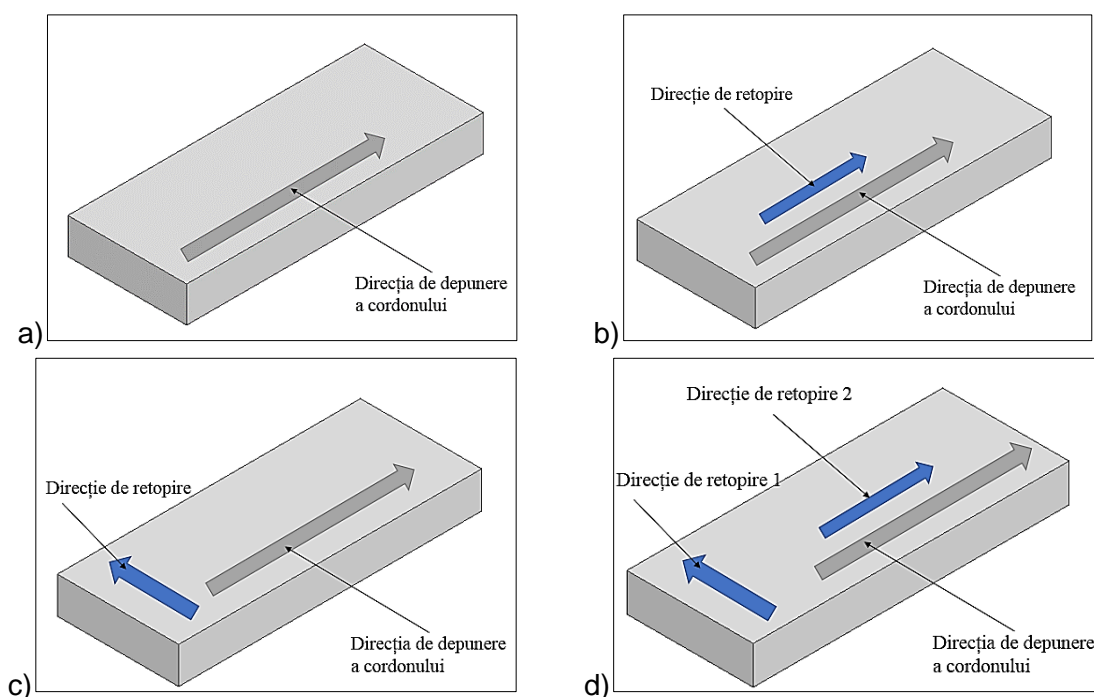


Fig. 4.3. Direcțiile de depunere (a) și retopire (b, c, d) a cordoanelor din aliajul multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi

4.1.3. Parametrii de sudare pentru obținerea aliajului multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}

În urma testelor experimentale și a controlului nedistructiv, la care au fost supuse probele după depunerea cordoanelor, s-a constatat că regimul de sudare și temperatura între depunerile succesive sunt factori cruciali în obținerea unor depuneri de calitate. Parametrii care satisfac aceste criterii au următoarele valori:

- curentul de sudare $I_s=220A$, regim care asigură un control eficient al băii de metal topit și o geometrie satisfăcătoare a cordonului depus.
- temperatura între depuneri care asigură obținerea unor depuneri fără fisuri este $T=300^{\circ}C$.

În urma testelor repetate și ținând seama de influența regimului de sudare și de temperatura dintre depunerile succesive au fost realizate probele finale, pe plăci din oțel S235,

cu dimensiunile de 12x40x100mm (Fig. 4.8). Gradul de acoperire de 100% a fost realizat după executarea a cinci depuneri succesive, suprapuse pe aproximativ 50% din lățimea depunerii.

Parametrii primari ai proceselor de depunere și de retopire pe direcție longitudinală, transversală și combinată, în raport cu direcția de depunere inițială, sunt prezentați în tabelele 4.4-4.7, în care semnificația parametrilor este cea prezentată mai sus, iar D_g este debitul de gaz, t_g – timpul pregaz/postgaz.

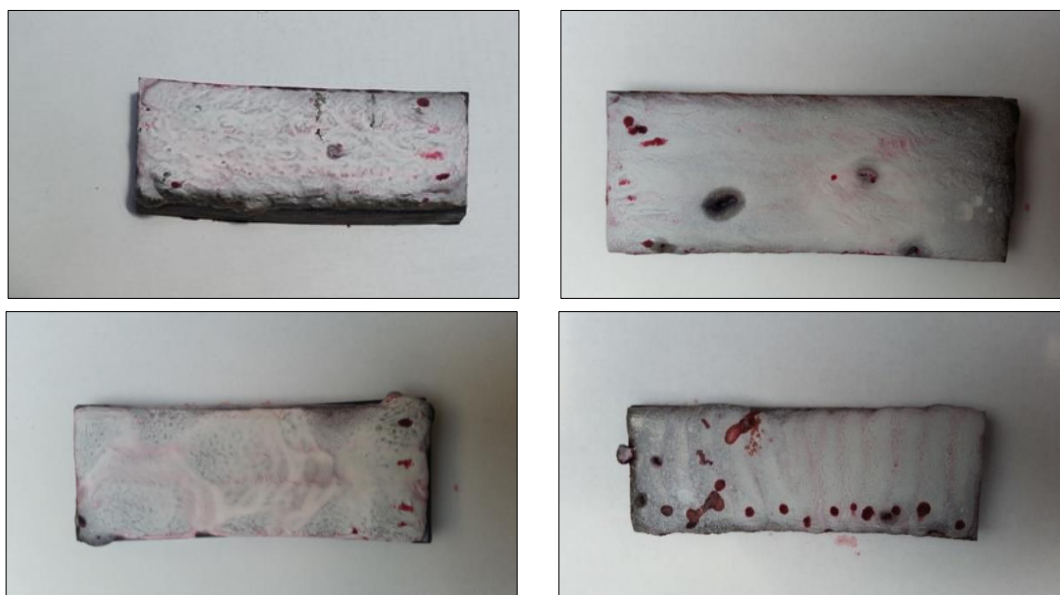


Fig. 4.8. Controlul nedistructiv al probelor admise pentru investigarea proprietăților straturilor de aliaj multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}

Tabel 4.4. Parametrii optimi ai procesului de depunere prin sudare

| Proces | I_s [A] | U_a [V] | v_s [cm/min] | D_g [l/min] | t_g [s] | E_l [J/cm] |
|----------|--------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-----------------|
| Depunere | 220 | 18 | 17 | 18 | 1/6 | 8385 |

Tabel 4.5. Parametrii optimi ai proceselor de depunere prin sudare și retopire longitudinală

| Proces | I_s [A] | U_a [V] | v_s [cm/min] | D_g [l/min] | t_g [s] | E_l [J/cm] |
|------------------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-----------------|
| Depunere | 220 | 18 | 13 | 18 | 1/6 | 10966 |
| Retopire longitudinală | 220 | 15 | 20 | 18 | 1/6 | 5940 |

Tabel 4.6. Parametrii optimi ai proceselor de depunere prin sudare și retopire transversală

| Proces | I_s [A] | U_a [V] | v_s [cm/min] | D_g [l/min] | t_g [s] | E_l [J/cm] |
|-----------------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-----------------|
| Depunere | 220 | 18 | 18 | 18 | 1/6 | 7920 |
| Retopire transversală | 220 | 16 | 40 | 18 | 1/6 | 3168 |

Tabel 4.7. Parametrii optimi ai proceselor de depunere prin sudare și retopire combinată

| Proces | I_s [A] | U_a [V] | v_s [cm/min] | D_g [l/min] | t_g [s] | E_l [J/cm] |
|------------------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-----------------|
| Depunere | 220 | 18 | 15 | 18 | 1/6 | 9504 |
| Retopire transversală | 220 | 15 | 35 | 18 | 1/6 | 3394 |
| Retopire longitudinală | 220 | 18 | 30 | 18 | 1/6 | 4752 |

4.2. Analiza proprietăților straturilor depuse de aliaj multi-element

4.2.2. Codificarea variantelor tehnologice aplicate

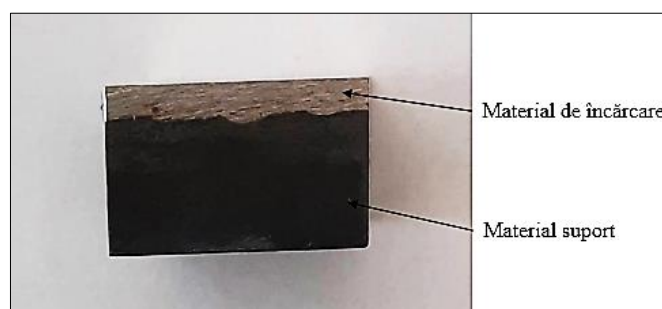
Pentru identificarea facilă a probelor, în vederea caracterizării chimice, metalurgice și mecanice, au fost stabilite coduri de identificare, care să fie sugestive pentru varianta tehnologică aplicată, după cum urmează:

- 1D - probe cu straturi depuse de aliaj AlCr0,7FeNiMo0,1 fără retopire;
- 1L - probe cu straturi depuse de aliaj AlCr0,7FeNiMo0,1 și topire longitudinală;
- 1T - probe cu straturi depuse de aliaj AlCr0,7FeNiMo0,1 și topire transversală;
- 1C - probe cu straturi depuse de aliaj AlCr0,7FeNiMo0,1 și topire combinată.

4.2.3. Analiza structurii și compoziției chimice a aliajului multi-element

În urma atacului chimic, cu reactivul Nital 4% (4ml acid azotic în 96ml alcool etilic), a fost evidențiat substratul metalic din oțel S235, pe care au fost depuse straturi succesive de material, rezultat prin topirea fasciculului de baghete cu compoziții chimice diferite. Prin topirea simultană a baghetelor, în baie de metal topit comună, prin metoda de sudare WIG, în mediu de gaz protector de Ar, s-a obținut un aliaj multi-element cu entropie medie.

În figura 4.10 este prezentată imaginea macrostructurii unei epruvete, prelevată dintr-o probă pe care a fost depus aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1. Grosimea stratului depus după prelucrarea mecanică a epruvetei a rămas de aproximativ 2,5mm. Se observă cu ușurință că materialul depus prin sudare a aderat foarte bine la materialul substrat din oțel S235. În urma controlului vizual, s-a constatat că îmbinarea dintre cele două materiale este corespunzătoare și nu au fost identificate fisuri, pori, goluri, nepătrunderi sau alte defecte, generate de procesul de depunere prin sudare.

**Fig. 4.10.** Secțiune transversală în epruveta prelevată din zona de încărcare prin sudare

4.2.3.1. Analiza microscopică și chimică a aliajului multi-element obținut prin depunere și retopire longitudinală (proba 1L)

Analiza microscopică a materialului substrat din oțel S235 a dezvăluit că materialul de bază are o structură formată din grăunți alungiți de ferită și o rețea de perlită (Fig. 4.11a). În zona de influență termică (ZIT), localizată în materialul de bază, se remarcă o modificare a geometriei grăunților de ferită, care din grăunți alungiți se transformă în formațiuni cu limite de grăunți neregulate. Printre formațiunile de ferită, se observă o dispersare relativ uniformă a formațiunilor de perlită (Fig. 4.11b). În regiunea de tranziție, linia de fuziune sau linia de separare dintre cele două materiale este continuă și lipsită de imperfecțiuni. Se remarcă o ușoară tendință de creștere a granulației în proximitatea liniei de fuziune, vizibilă în figura 4.11c. În figura 4.11d, este prezentată o imagine detaliată din zona liniei de fuziune, localizată la intersecția dintre două straturi depuse.

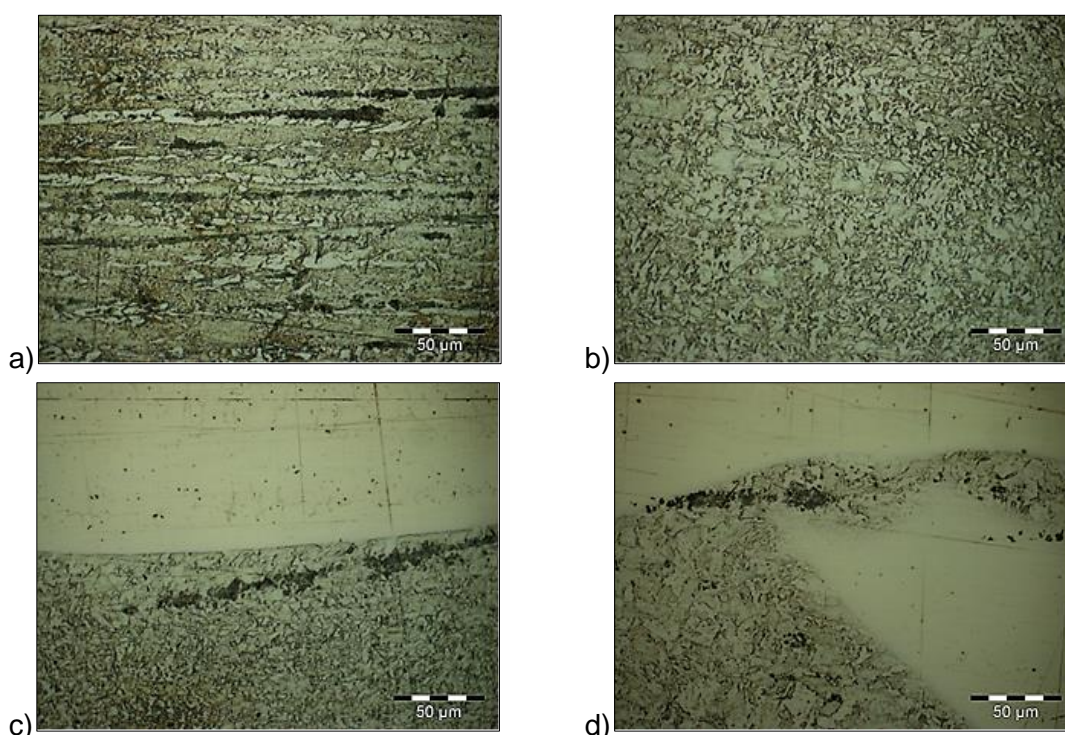


Fig. 4.11. Microstructura probei 1L (depunere și retopire longitudinală):

- a) material de bază; b) zona de influență termică; c) linia de fuziune dintre stratul depus și materialul de bază; d) linia de fuziune dintre două depuneri succesive

Determinarea compoziției chimice a stratului depus a fost efectuată prin metoda de microscopie electronică de baleiaj (SEM), fiind analizată o micro-zonă, cu cinci grăunți, din proba 1L, pe care a fost depus aliajul multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} și, ulterior, retopit pe direcție longitudinală (Fig. 4.12). În imagine se disting grăunți alungiți pe direcția fluxului termic care conțin precipitări de compuși inter-metalici.

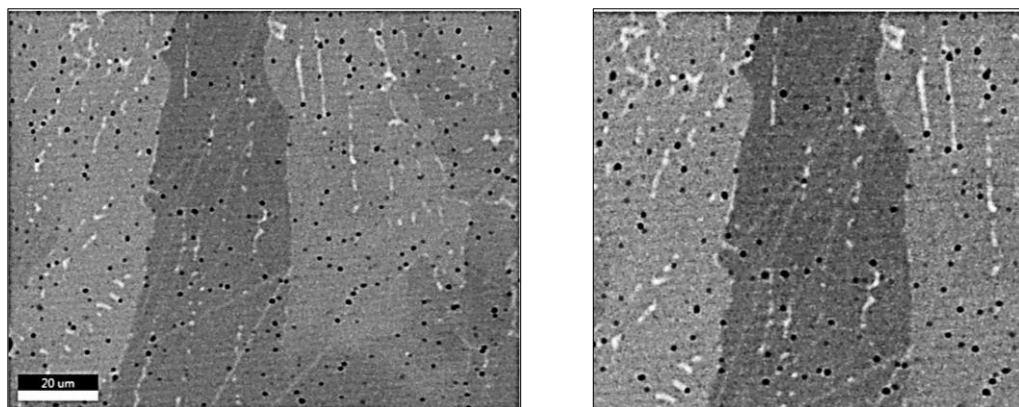


Fig. 4.12. Zona supusă analizei SEM pentru determinarea compoziției chimice (proba 1L)

În stratul depus și retopit pe direcție longitudinală a fost determinată, prin analiză spectrală, compoziția chimică a aliajului multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1, constatându-se prezența următoarelor elemente chimice (Fig. 4.13),: Fe 59,09wt% (55,46at%), Ni 17,94wt% (16,02at%) Cr 13,15wt% (13,26at%), Al 7,07wt% (13,74at%), Mo 1,85wt% (1,01at%), Nb 0,9wt% (0,51at%). Celelalte elemente chimice de microaliere, prezente în vergelele folosite la depunerea prin sudare WIG - C, Mn, Si, Co, Cu și Ti - au concentrații prea mici pentru a fi detectate prin metoda spectroscopiei de raze X cu dispersie de energie (EDS).

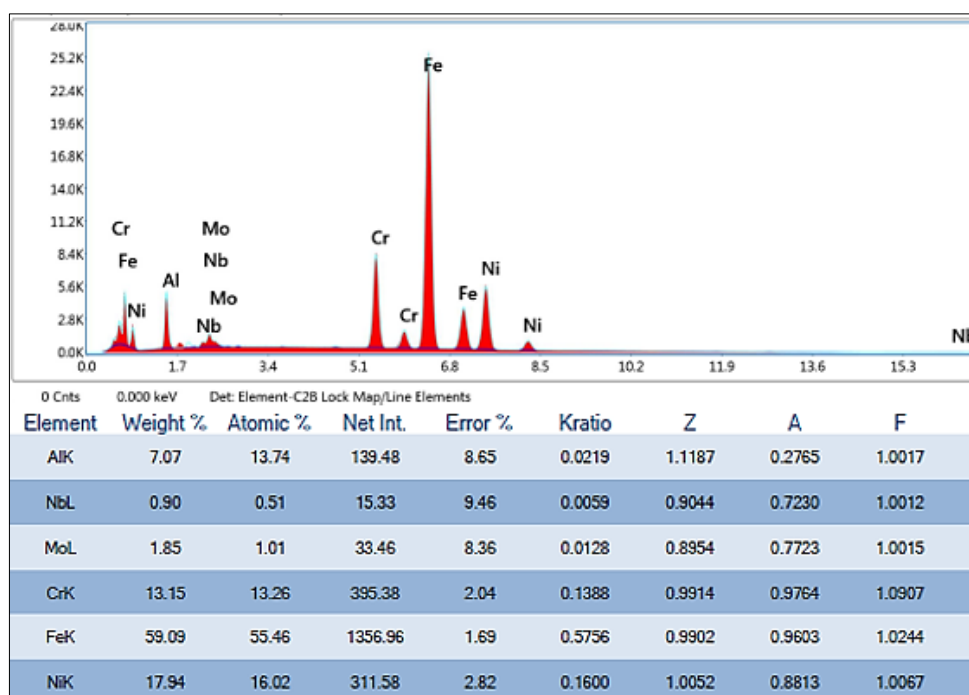


Fig. 4.13. Rezultatele analizei spectrale în aliajul multi-element obținut prin depunere și retopire longitudinală (proba 1L)

În aceeași micro-zonă, a fost realizată și harta distribuției elementelor chimice, constatându-se o omogenitate chimică corespunzătoare și s-a constatat faptul că elementele de aliere Fe, Ni, Cr, Al, Mo, Nb sunt uniform distribuite, gradul de omogenitate în aliajul multi-element fiind corespunzător. (Fig. 4.14).

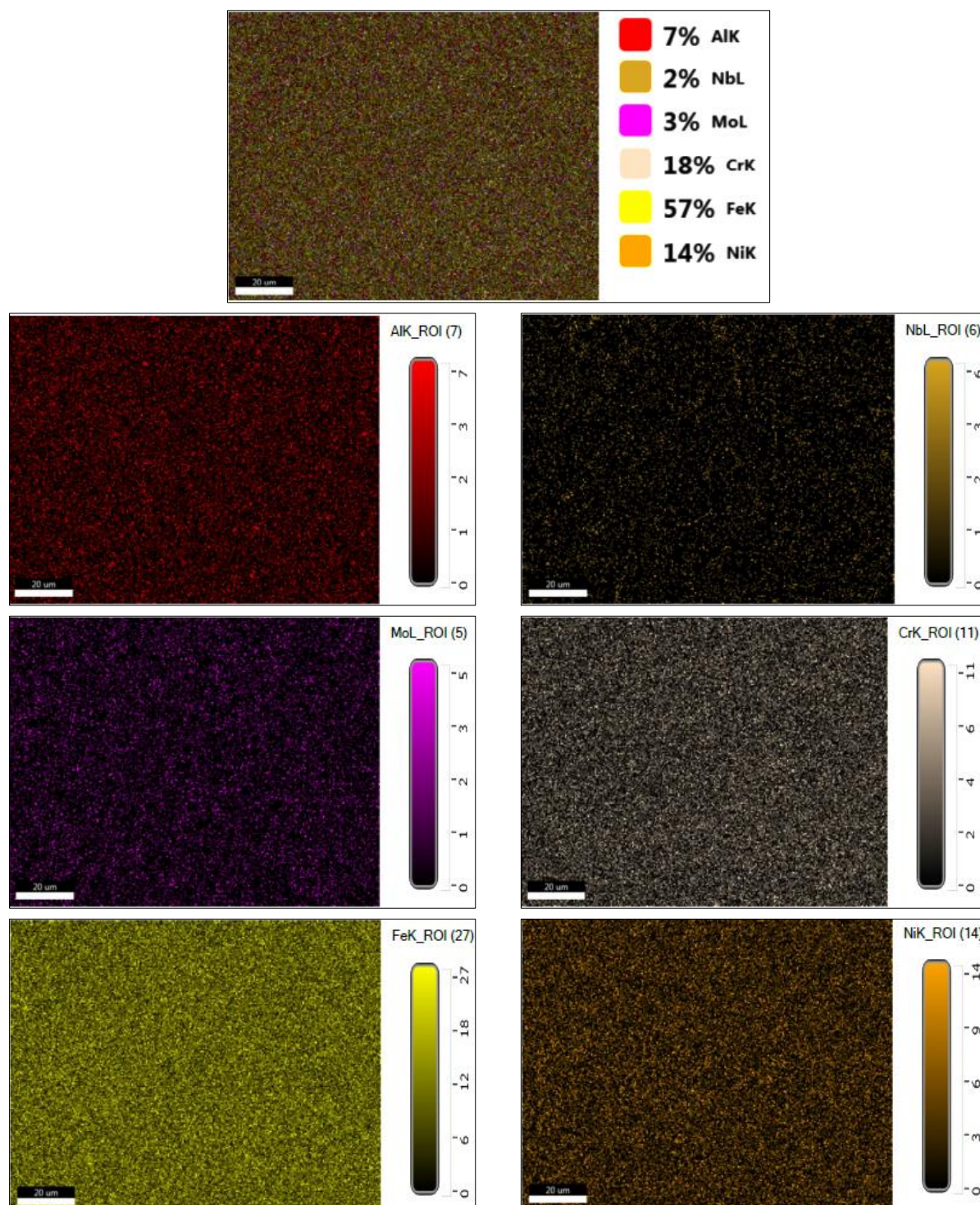


Fig. 4.14. Distribuția elementală în aliajul multi-element obținut prin depunere și retopire longitudinală (proba 1L)

În stratul depus au fost identificați compuși filiformi de mici dimensiuni, de culoare albă (Fig. 4.15), formarea lor, atribuită procesului de difuziune lentă, fiind un fenomen întâlnit frecvent în aliajele multi-element. Compușii detectați în aliajul multi-element au grosimi sub 1 μm și lungimi de aproximativ 5 μm, o morfologie aciculară și un conținut ridicat de niobiu de aproximativ 7-12%.

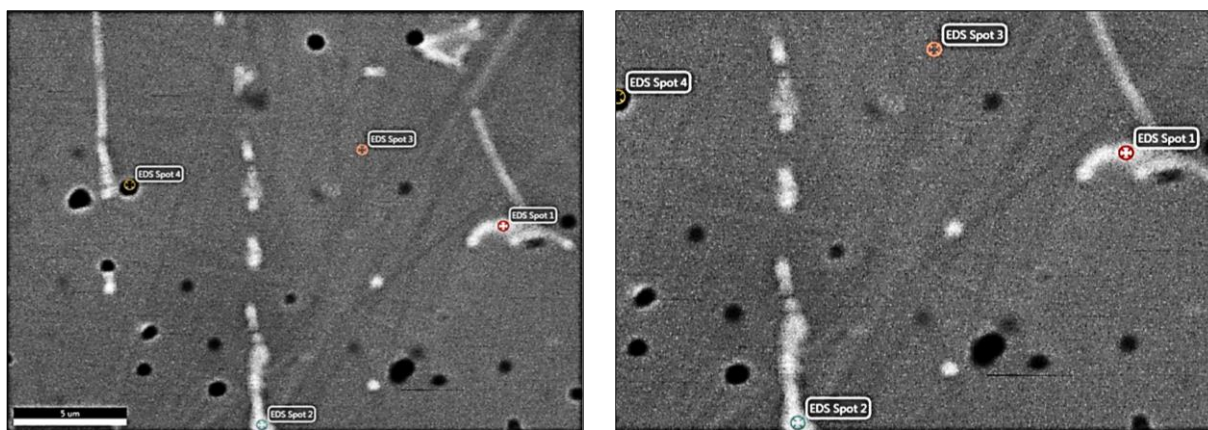


Fig. 4.15. Compuși filiformi inter-metalici cu conținut ridicat de Nb precipitați în matricea de bază în aliajul multi-element obținut prin depunere și retopire longitudinală (proba 1L)

4.2.3.2. Analiza microscopică și chimică a aliajului multi-element obținut prin depunere și retopire transversală (proba 1T)

În figura 4.32 este reprezentată microstructura unei zone din stratul depus prin sudare și retopire pe direcție transversală (1T), cu evidențierea poziționării punctelor (Spot 1, Spot2, Spot 3) de determinare a compoziției chimice. Principalele elemente chimice identificate prin analiza SEM sunt Fe (59,93 – 61,18wt%; 55,54-56,95at%); Ni (17,39 – 18,20wt%; 15,4-16,04at%); Cr (12,49 – 12,56wt%; 12,49-12,52at%); Al (6,45 – 6,91wt%; 12,42-13,26at%). Pe lângă aceste elemente, au mai fost identificate următoarele elemente chimice: Mn (0,84-0,91wt%; 0,79-0,76at%), Si (0,74-0,77wt%; 0,81-0,86at%) și Nb (0,78-0,82wt%; 0,44-0,46at%), rezultatele fiind asemănătoare cu cele obținute în urma analizelor chimice ale celorlalte probe.

În figura 4.36 este prezentată micro-zona din aliajul multi-element în care au fost realizate hărțile de distribuție pentru principalele elemente de aliere. Analizând microstructura aliajului multi-element, obținut prin depunere și topire transversală, se constată acumularea de compuși (culoare albă) la limitele grăunților. Analizând hărțile de distribuție a elementelor chimice, se constată o repartiție uniformă a elementelor de aliere Ni, Cr, Co, Fe și Mn, în timp ce Al prezintă atât o distribuție uniformă, cât și acumulări, cu formare de compuși de nitru de aluminiu AlN, reprezentate prin punctele roșii.

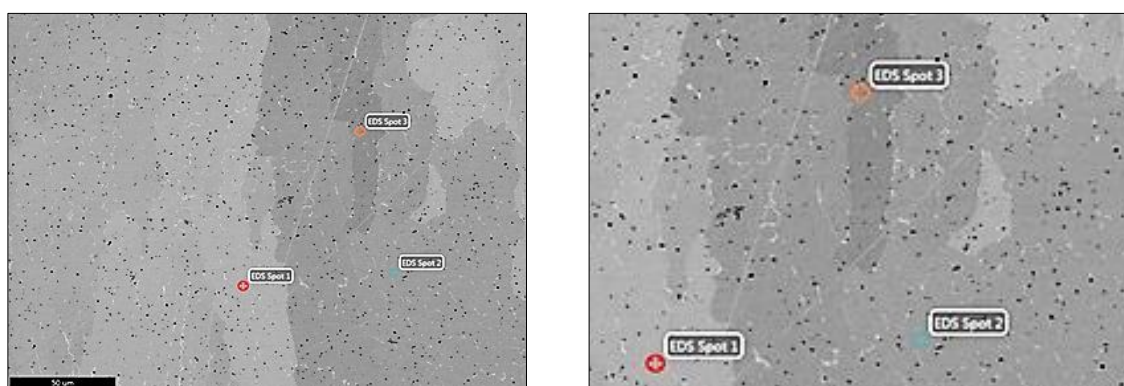


Fig. 4.32. Microstructura aliajului multi-element obținut prin depunere și retopire transversală (proba 1T)

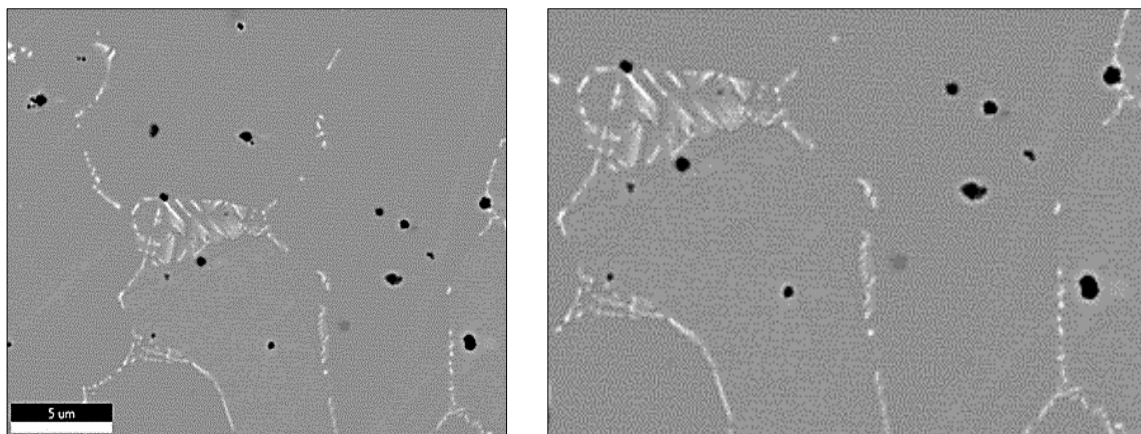


Fig. 4.36. Micro-zonă localizată în aliajul multi-element obținut prin depunere și retopire transversală (proba1T)

Elementele chimice Nb și Mo contribuie predominant la formarea compușilor identificați la limitele grăunților. Apariția compușilor Nb și Mo de-a lungul limitelor de grăunți, în aliajul multi-element, prezintă anumite avantaje, având în vedere că sunt elemente chimice care favorizează îmbunătățirea rezistenței, durității și rezistenței la coroziune a materialelor metalice tradiționale.

În figura 4.45 este prezentată microstructura unei porțiuni din zona de influență termică a probei 1T și localizarea punctelor de determinare a compoziției chimice. Se observă că linia de fuziune (LF) delimitează stratul de aliaj multi-element (partea superioară) de substratul din oțel nealiat (partea inferioară).

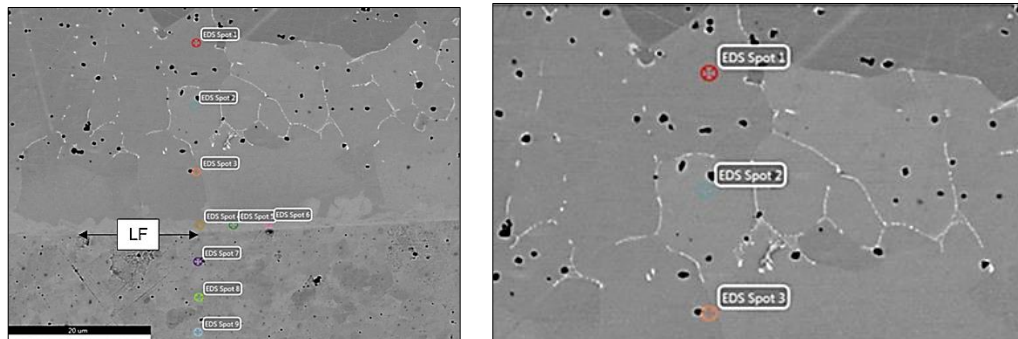


Fig. 4.45. Microstructura unei porțiuni din zona de influență termică a probei 1T

4.2.3.3. Analiza microscopică și chimică a aliajului multi-element obținut prin depunere și retopire combinată (proba 1C)

Microstructura aliajului multi-element, obținut prin depunere și retopire combinată (proba 1C), și localizarea zonei de analiză chimică sunt prezentate în figura 4.57. În imagine, se observă compușii bogați în Al care s-au format în corpul grăunților și compușii intermetalici bogați în Nb și Mo care sunt dispuși în șiruri ce mărginesc liniile de grăunte. Din analiza chimică a zonei notată Full Area 1 (Fig. 4.58), se constată că matricea de bază a aliajului multi-element conține ca element majoritar Fe (procent de masă 58,97wt%), în care sunt dizolvate și elementele chimice tipice, precum Si, Mn și Nb.

Principalele elemente de aliere ale aliajului multi-element, obținut prin depunere prin sudare și retopire combinată, sunt Ni (17,34wt%), Cr (11,04wt%) și Al (8,35wt%). În aliajele

tradiționale, elementul chimic Nb este adăugat pentru stabilizarea microstructurii și scăderea sensibilității față de coroziunea intercristalină. Deși în hărțile de distribuție elementală a fost identificat și Mo, acest element nu a putut fi cuantificat de către senzorul EDAX, deoarece spectrul lui este foarte apropiat și se suprapune cu cel al elementului chimic Nb.

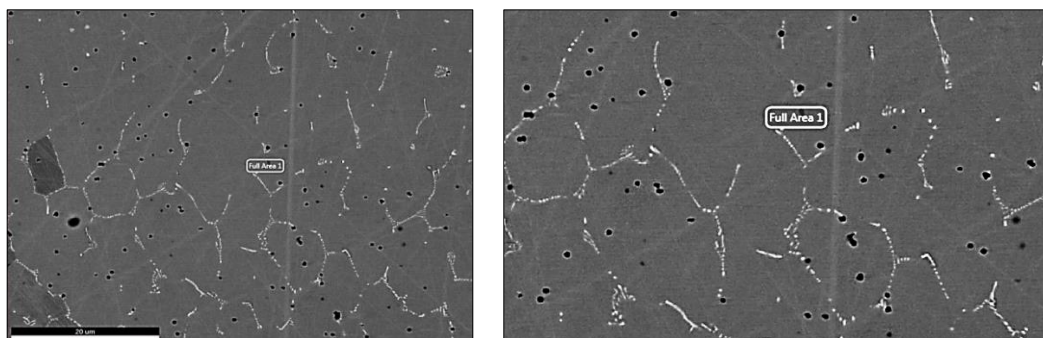


Fig. 4.57. Microstructura aliajului multi-element, obținut prin depunere și retopire combinată (proba 1C)

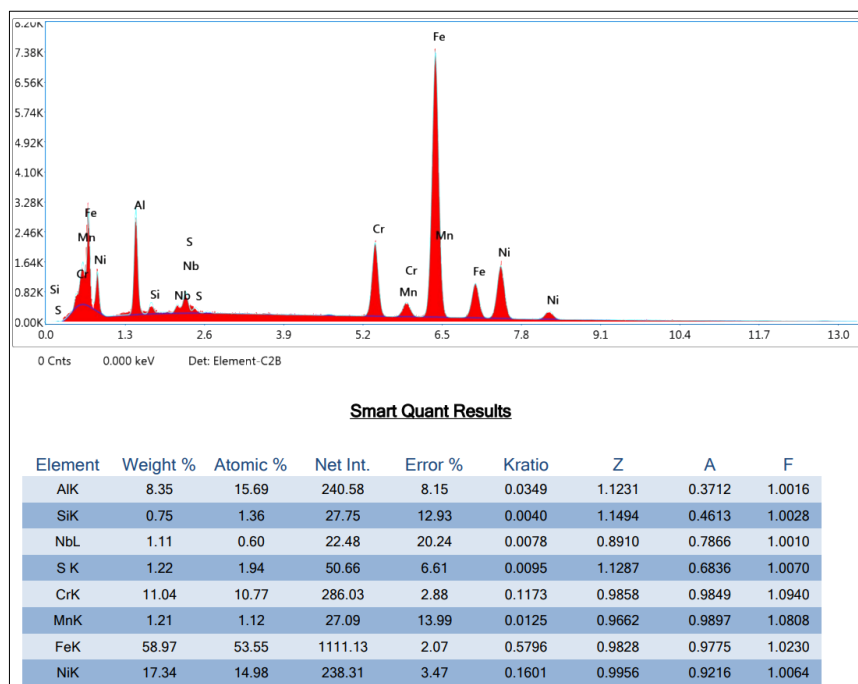


Fig. 4.58. Rezultatele analizei spectrale în aliajul multi-element obținut prin depunere și retopire combinată (proba 1C)

4.3.3.4. Analiza microscopică și chimică a aliajului multi-element obținut prin depunere, fără retopire (proba 1D)

În figura 4.72 este reprezentată o imagine din zona centrală a probei 1D, localizată în stratul depus prin sudare WIG, cu indicarea zonei de investigație a elementelor chimice. Din analiza chimică a zonei, notată Full Area 1 (Fig. 4.73), se constată că în aliajul multi-element, valorile concentrațiilor elementelor de aliere se încadrează în intervalul observat și în cazul analizelor efectuate pe epruvetele debitate din probele 1T, 1L și 1C. Se constată o ușoară scădere a concentrației de Fe de la 59wt% (pentru probele cu retopire) la 54wt% (la proba fără

retopire), fenomen care poate fi explicat prin ușoara creștere a coeficientului de participare al metalului de bază la formarea stratului depus și retopit.

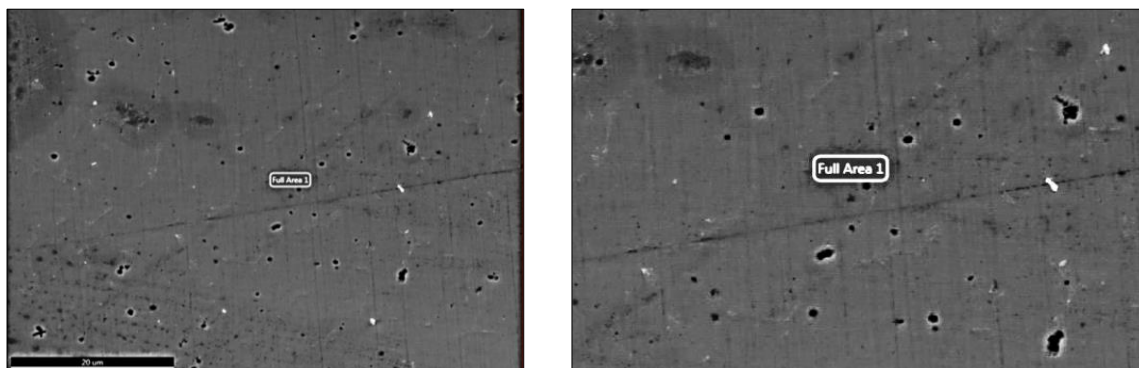


Fig. 4.72. Microstructură din zona centrală a stratului depus prin sudare WIG, fără retopire (proba 1D)

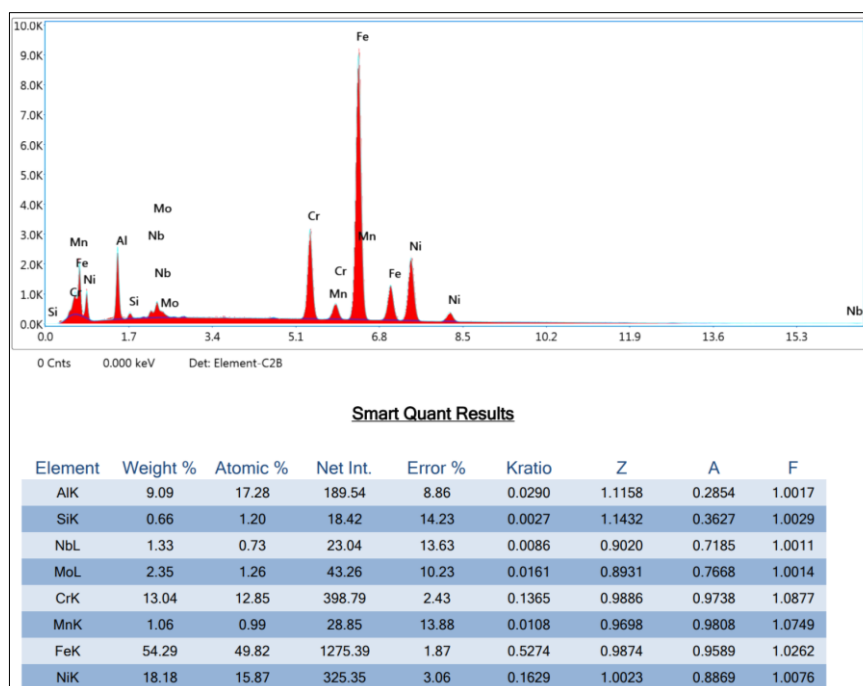


Fig. 4.73. Rezultatele analizei spectrale în stratului depus prin sudare WIG, fără retopire (proba 1D)

4.3.3.5. Diluția aliajului multi-element cu materialul substrat din oțel S235

Rezultatele analizelor chimice a aliajelor multi-element, depuse prin cele patru variante tehnologice, pe probele 1L, 1T, 1C și 1D, arată o creștere a concentrației de Fe de la 26wt% (procentul de Fe estimat pentru aliajul obținut din fasciculul de baghete) la 59wt% și o scădere a concentrației elementelor: Ni de la 31wt% la 18wt%, Cr de la 19wt% la 12wt%, Al de la 14wt% la 7wt%, Mo de la 5wt% la 2wt% și Nb de la 1,6wt% la 1wt% (Tabel 4.9). Aceste modificări ale concentrațiilor sunt determinate de participarea materialului substrat (oțel S235) la formarea băii de metal topit, coeficientul de participare fiind de aproximativ 45%.

Coeficientul de participare de 45% al substratului de oțel S235 la stabilirea compoziției finale a stratului depus cu aliajul AlCr0,7FeNiMo0,1 este în concordanță cu rezultatele obținute de alți cercetători care au investigat placarea unor materiale prin procedeul de sudare [85,91,92]. Se poate concluziona că, în situația utilizării la depunerea prin sudare WIG a unei baghete, elaborată anterior, din aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1 rezultatul final ar fi fost similar cu cel obținut prin topirea și depunerea fasciculului de baghete, cu compoziții chimice diferite. În concluzie, procedeul original de obținere a aliajelor multi-element din clasa AlCrFeNi, dezvoltat prin cercetările derulate în cadrul programului de studii de doctorat, oferă avantajul realizării plăcilor prin procedeul de sudare WIG, fără necesitatea elaborării prealabile, prin alte procedee, a unei baghete din acest aliaj.

Tabel 4.9. Diluția aliajului AlCr0,7FeNiMo0,1 cu materialul substrat de oțel S235

| Material | C wt[%] | Mn wt[%] | Si wt[%] | Cr wt[%] | Fe wt[%] | Ni wt[%] | Mo wt[%] | Nb wt[%] | Al wt[%] | Co wt[%] | Cu wt[%] | Ti wt[%] |
|------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Oțel S235 | 0,12 | 0,75 | 0,17 | 0,04 | 98,22 | 0,03 | 0,02 | - | 0,038 | - | 0,06 | 0,001 |
| AlCr0,7FeNiMo0,1 | 0,008 | 0,641 | 0,254 | 19,3 | 26,7 | 31,51 | 5,155 | 1,592 | 14,631 | 0,004 | 0,046 | 0,082 |
| Depunere 1L | - | - | - | 13,15 | 59,09 | 17,94 | 1,85 | 0,9 | 7,07 | - | - | - |
| Depunere 1T | - | - | - | 12,53 | 60,56 | 17,8 | - | 0,8 | 6,68 | - | - | - |
| Depunere 1C | - | - | - | 11,04 | 58,97 | 17,34 | - | 1,1 | 8,35 | - | - | - |
| Depunere 1D | - | - | - | 13,04 | 54,29 | 18,18 | 2,35 | 1,33 | 9,09 | - | - | - |

4.2.4. Determinarea profilului de variație al durității în aliajul multi-element

Se observă o creștere a durității de aproximativ 3,5 ori de la valoarea medie de 165HV_{0,5} a materialului de bază la o valoarea medie de 570HV_{0,5} în depuneri. Duritatea medie cea mai scăzută a fost înregistrată la depunerea fără retopire (558HV_{0,5}), în timp ce valoarea cea mai ridicată a fost măsurată la depunerea cu retopire combinată, fiind cu aproximativ 5% mai mare față de cea fără retopire. Durități în intervalul 500-600HV au fost raportate și de alți cercetători ce au investigat aliajele din clasa de aliere AlCrFeNi [93,94].

Tabel 4.13. Rezultatele experimentale ale testului de duritate în materialul substrat și în straturile de aliaj multi-element

| Material | Microduritate HV _{0,5} | Duritate medie | Deviația standard | Coeficient de variație |
|-------------|---------------------------------|----------------|-------------------|------------------------|
| Oțel S235 | 158; 166; 163; 170; 168 | 164,82 | 4,83 | 2,93 |
| Depunere 1D | 540; 542; 573; 564; 574 | 558,42 | 16,62 | 2,98 |
| Depunere 1T | 571; 560; 571; 553; 577 | 566,77 | 9,69 | 1,71 |
| Depunere 1L | 581; 573; 567; 565; 588 | 574,77 | 9,78 | 1,7 |
| Depunere 1C | 570; 599; 564; 598; 563 | 578,88 | 18,29 | 3,16 |

4.2.5. Determinarea rezistenței la uzură a aliajului multi-element

Rezultatele testelor de uzură sunt prezentate în tabelele 4.15-4.18:

- la depunerea fără retopire, s-a înregistrat o valoare medie a coeficientului de uzare $k=6,95 \cdot 10^{-7}$ [mm³/Nm] (Tabel 4.15);
- la depunerea cu retopire longitudinală (Tabel 4.16) rezistența la uzură a înregistrat o creștere, valoarea medie a coeficientului de uzare fiind de $5,17 \cdot 10^{-7}$ [mm³/Nm];
- la depunerea cu retopire transversală (Tabel 4.17), rezistența la uzură a înregistrat o creștere, valoarea medie a coeficientului de uzare fiind de $4,18 \cdot 10^{-7}$ [mm³/Nm];
- aliajul multi-element, obținut prin depunere și retopire combinată (Tabel 4.18), are rezistența la uzură cea mai ridicată, aceasta fiind de aproximativ 2,7 ori mai mare decât a aliajului multi-element, obținut prin depunere și fără retopire, valoarea medie a coeficientului de uzare fiind de $2,59 \cdot 10^{-7}$ [mm³/Nm].

Rezultatele testelor de rezistență la uzură au evidențiat performanțe superioare în cazul aliajelor multi-element care au fost și retopite. Acest proces tehnologic poate fi asociat cu un tratament termic de îmbunătățire a calității suprafeței, influențând pozitiv proprietăți, precum finisarea granulației, eliminarea porilor și a altor defecte, îmbunătățirea omogenității chimice sau reducerea tensiunilor interne în aliajul multi-element depus [95–98].

Tabel 4.15. Rezultatele testelor de uzură în straturile depuse de aliaj multi-element (proba 1D)

| Nr. crt. | Lungimea de frecare [mm] | Forța de încărcare, F _N [N] | Coeficient de uzare, k [mm ³ /Nm] | Volum de material uzat V [mm ³] | Intensitatea de uzare | Adâncimea stratului uzat [mm] |
|--------------|--------------------------|--|--|---|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 214956,28 | 0,19 | 2,5412E-07 | 0,010378672 | 7,50316E-08 | 0,016128504 |
| 2 | 214956,28 | 0,202 | 1,13583E-06 | 0,018544912 | 1,00296E-07 | 0,021559346 |
| Medie | 214956,3 | 0,196 | 6,95E-07 | 0,014462 | 8,77E-08 | 0,018844 |

Tabel 4.16. Rezultatele testelor de uzură în straturile de aliaj multi-element (proba 1L)

| Nr. crt. | Lungimea de frecare [mm] | Forța de încărcare F _N [N] | Coeficient de uzare k [mm ³ /Nm] | Volum de material uzat V [mm ³] | Intensitatea de uzare | Adâncimea stratului uzat [mm] |
|--------------|--------------------------|---------------------------------------|---|---|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 214956,28 | 0,183 | 6,60189E-07 | 0,025969864 | 1,18688E-07 | 0,025512795 |
| 2 | 214956,28 | 0,207 | 3,73504E-07 | 0,016619431 | 9,4947E-08 | 0,020409449 |
| Medie | 214956,3 | 0,195 | 5,17E-07 | 0,021295 | 1,07E-07 | 0,022961 |

Tabel 4.17. Rezultatele testelor de uzură în straturile de aliaj multi-element (proba 1T)

| Nr. Crt. | Lungimea de frecare [mm] | Forța de încărcare F _N [N] | Coeficient de uzare k [mm ³ /Nm] | Volum de material uzat V [mm ³] | Intensitatea de uzare | Adâncimea stratului uzat [mm] |
|--------------|--------------------------|---------------------------------------|---|---|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 214956,28 | 0,22 | 5,49157E-07 | 0,025969864 | 1,18688E-07 | 0,025512795 |
| 2 | 214956,28 | 0,278 | 2,85919E-07 | 0,017085913 | 9,62703E-08 | 0,020693898 |
| Medie | 214956,3 | 0,249 | 4,18E-07 | 0,021528 | 1,07E-07 | 0,023103 |

Tabel 4.18. Rezultatele testelor de uzură în straturile de aliaj multi-element (proba 1C)

| Nr. crt. | Lungimea de frecare [mm] | Forța de încărcare F_N [N] | Coeficient de uzare k [mm^3/Nm] | Volum de material uzat V [mm^3] | Intensitatea de uzare | Adâncimea stratului uzat [mm] |
|--------------|--------------------------|------------------------------|---|--|-----------------------|-------------------------------|
| 1 | 214956,28 | 0,193 | 1,51905E-07 | 0,006302023 | 5,84673E-08 | 0,012567913 |
| 2 | 214956,28 | 0,165 | 3,66275E-07 | 0,012990948 | 8,39447E-08 | 0,018044449 |
| Medie | 214956,3 | 0,179 | 2,59E-07 | 0,009646 | 7,12E-08 | 0,015306 |

Analiza comparativă a rezultatelor privind rezistența la uzură a straturilor depuse prin placare cu diverse aliaje tradiționale, raportate de cercetători din lumea întreagă [99–105], cu rezultatele obținute în cadrul programului de studii doctorale, arată faptul că acestea sunt comparabile sau superioare unor alternative existente. În plus, tehnologia de depunere a aliajului $\text{AlCr}_0,7\text{FeNiMo}_0,1$ propusă prin această teză de doctorat, care constă în topirea fasciculului de baghete, format din trei vergele de aluminiu, oțel inoxidabil și aliaj nichel-crom, prezintă avantaje semnificative legate de costul redus al echipamentelor (echipament de sudare WIG) și de compoziția chimică a materialului care nu conține metale rare și prezintă o proporție redusă de superaliaj Ni-Cr. Rezultatele promițătoare obținute pentru rezistența la uzură a depunerilor realizate cu materialul $\text{AlCr}_0,7\text{FeNiMo}_0,1$ se pot explica prin prezența în compoziția chimică a aluminiului care, conform literaturii de specialitate, contribuie la durificarea și sporirea rezistenței aliajelor multi-element.

4.2.6. Determinarea rezistenței la coroziune a aliajului multi-element

În cadrul studiului privind determinarea și analiza rezistenței la coroziune a aliajului multi-element obținut prin depunere prin sudare, cu sau fără retopirea ulterioară a stratului depus, măsurătorile electrochimice au fost efectuate conform standardului ASTM G 102-89:2010 [106]. Testul de polarizare liniară vizează identificarea relației directe dintre polarizarea aplicată și răspunsul curentului la potențialul de coroziune (E_{corr}). Intervalul de potențial utilizat a variat de la $-0,25\text{V}$ la 1V în raport cu E_{corr} , iar rata de baleiaj a fost prestabilită la $1,66\text{mV/s}$. Curentul care a traversat electrodul a fost monitorizat pe tot parcursul experimentului. De asemenea, testul de impedanță electrochimică (E/S), pentru cele patru probe, a fost realizat prin înregistrarea undelor sinusoidale simple, într-un interval de frecvențe cuprins între 10^{-1} și 10^5 Hz, în conformitate cu standardul ISO 16773-1-4:2016 [107]. Analiza spectrelor obținute a permis stabilirea unei corelații între caracteristicile chimice și fizice ale aliajelor elaborate și evoluția procesului electrochimic [108].

În figura 4.99, sunt prezentate diagramele OCP corespunzătoare celor patru probe (1C, 1D, 1T, 1L), probe pe care au fost depuse straturi de aliaj multi-element în diferite condiții tehnologice. Cele patru probe au fost ținute timp de 24 de ore în soluție de 3,5% NaCl. Diagramele OCP arată tendința materialului de a se coroda. Deplasarea potențialului (E) către valori pozitive indică faptul că materialul supus testului de coroziune poate forma un film pasiv. În cazul probei 1D, obținute prin depunere, fără retopire ulterioară, se observă că potențialul se deplasează brusc de la valoarea $-0,2\text{mV}$ către valoarea $-0,5\text{mV}$, dezvăluind faptul că materialul nu este capabil de a forma un strat pasiv de protecție împotriva coroziunii. În cazul probei 1C, potențialul se deplasează de la $-0,3\text{mV}$ către $-0,1\text{mV}$, iar după aproximativ 4 ore se observă o tendință crescătoare, indicând un comportament bun al materialului la fenomenul de coroziune. Proba 1T atinge starea de echilibru după aproximativ 5 ore, iar după 10 ore, potențialul începe să crească,

ca urmare a formării filmului pasiv. În cazul probei 1L potențialul scade de la -0,1mV la -0,2mV, având mici variații, iar după 24 de ore s-a constata o tendință de deplasare către valori pozitive.

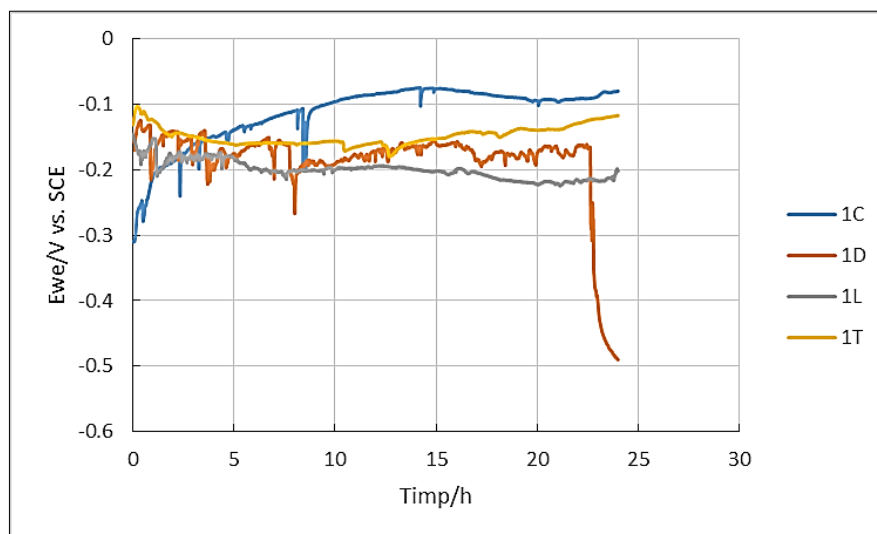


Fig. 4.99. Diagrame OCP trasate pentru aliajul multi-element, obținut prin depunere, cu sau fără retopire ulterioară (soluție 3,5% NaCl, timp menținere 24 h)

Configurația curbei de polarizare poate furniza informații semnificative despre comportamentul electrochimic al metalului. În figura 4.100 sunt reprezentate curbele de polarizare pentru probele pe care a fost depus aliajul multi-element. Trasarea curbelor de polarizare se bazează pe ecuația Stern și Geary care arată că diferența dintre potențialul aplicat și potențialul de circuit deschis este corelată cu logaritmul curentului înregistrat în timpul unei reacții electrochimice [109].

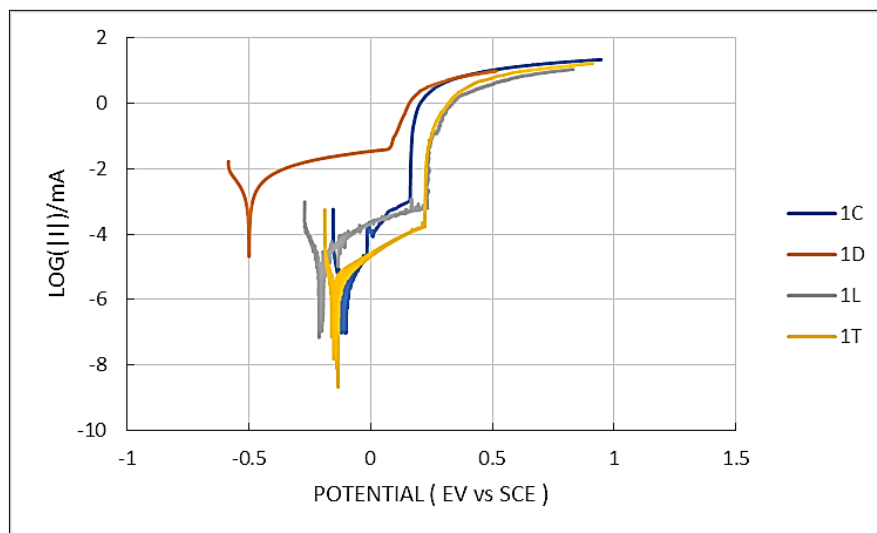


Fig. 4.100. Curbele de polarizare liniare ale probelor 1C, 1D, 1L, 1T pe care au fost depuse aliaje multi-element în diferite variante tehnologice

Pantele Tafel anodică și catodică (β_a și β_c), pentru cele patru probe executate în diferite variante tehnologice, au fost determinate prin analiza curbelor potențiodinamice, obținute cu

ajutorul programului software EC - Lab® v-9.55, pentru intervalul $\pm 250\text{mV}$, în raport cu potențialul de circuit deschis (OCP). Datele rezultate din testele de coroziune sunt sintetizate în tabelul 4.19. Semnificația parametrilor este următoarea: β_a - panta Tafel anodică, β_c - panta Tafel catodică, E_{corr} - potențialul de coroziune, I_{corr} - densitatea curentului de coroziune, V_{corr} - viteza de coroziune.

În situația în care valoarea calculată pentru panta anodică β_a este mai mare decât cea obținută pentru catodică β_c și diferența dintre ele este semnificativă, așa cum este cazul probelor 1T, 1L și 1C, se concluzionează că materialul analizat manifestă o tendință de pasivizare, prin formarea unui strat protector la suprafață, care împiedică sau limitează acțiunea fenomenului de coroziune. Dacă nu se îndeplinesc simultan aceste două condiții, așa cum este cazul probei 1D, se presupune că materialul este susceptibil la coroziune [110].

Tabel 4.19. Rezultatele testelor de coroziune electrochimică pentru probele 1D, 1T, 1L, 1C

| Proba | β_a [mV/dec] | β_c [mV/dec] | E_{corr} [mV] | I_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$] | V_{corr} [mm/an] |
|-------|--------------------|--------------------|-----------------|--|--------------------|
| 1D | 109,6 | 86,5 | -499,764 | 1,096 | 0,0213 |
| 1T | 66,1 | 29,4 | -148,176 | 0,001 | 0,019 E-03 |
| 1L | 103,6 | 58,2 | -203,802 | 0,012 | 0,234 E-03 |
| 1C | 66,2 | 33,7 | -110,468 | 0,002 | 0,039 E-03 |

Analiza comparativă a rezultatelor obținute la testele de coroziune a depunerilor cu aliajul AlCr0,7FeNiMo0,1 realizate prin cele patru variante tehnologice originale, și a rezultatelor raportate în literatura de specialitate de alți cercetători, care au investigat diferite materiale în condiții similare [111–114], se evidențiază clar avantajele procedurii inovativ dezvoltat în cadrul programului de studii doctorale și prezentat în această lucrare.

În concluzie, din analiza rezultatelor prezentate în teza de doctorat, se observă că stratul depus fără retopire cu aliaj multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1 are o rezistență la coroziune mai bună decât cea a oțelurilor carbon, iar straturile depuse care au fost și retopite ulterior au o rezistență la coroziune mai bună decât cea a oțelurilor inoxidabile.

4.2.7. Aplicații industriale

Din analiza și interpretarea rezultatelor privind proprietățile straturilor depuse prin sudare, se observă că aliajul multi-element depus prin sudare WIG, cu retopire sau fără retopire ulterioară, pe suprafața substratului din oțel S235 prezintă o duritate de 550-600HV_{0,5}. De asemenea, rezistența la coroziune a straturilor depuse și retopite este mai mare decât a oțelurilor inoxidabile, iar rezistența la uzură a straturilor depuse cu aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1 este comparabilă sau chiar superioară unor materiale utilizate în mod curent pentru aplicații industriale care urmăresc creșterea rezistenței la uzură a diferitor componente metalice. Astfel, aliajul multi-element, AlCr0,7FeNiMo0,1, este caracterizat, simultan, de rezistență ridicată la coroziune și de rezistență la uzură, proprietăți care îl fac extrem de potrivit pentru aplicații în domeniile industriale, în care componentele trebuie să se comporte bine, în condiții curente de exploatare, în medii corozive sau abrazive, cum sunt:

- *Industria construcțiilor de mașini:* componente ale echipamentelor de producție (matrițe, poansoane);
- *Industria chimică:* echipamente pentru prelucrare chimică (rezervoare, containere, piese pentru manipulare substanțe chimice);
- *Industria producătoare de energie:* palete de turbine;

- *Industria petrolului și gazelor*: supape, pompe și instrumente de foraj;
- *Industria navală*: elice navale, structuri offshore, componente metalice în contact cu mediul marin;
- *Industria minieră*: componente ale mașinilor și echipamentelor miniere.
- *Industria celulozei și hârtiei*: componente pentru sisteme de fabricație, lamele, role.

4.3. Concluzii

În urma, investigării și caracterizării straturilor depuse cu aliaje multi-element, supuse sau nu retopirii ulterioare, s-au cristalizat informații deosebit de importante și utile pentru domeniul dezvoltării de materiale cu proprietăți speciale, cum sunt și aliajele cu entropie înaltă sau medie. În continuare sunt prezentate câteva concluzii sintetice asupra proprietăților acestor aliaje:

- Aliajul cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} se poate obține prin aplicarea unei proceduri originale, inovative, care constă în topirea, prin procedeul WIG, a unui fascicul de baghete, format din trei vergele cu diametrul de 2,4mm, având compoziții chimice diferite (Al ALTIG AL99.7, oțel inoxidabil INTERROD 22 9 3 și aliaj nichel-crom NIROD 625).
- Pentru evitarea apariției fisurilor la solidificarea băii de aliaj multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} temperatura între trecerile succesive, determinată experimental, trebuie să fie de 300°C.
- Compatibilitatea metalurgică a substratului de oțel S235 și a aliajului multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} este adecvată, fiind demonstrată prin lipsa defectelor la interfața aliaj depus – material substrat, studiată prin analiza microscopică.
- Analiza spectrală a arătat că elementele chimice din componența aliajului multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} sunt uniform distribuite în stratul depus pe materialul de bază.
- La limita grăunților din straturile depuse de aliaj multi-element, s-a observat formarea unor compuși bogați în Nb și Mo, compuși care au o influență pozitivă asupra rezistenței mecanice, durtății și rezistenței la coroziune a aliajelor.
- Procesul de retopire determină o creștere a gradului de participare al materialului substrat și, implicit, o influență mai mare la stabilirea compoziției chimice finale a stratului depus, demonstrată și prin creșterea concentrației de Fe de la 54wt% la 59wt%.
- Participarea materialului de bază la stabilirea compoziției chimice a metalului depus este de aproximativ 45%, procent ce este în concordanță rezultatele raportate și de alți cercetători care au investigat placările prin procedeul de sudare WIG;
- Micro-duritatea medie a aliajelor multi-element, depuse prin cele patru variante tehnologice, este de 570HV_{0,5}, cea mai scăzută valoare fiind înregistrată în aliajul multi-element, fără retopire (558HV_{0,5}), iar cea mai mare valoare în aliajul multi-element, supus unei retopiri combinate ulterioare, creșterea fiind de aproximativ 5%. Creșterea durtății aliajului poate fi explicată prin îmbunătățirea gradului de omogenizare a structurii și finisarea granulației, după cele două retopiri (longitudinală și transversală).
- Studiile tribologice au demonstrat că cea mai scăzută rezistență la uzură o are aliajul multi-element, fără retopire ulterioară (proba 1D), iar cea mai ridicată, de 2,7 ori mai bună în comparație cu rezultatele obținute în cazul probei 1D, a fost înregistrată la aliajul multi-element supus retopirii combinate (proba 1C).
- Straturile depuse de aliaj AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} au o rezistență la uzură superioară sau comparabilă cu a altor materiale tradiționale utilizate în placările cu proprietăți anti-uzură.
- Retopirea ulterioară prin procedeul de sudare WIG, fără material de adaos, determină creșterea rezistenței la coroziune a straturilor depuse de aliaj multi-element.

- Testele la coroziune au arătat că rezistența la coroziune, în soluție de 3,5%NaCl, a stratului depus fără retopire este superioară oțelurilor carbon nealiate și slab aliate, iar aliajele depuse și retopite au o rezistență la coroziune superioară oțelurilor inoxidabile.
- Testele la uzură și la coroziune, la care au fost supuse straturile depuse de aliaj multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1, au demonstrat că aceste aliaje au, simultan, proprietăți anti-uzură și anti-coroziune mai bune decât a oțelurilor inoxidabile.
- Studiile privind duritatea, rezistența la uzură și rezistența la coroziune au demonstrat importanța crucială a procesului de retopire a straturilor depuse prin sudare și influența pozitivă pe care o are asupra acestor proprietăți. Astfel, la proiectarea tehnologiilor de depunere cu aliaje-multi-element, retopirea straturilor trebuie obligatoriu luată în considerare.
- Procedul original și inovativ, dezvoltat pentru obținerea aliajului multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1, este o soluție tehnică viabilă din punct de vedere economic, deoarece prezintă avantaje economice, susținute de costul redus al echipamentului de sudare (WIG) și de lipsa metalelor costisitoare, cum ar fi cobaltul.

CAPITOL 5

Modelarea și simularea procesului de depunere prin sudare a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr0,7FeNiMo0,1

5.2. Modelarea și simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr0,7FeNiMo0,1

În vederea analizei câmpului termic și a nivelului de tensiuni, a fost dezvoltat modelul pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1 pe un substrat din oțel S235, parametrii de proces introduși ca date de intrare în modelul numeric fiind cei stabiliți prin programul experimental. Cu modelul dezvoltat a fost simulat procesul de depunere prin sudare a cinci cordoane de sudură pe o tablă din oțel S235, cu dimensiunile 100x40x12mm. În cadrul fiecăruia dintre cele patru scenarii - depunerea simplă (1D), depunerea cu retopire longitudinală (1L), depunerea cu retopire transversală (1T) și depunerea cu retopire combinată (1C) - au fost analizate și interpretate modificările termice (câmp termic, cicluri termice) și mecanice (tensiuni echivalente, deplasări).

Rețeaua de discretizare a modelului geometric, dezvoltat pentru simularea celor patru variante tehnologice, are 129.488 noduri și 83.460 elemente de tip tetraedric. Această configurație și rețeaua de discretizare dezvoltată permit o simulare precisă a efectelor procesului de sudare, furnizând astfel informații utile pentru evaluarea comportamentului termomecanic al probelor investigate. Utilizarea unui model precis și bine calibrat facilitează simularea și analiza adecvată a proceselor de depunere și retopire, contribuind astfel la îmbunătățirea semnificativă a nivelului de cunoștințe avansate în domeniile dezvoltării de materiale cu proprietăți speciale și a comportării acestora în condiții de exploatare industrială.

5.2.1. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG fără retopire ulterioară

Modelul dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG, fără retopire ulterioară, este ilustrat în figura 5.2. Acesta include o reprezentare grafică a geometriei plăcii din oțel S235 și a cordoanelor depuse cu aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1. Parametrii de proces, introduși ca date de intrare pentru simularea procesului de fabricație, sunt cei utilizați și în programul experimental. Alte date de intrare sunt dimensiunile sursei termice (Tabel 5.2) care dau geometria sursei de sudare, determină cantitatea de căldură transferată prin conducție în materialul bază și, mai ales, care au un rol crucial în modificările termice, mecanice și metalurgice suferite de materialele aflate sub acțiunea arcului electric.

Sursa termică, considerată în modelul cu elemente finite, este o sursă de tip semi-elipsoid volumetric, conform modelului dezvoltat de Goldak. Modelul sursei de căldură este prezentat în figura 5.3, unde c_f este lungimea din față a sursei, c_r - lungimea din spate a sursei, a - lățimea și b - adâncimea. Valorile dimensiunilor sursei de sudare sunt centralizate în tabelul 5.2.

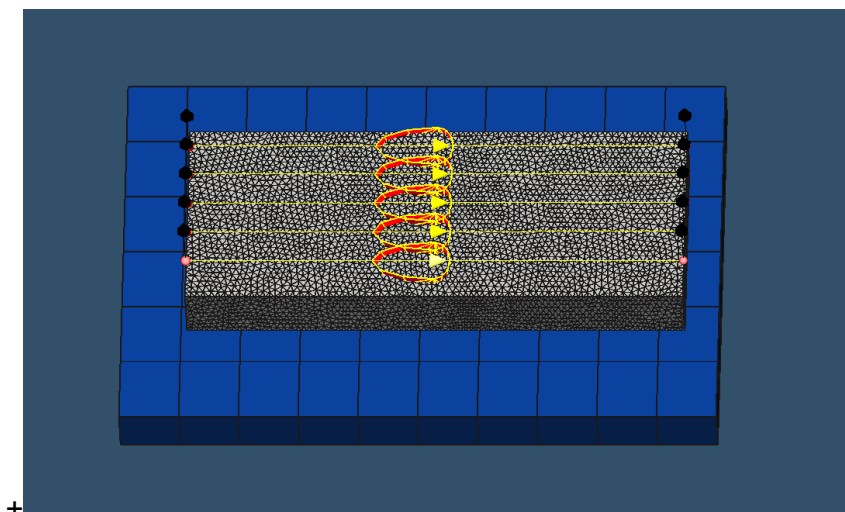


Fig. 5.2. Modelul geometric dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG, fără retopirea ulterioară a straturilor de aliaj multi-element

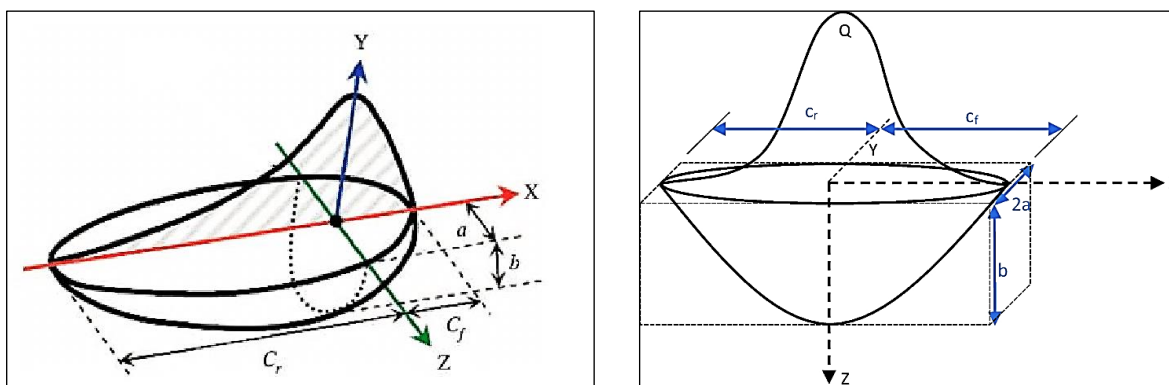


Fig. 5.3. Modelul sursei termice utilizat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element [115,116]

Tabel 5.2. Dimensiunile sursei termice utilizate pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG, fără retopire ulterioară

| Proces | Dimensiunile sursei termice | | | |
|----------|-----------------------------|------------|----------|----------|
| | c_f [mm] | c_r [mm] | a [mm] | b [mm] |
| Depunere | 3,12 | 12,5 | 4,45 | 9,27 |

5.2.1.1. Distribuția câmpului termic la simularea depunerii prin sudare WIG, fără retopire ulterioară

Figura 5.4 prezintă distribuția câmpului termic determinat de transferul termic prin conducție care are loc în timpul procesului de depunere prin sudare WIG a celor cinci cordoane de aliaj multi-element. Temperatura maximă din baia de metal topit atinge valori între 1700 și 1800°C, valorile înregistrate fiind în limitele raportate în literatura de specialitate. Predicția și analiza câmpului termic sunt extrem de importante, deoarece ciclurile de încălzire - răcire determină dilatația și contracția structurii metalice, conducând la dezvoltarea tensiunilor reziduale care pot genera, ulterior, deformații, deplasări sau chiar la fisurarea îmbinărilor sudate.

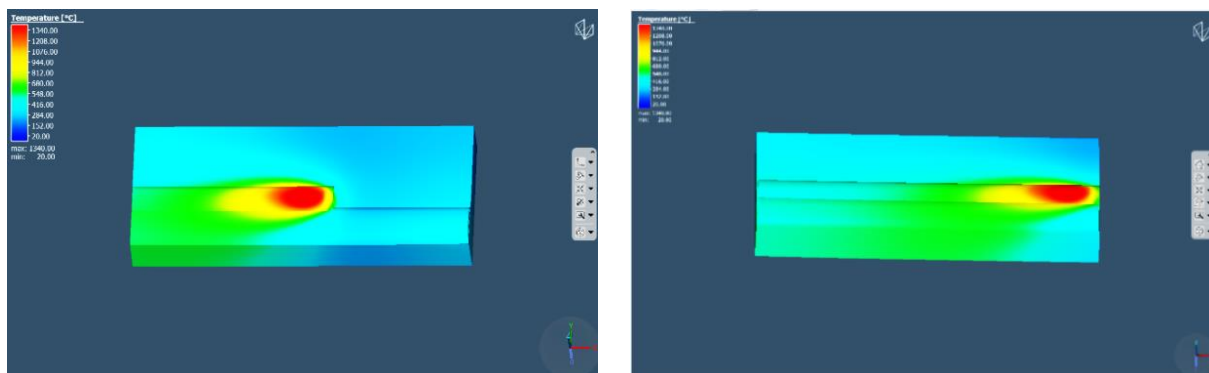


Fig. 5.4. Distribuția câmpului termic la simularea depunerii prin sudare WIG a aliajului multi-element, fără retopire ulterioară

5.2.1.2. Distribuția câmpului de tensiuni la simularea depunerii prin sudare WIG a aliajului multi-element, fără retopire ulterioară

Analiza distribuției tensiunilor echivalente Von Mises și stabilirea valorilor maxime ale acestora furnizează informații importante despre performanțele mecanice ale structurilor sudate și reprezintă un indicator estimativ în evaluarea integrității acestora.

În figura 5.5 este prezentată distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises, generat pe durata depunerii prin sudare WIG a celor cinci cordoane de aliaj multi-element. Din analiza rezultatelor numerice, s-a constatat că valorile maxime ale tensiunilor ating niveluri de 700MPa în aliajul multi-element și de 350MPa în placa din oțel S235, valorile fiind mult inferioare rezistențelor la tracțiune ale celor două materiale.

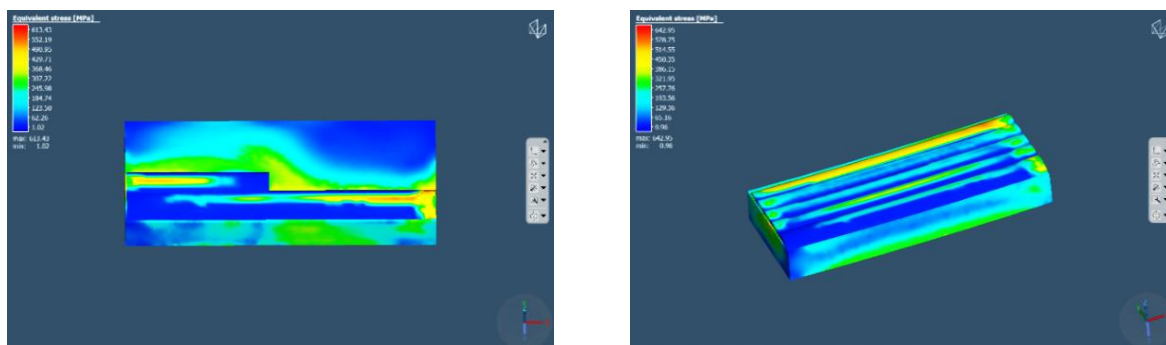


Fig. 5.5. Distribuția câmpului de tensiuni la simularea depunerii prin sudare WIG a aliajului multi-element, fără retopire ulterioară

5.2.2. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG cu retopire longitudinală

Modelul dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a cinci cordoane de aliaj multi-element, retopite ulterior pe direcție longitudinală, este prezentat în figura 5.11. Parametrii proceselor de depunere și de retopire sunt identici cu cei aplicați în testele experimentale, dimensiunile surselor termice, introduse ca date de intrare în dezvoltarea modelului numeric, fiind influențate de valorile parametrilor de proces (Tabel 5.4).

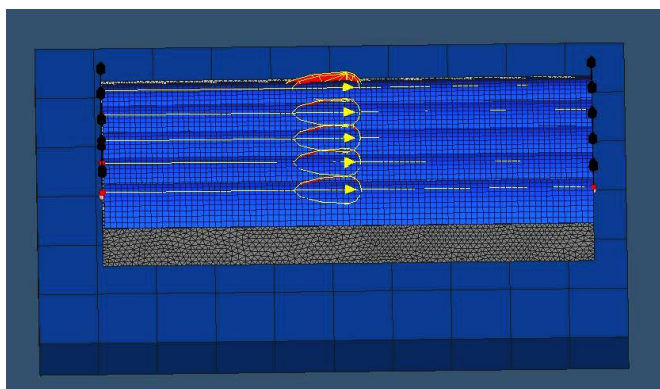


Fig. 5.11. Modelul geometric dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare, cu retopirea longitudinală a straturilor de aliaj multi-element

Tabel 5.4. Dimensiunile surselor termice utilizate pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG, cu retopire longitudinală

| Proces | Dimensiunile sursei termice | | | |
|------------------------|-----------------------------|------------|--------|--------|
| | c_f [mm] | c_r [mm] | a [mm] | b [mm] |
| Depunere | 2,74 | 10,95 | 3,67 | 7,65 |
| Retopire longitudinală | 2,77 | 11,09 | 3,74 | 7,8 |

5.2.2.1. Distribuția câmpului termic la simularea depunerii prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire longitudinală ulterioară

Din analiza distribuției câmpului termic (Fig. 5.12), generat în timpul proceselor de depunere și retopire a aliajului multi-element, s-a constatat că temperatura maximă înregistrată în baia de metal topit atinge valori între 1650 și 1800°C. Deși energia liniară aplicată în timpul retopirii este mai mică decât de cea din etapa de depunere, se remarcă o creștere continuă a temperaturii substratului de oțel. Acest fenomen poate fi explicat prin cumulara efectelor termice, generate în cele două procese, fiind determinat de introducerea, prin procesul de retopire ulterioară, a unei cantități de căldură suplimentare în material.

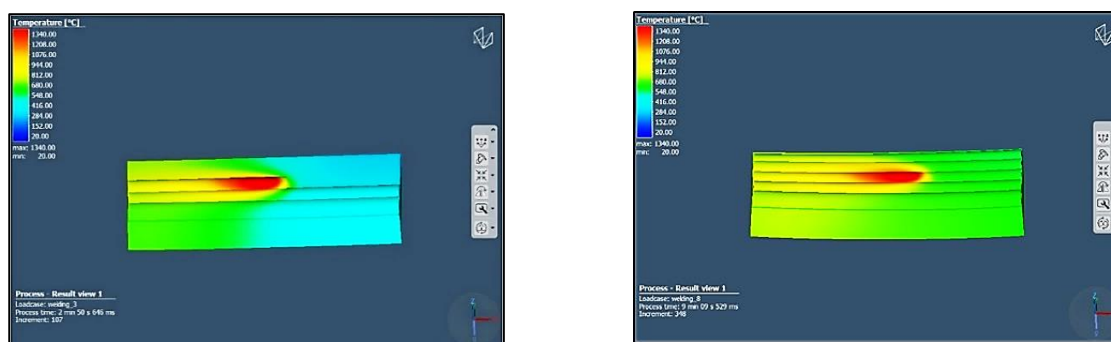


Fig. 5.12. Distribuția câmpului termic la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire longitudinală ulterioară

5.2.2.2. Distribuția câmpului de tensiuni la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire longitudinală ulterioară

Distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises, generat în timpul depunerii celor cinci cordoane de aliaj multi-element și retopite pe direcție longitudinală, este prezentată în figura 5.13. Tensiunile maxime, înregistrate în aliajul multi-element, ating valori de 700MPa în timpul etapei de depunere și cresc până la 900MPa în timpul retopirii. Această creștere a nivelului de tensiuni, comparativ cu cel înregistrat la depunerea aliajului, fără retopire, este determinată de menținerea îndelungată la o temperatură ridicată și încălzirea neuniformă a plăcii suport, fenomen cauzat de distribuția neuniformă a energiei termice, în timpul fazelor de depunere și retopire, în material. Această neuniformitate duce la concentrarea tensiunilor în anumite zone ale plăcii, contribuind, astfel, la creșterea valorilor maxime ale acestora în întreaga structură metalică.

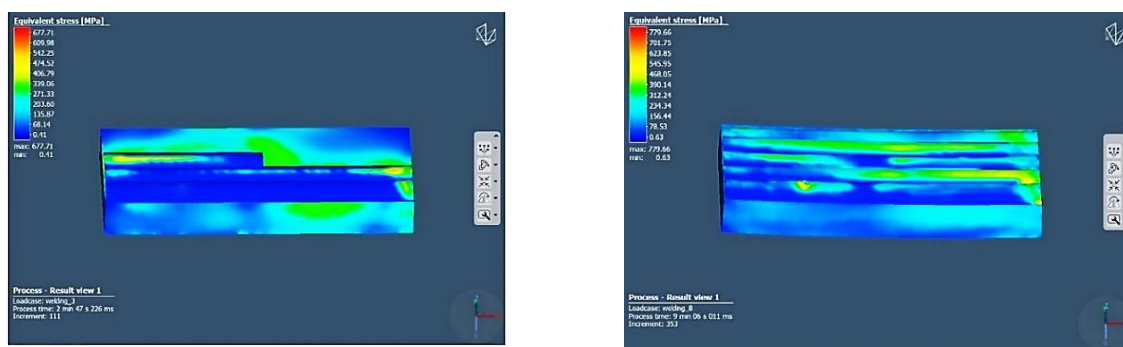


Fig. 5.13. Distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire longitudinală ulterioară

5.2.3. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG cu retopire transversală

Figura 5.18 prezintă modelul geometric dezvoltat pentru simularea procesului de depunere a aliajului multi-element, retopit, ulterior, pe direcție transversală. Acest model simulează cele cinci cordoane depuse prin sudare, precum și cele 16 traiectorii de retopire transversală. Parametrii proceselor de depunere și retopire, introduși ca date de intrare în modelare, similari cu cei din programul experimental.

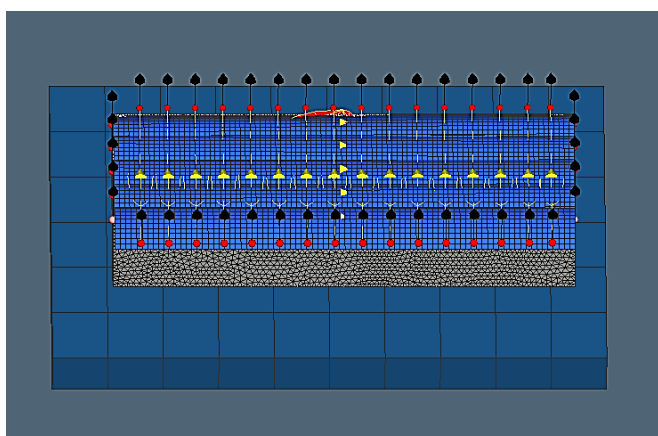


Fig. 5.18. Modelul geometric dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG, cu retopirea transversală a straturilor de aliaj multi-element

Dimensiunile surselor termice, determinate experimental, sunt prezentate în tabelul 5.6. Configurarea corectă a condițiilor de simulare este esențială pentru obținerea unor date de ieșire relevante și realiste. Modelarea corectă a surselor de căldură și a distribuției lor spațiale are un impact semnificativ asupra corectitudinii procesului de simulare și, în final, asupra rezultatelor numerice obținute care vor fi analizate și vor sta la baza deciziei cu privire la selectarea tehnologiilor optime de sudare.

Tabel 5.6. Dimensiunea sursei termice utilizate pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire transversală ulterioară

| Proces | Dimensiunile sursei termice | | | |
|-----------------------|-----------------------------|------------|--------|--------|
| | c_f [mm] | c_r [mm] | a [mm] | b [mm] |
| Depunere | 3,06 | 12,25 | 4,32 | 9,01 |
| Retopire transversală | 2,27 | 9,07 | 2,73 | 5,7 |

5.2.3.1. Distribuția câmpului termic la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire transversală ulterioară

Analiza distribuției câmpului termic (Fig. 5.19), rezultat prin simularea procesului de depunere a celor cinci cordoane și a retopirii lor pe direcție transversală (16 traiectorii), a arătat că temperatura maximă în baia de metal topit atinge valori de 1600...1700°C și este ușor mai scăzută față de varianta anterioară, deoarece energiile liniare aplicate sunt și mai scăzute (depunere, aprox. 30%; retopire, aprox. 50%). Ca și în cazul simulării depunerii prin sudare și retopirii longitudinale, și în acest caz se observă o creștere a temperaturii probei, în timpul etapei a doua a procesului de fabricație. Încălzirea este explicată prin cumulara efectelor termice generate de cele două procese de depunere și retopire.

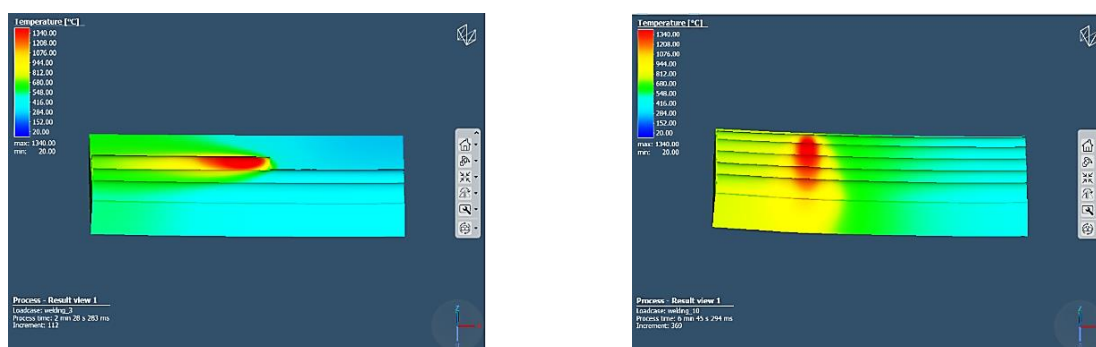


Fig. 5.19. Distribuția câmpului termic la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire transversală ulterioară

5.2.3.2. Distribuția câmpului de tensiuni la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire transversală ulterioară

În figura 5.20 este prezentată distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises, dezvoltat în timpul proceselor de depunere și retopire transversală. Rezultatele confirmă, din nou, influența semnificativă a parametrilor primari de sudare asupra modificărilor termo-mecanice înregistrate în materialul de bază. Se constată, astfel, o ușoară scădere a nivelului de tensiuni Von Mises, comparativ cu varianta tehnologică anterioară, ca o consecință a sudării cu valori mai mici ale energiei liniare. În aliajul multi-element, tensiunile maxime ating valori de până la 650MPa

În timpul procesului de depunere și până la 700MPa în timpul procedurii de retopire transversală. În timpul testelor experimentale de depunere a aliajului multi/element și de retopire transversală, fără material de adaos, s-a observat o încălzire neuniformă mai pronunțată a plăcii de oțel, comparativ cu varianta în care retopirea s-a executat pe direcție longitudinală, fenomen confirmat și de rezultatele obținute, în urma simulării. În aceste condiții, era de așteptat ca nivelul de tensiuni să fie mai mare, dar se reconfirmă rolul primordial al parametrilor de proces și influența importantă, exercitată asupra efectelor termo-mecanice generate în materialul de bază. În concluzie, sudarea cu o energie liniară mai mică, cu aproximativ 30-50%, a condus la generarea unor tensiuni echivalente Von Mises cu valori de 25% mai mici în aliajul multi-element.

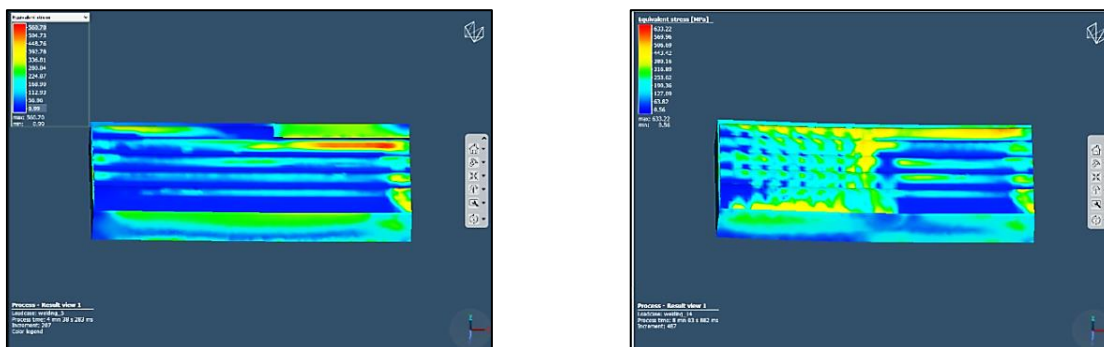


Fig. 5.20. Distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire transversală ulterioară

5.2.4. Depunere aliaj multi-element prin sudare WIG cu retopire combinată

Modelul dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire combinată, fără material de adaos, este prezentat în figura 5.25. Modelul simulează depunerea celor cinci cordoane de aliaj multi-element, cât și a celor 16 trasee de retopire transversală, urmate de 5 trasee de retopire longitudinală. Parametrii de proces (depunere și retopire combinată), introduși în simularea acestei variante tehnologice au aceleași valori ca și cei din programul experimental, iar dimensiunile surselor de căldură, introduse ca date de intrare în modelarea cu elemente finite, sunt prezentate în tabelul 5.8.

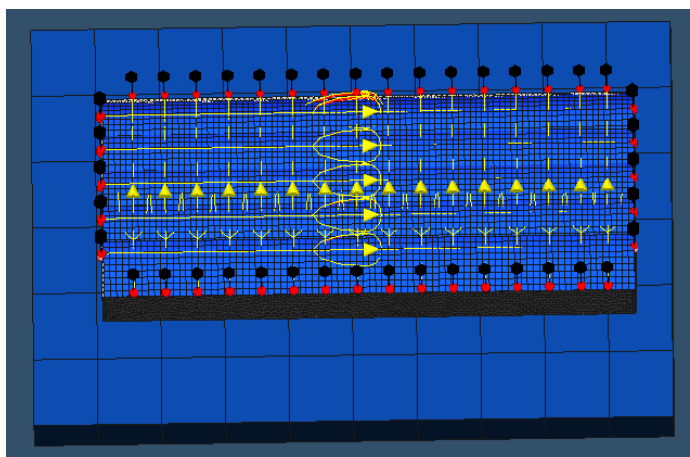


Fig. 5.25. Modelul dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG, cu retopirea combinată a straturilor de aliaj multi-element

Tabel 5.8. Dimensiunea sursei termice utilizate pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG, cu retopire combinată ulterioară

| Proces | Dimensiunile sursei termice | | | |
|------------------------|-----------------------------|---------------------|--------|--------|
| | c _f [mm] | c _r [mm] | a [mm] | b [mm] |
| Depunere | 3,27 | 13,07 | 4,74 | 9,87 |
| Retopire transversală | 2,32 | 9,26 | 2,83 | 5,9 |
| Retopire longitudinală | 2,57 | 10,3 | 3,35 | 6,98 |

5.2.4.1. Distribuția câmpului termic la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire combinată ulterioară

Distribuția câmpului termic rezultată la simularea depunerii celor cinci cordoane de aliaj și la retopirea combinată ulterioară este prezentată în figura 5.26. Temperatura maximă în baia de metal topit ajunge la valori cuprinse în intervalul 1700...1800°C, foarte apropiate cu valorile obținute și în celelalte variante tehnologice cu retopire transversală sau longitudinală.

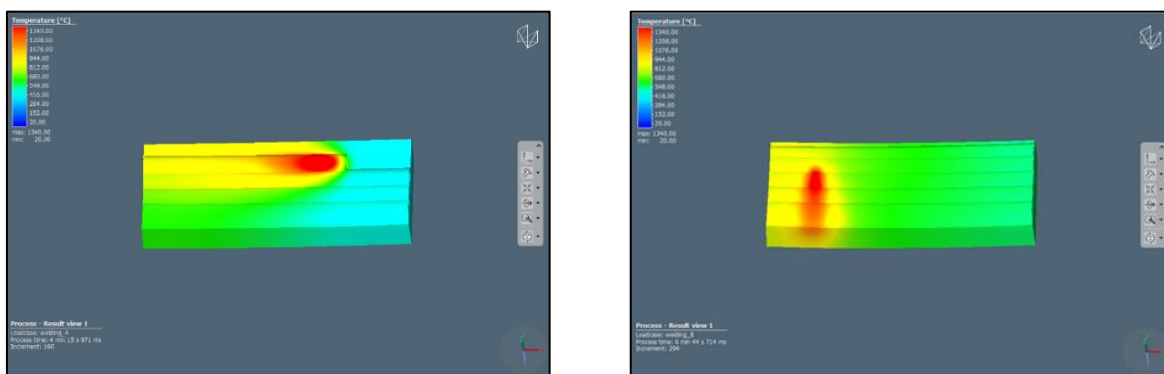


Fig. 5.26. Distribuția câmpului termic la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire combinată ulterioară

5.2.4.2. Distribuția câmpului de tensiuni Von Mises la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire combinată ulterioară

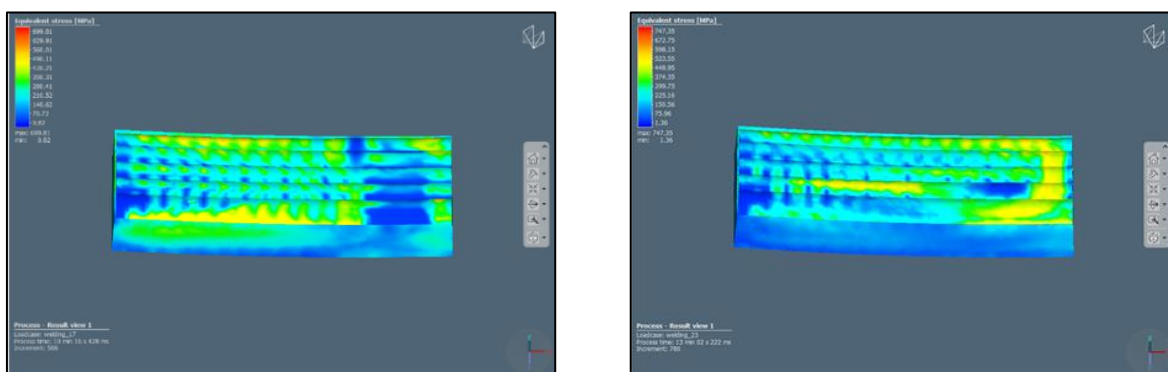


Fig. 5.27. Distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises la simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element, cu retopire combinată ulterioară

În figura 5.27 este prezentată distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises, generat în timpul procesului de depunere și retopire combinată. Un aspect care trebuie remarcat este că tensiunile echivalente dezvoltate în timpul procesului de retopire combinată au atins cele mai ridicate valori dintre toate variantele investigate, ajungând până la 930MPa în aliajul depus.

5.3. Concluzii

După finalizarea și interpretarea rezultatelor modelării și simulării procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, cu sau fără retopire ulterioară, se pot sintetiza următoarele concluzii:

- Temperatura maximă atinsă în baia de metal topit este de 1650-1800°C, valori care sunt în concordanță cu valorile raportate în literatura de specialitate pentru sudarea prin topire a aliajelor feroase.
- La depunerea prin sudare WIG a aliajului multi-element, fără retopire ulterioară, valorile maxime ale tensiunilor ajung la 700MPa în aliajul multi-element și la 300-350MPa în placa din oțel S235.
- La depunerea aliajului multi-element, retopit ulterior pe direcție longitudinală, valorile maxime ale tensiunilor echivalente Von Mises în aliajul multi-element ajung la 700MPa în timpul procesului de depunere și cresc până la 900MPa în timpul procesului de retopire.
- Rolul crucial pe care îl joacă energia liniară, prin cantitatea de căldură introdusă în material, în dezvoltarea tensiunilor și deformațiilor, este demonstrat prin rezultatele obținute la simularea procesului de depunere a aliajului, urmat de procesul de retopire transversală, când valorile tensiunilor echivalente Von Mises înregistrează valori mai mici în aliajul multi-element, adică 650MPa în timpul procesului de depunere și până la 700MPa în timpul procesului de retopire, ca urmare a aplicării unor energii liniare mai mici.
- Timpul de menținere mai îndelungat, la o temperatură ridicată, a structurii multi-component, cum este și varianta de depunere, urmată de retopire combinată (retopire transversală și retopire longitudinală) determină nivelul cel mai ridicat al tensiunilor echivalente Von Mises care ajunge până la valori de 930MPa.

CAPITOL 6

Validarea experimentală a modelului numeric dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element cu entropie medie $\text{AlCr}_{0,7}\text{FeNiMo}_{0,1}$

6.1. Program experimental pentru validarea modelului numeric

6.1.1. Proiectarea și realizarea standului pentru determinarea experimentală a valorilor temperaturilor și nivelului de tensiuni

Deoarece în condițiile depunerii și retopirii prin sudare WIG a aliajelor multi-element pe plăcile substrat din oțel S235, cu dimensiunile de 100x40x12mm, termocuplurile și mărcile tensometrice s-ar fi distrus în timpul procesului de sudare, a fost conceput un stand special pentru determinarea experimentală a modificărilor termo-mecanice (cicluri termice, tensiuni) generate la depunerea prin sudare. Placa suport a fost proiectată și prelucrată ca un monolit, iar lungimea brațelor pe care s-au aplicat mărcile tensometrice fost extinsă, pentru a reduce la minim influența arcului electric asupra nivelului de tensiuni și pentru a permite poziționarea mărcilor tensometrice.

În figura 6.5 este prezentat standul experimental conceput și realizat în CC SUDAV și care a fost utilizat pentru determinarea valorilor temperaturilor și nivelului de tensiuni, generat în timpul procesului de depunere a aliajului multi-element prin procedeul de sudare WIG. De asemenea, au fost poziționate dispozitivele de achiziție a datelor, QuantumX și Lutron BMT 4208SD, mărcile tensometrice (4 buc.) și termocuplurile (6 buc.), cu ajutorul cărora au fost colectate datele experimentale care, ulterior au fost prelucrate, analizate și comparate cu rezultatele numerice.

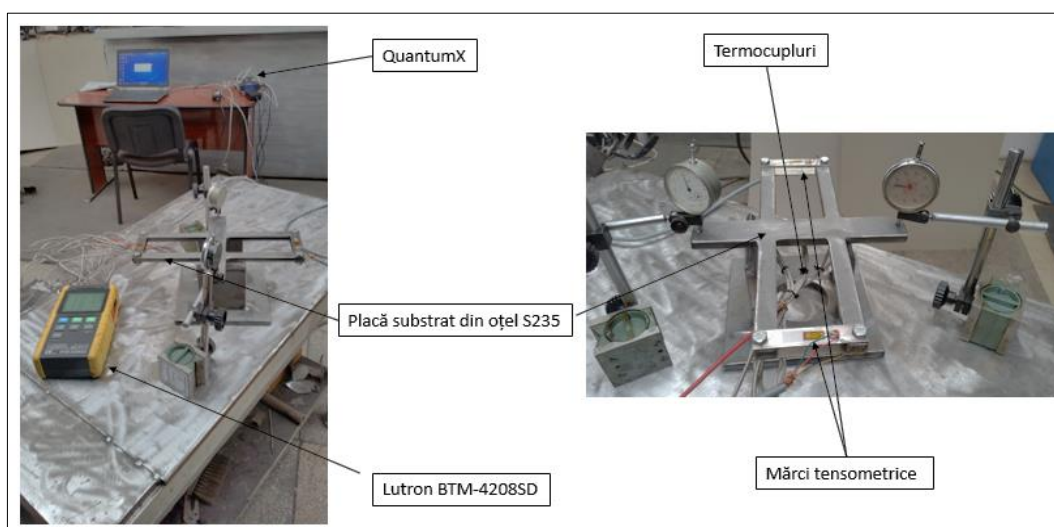


Fig. 6.5. Stand pentru măsurarea valorilor temperaturii și a nivelului de tensiuni generat de procesul de depunere prin sudare WIG

6.1.2. Caracterizarea materialelor utilizate în programul experimental

Pe placa cu grosimea de 12mm, din oțel S235, au fost depuse prin procedeul de sudare WIG cordoane din aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1. Compozițiile chimice și caracteristicile mecanice ale materialului de bază și ale materialului depus sunt detaliate în tabelele 6.1 și 6.2. Au fost depuse cinci cordoane de aliaj AlCr0,7FeNiMo0,1, prin procedeul de sudare WIG, parametrii de proces fiind prezentați în tabelul 5.3. Pentru a evita apariția fisurilor, temperatura între trecerile succesive a fost de 300°C, similar ca în experimentele anterioare.

Tabel 6.1. Compozițiile chimice ale materialului substrat și aliajului muti-element depus

| Material | C [%] | Mn [%] | Si [%] | Cr [%] | Fe [%] | Ni [%] | Mo [%] | Nb [%] | Al [%] | Co [%] | Cu [%] | Ti [%] |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S235 | 0,12 | 0,75 | 0,17 | 0,04 | 98,22 | 0,03 | 0,02 | - | 0,038 | - | 0,06 | 0,001 |
| AlCr0,7FeNiMo0,1 | 0,01 | 0,64 | 0,25 | 19,3 | 26,7 | 31,5 | 5,16 | 1,59 | 14,63 | 0,01 | 0,05 | 0,08 |

Tabel 6.2. Caracteristicile mecanice ale materialului substrat și aliajului muti-element depus

| Material | Rezistența la rupere σ_r [MPa] | Alungirea [%] | Duritate Vickers [HV] |
|------------------|---------------------------------------|---------------|-----------------------|
| S235 | 440-450 | 32 | 155-190 |
| AlCr0,7FeNiMo0,1 | 1400-2100 | 0-40 | 500-800 |

6.1.3. Parametrii procesului de depunere a aliajului prin sudare WIG

Intensitatea curentului de sudare este principalul parametru setat pe panoul de comandă al sursei de sudare SAF-RO DIGIWAVE III 420. Valoarea acestui parametru este stabilită la aceeași valoare (220A), identică cu valoarea utilizată în programul experimental dezvoltat pentru caracterizarea depunerilor cu aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1. Valorile parametrilor de sudare, înregistrați sau calculați pentru fiecare cordon depus, sunt prezentați în tabelul 6.3.

Tabel 6.3. Parametrii procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr0,7FeNiMo0,1

| Cordon depus | I_s [A] | U_a [V] | v_s [cm/min] | Energie liniară [kJ/cm] |
|--------------|-----------|-----------|----------------|-------------------------|
| 1 | 220 | 21 | 25 | 6,7 |
| 2 | 220 | 21 | 26 | 6,4 |
| 3 | 220 | 22 | 26 | 6,7 |
| 4 | 220 | 22 | 23 | 7,6 |
| 5 | 220 | 21 | 27 | 6,2 |

6.2. Modelarea cu elemente finite a câmpului de temperaturi și a nivelului de tensiuni

6.2.1. Dezvoltarea și discretizarea modelului geometric

Modelul geometric a fost proiectat și realizat cu programul MSC APEX, iar procesul de depunere prin sudare WIG a fost simulat cu ajutorul programului Simufact Welding. Pentru a simula procesul de depunere a aliajului multi-element pe suprafața plăcii din oțel S235, s-a considerat, pentru toate cele cinci depuneri, că sursa termică are o formă semi-elipsoidală. Modelul geometric, cu evidențierea rețelei de elemente finite, este prezentat în figura 6.6.

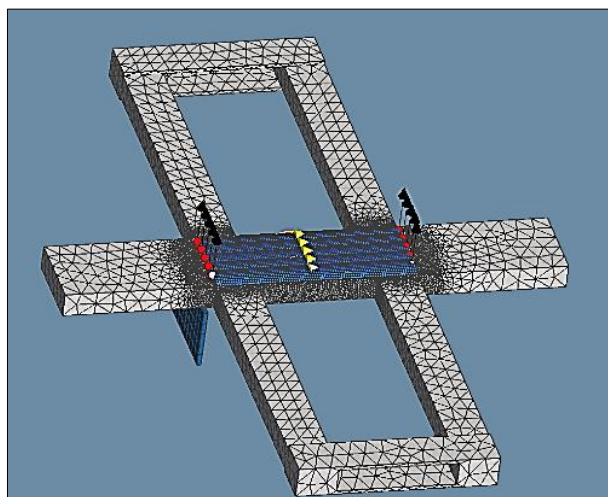


Fig. 6.6. Modelul geometric dezvoltat pentru simularea procesului de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element

Pentru simularea procesului real de depunere prin sudare WIG și pentru a minimiza erorile modelului numeric dezvoltat, geometria și dimensiunile tablei, pe care a fost depus aliajul multi-element cu entropie medie $\text{AlCr}_{0,7}\text{FeNiMo}_{0,1}$, precum și geometria și dimensiunile suportului, pe care a fost așezată placa, s-au considerat identice cu cele utilizate și în programul experimental dezvoltat pentru realizarea și caracterizarea straturilor depuse cu aliaje multi-element.

6.2.2. Analiza cu elemente finite a câmpului termic

În figura 6.7 este prezentată distribuția câmpului termic, generat în timpul procesului de depunere prin sudare WIG, pentru fiecare din cele cinci straturi depuse. Se observă geometria băii de metal topit, aflată în stare lichidă, a cărei temperatură depășește punctul de topire al aliajului multi-element depus.

Din analiza rezultatelor numerice ale analizei termice, s-a constatat că temperatura maximă atinsă în baia de metal topit s-a situat în intervalul de temperaturi $1650\text{...}1750^\circ\text{C}$, valori care sunt în concordanță cu rezultatele numerice obținute la simularea procesului de sudare a aliajelor feroase, raportate în numeroase articole publicate în reviste de specialitate cu impact în lumea științifică.

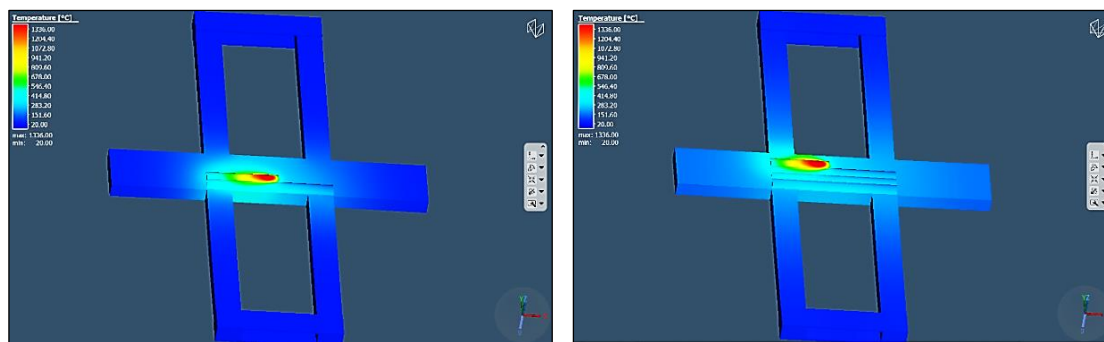


Fig. 6.7. Distribuția câmpului termic la simularea depunerii prin sudare WIG a celor cinci cordoane de aliaj multi-element (temperatura între două depuneri succesive este 300°C)

6.2.3. Analiza cu elemente finite a nivelului de tensiuni echivalente Von Mises

Distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises, generat de procesul de depunere prin sudare WIG, pentru fiecare din cele cinci cordoane de sudură, este ilustrată în figura 6.9. Valorile maxime ale tensiunilor înregistrate ating nivelul de 700MPa în aliajul multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} care are rezistența la tracțiune între 1400 și 2100MPa. În substratul din oțel S235 oțel, caracterizat prin rezistența la tracțiune de 440-450MPa, valorile maxime ale tensiunilor sunt limitate la 350MPa.

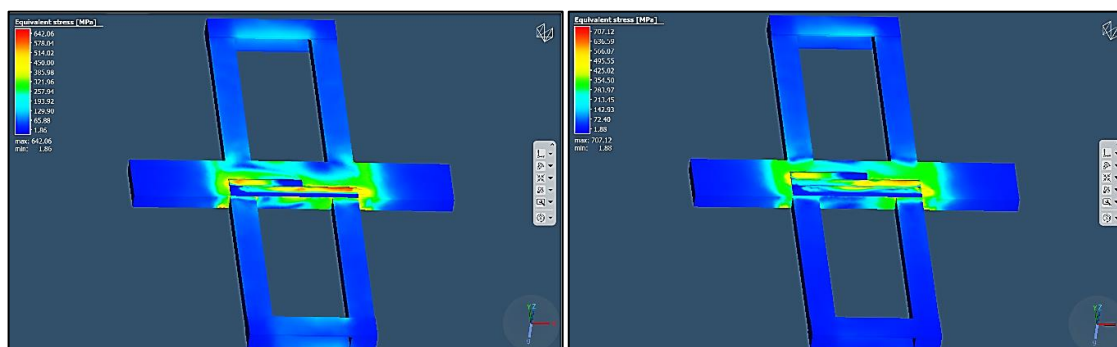


Fig. 6.9. Distribuția câmpului de tensiuni echivalente Von Mises la simularea depunerii prin sudare WIG a celor cinci cordoane de aliaj multi-element

Se remarcă variația semnificativă a valorilor tensiunilor, variație determinată de etapa de desfășurare a procesului de sudare. Astfel, la depunerea unui cordon nou, se înregistrează o scădere a nivelului de tensiuni dezvoltate în cordoanele depuse anterior. Această scădere poate fi atribuită efectului generat de procesul de depunere succesivă, care pare să producă efecte similare unui tratament termic.

6.3. Validarea experimentală a modelului numeric. Calculul erorilor

Pentru a valida modelul numeric dezvoltat în vederea analizei cu elemente finite a transferului termic și a nivelului de tensiuni generat de procesul de depunere prin sudare WIG, rezultatele numerice, obținute prin metoda elementelor finite, și experimentale, achiziționate cu ajutorul termocuplurilor, respectiv prin intermediul mărcilor tensometrice, au fost prelucrate grafic și interpretate comparativ. Datele experimentale pentru nivelul de tensiuni au fost achiziționate

din înregistrările mărcilor tensometrice, poziționate conform aranjamentului experimental, descris în secțiunile anterioare. Din cauza interferențelor generate de curentul electric, au fost colectate și prelucrate grafic valorile înregistrate de patru (1, 3, 4, 6) din cele șase termocupluri montate inițial. În figurile 6.10 și 6.11 sunt reprezentate grafic variațiile experimentale (grafice culoare roșie) și numerice (grafice culoare albastră) ale temperaturii și nivelului de tensiuni.

Ciclurile termice, prezentate în figura 5.12, reprezintă istoriile termice ale punctelor de referință, în care au fost poziționate termocuplurile. Fiecare punct înregistrează creșteri și scăderi de temperatură, adică ciclurile de încălzire și răcire ale materialului, corespunzătoare depunerii prin sudare a celor cinci cordoane de sudură. Pentru a calcula erorile modelului numeric dezvoltat, se poate aplica ecuația (6.1) care permite un calcul analitic simplu și rapid:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{expn} - T_{simn}}{T_{expn}} \cdot 100 \right|}{n} \quad (6.1)$$

unde: T_{exp} reprezintă temperatura măsurată prin metoda experimentală; T_{sim} - temperatura rezultată din analiza cu elemente finite; n – intervalul de timp de referință.

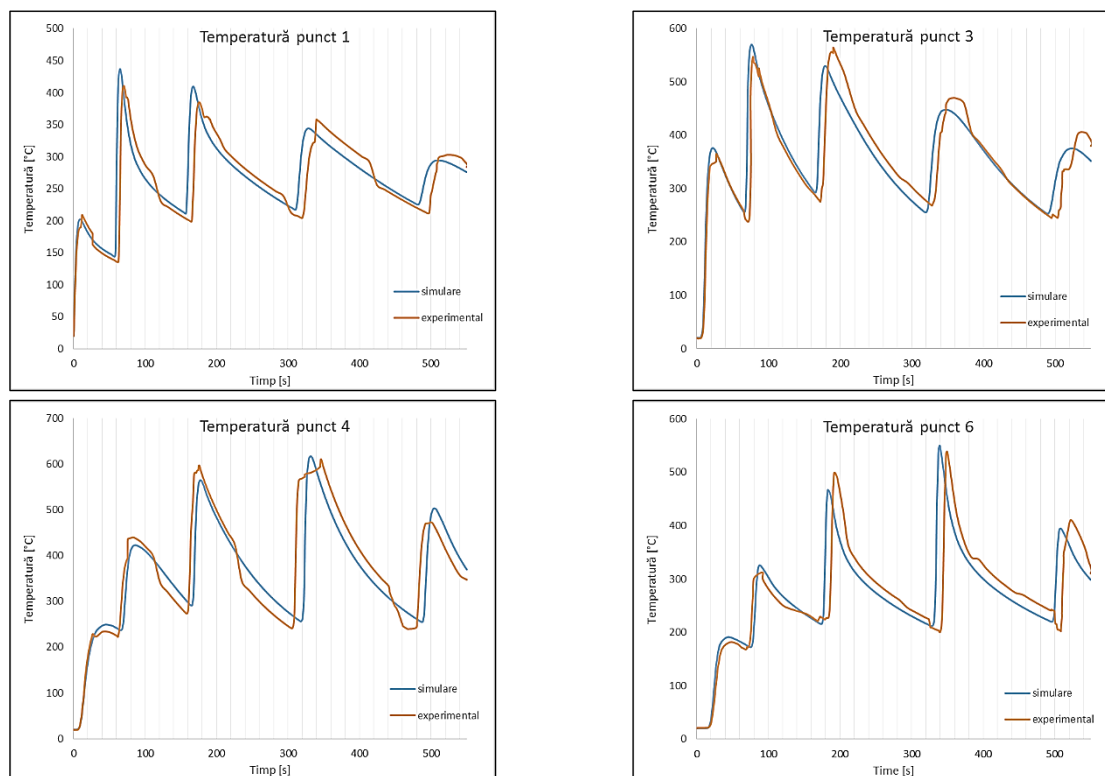


Fig. 5.12. Ciclurile termice determinate prin MEF și experimental prin metoda cu termocupluri

Punctele de referință analizate sunt punctele în care au fost montate termocuplurile (1, 3, 4, 6) în programul experimental. În final s-au obținut erori cuprinse în intervalul 4,18...5,62 (4,53% în punctul 1; 4,72% în punctul 3; 5,62% în punctul 4 și 4,18% în punctul 6). Aceste diferențe sunt în concordanță cu rezultatele obținute de cercetători care au dezvoltat și validat experimental modelele numerice utilizate pentru simularea diverselor procese de sudare [117–120]. În figura 6.11 sunt suprapuse graficele care ilustrează variația în timp a tensiunilor în punctele prestabilite, obținute atât pe cale experimentală cât și în urma modelării și simulării. Mărcile tensometrice au

fost montate "în oglindă" în punctele 1-2 și 3-4, iar graficele relevă o corelație între aceste poziționări. Mai precis, atunci când valorile dintr-un punct indică tensiuni de întindere, în cel opus se înregistrează tensiuni de compresiune.

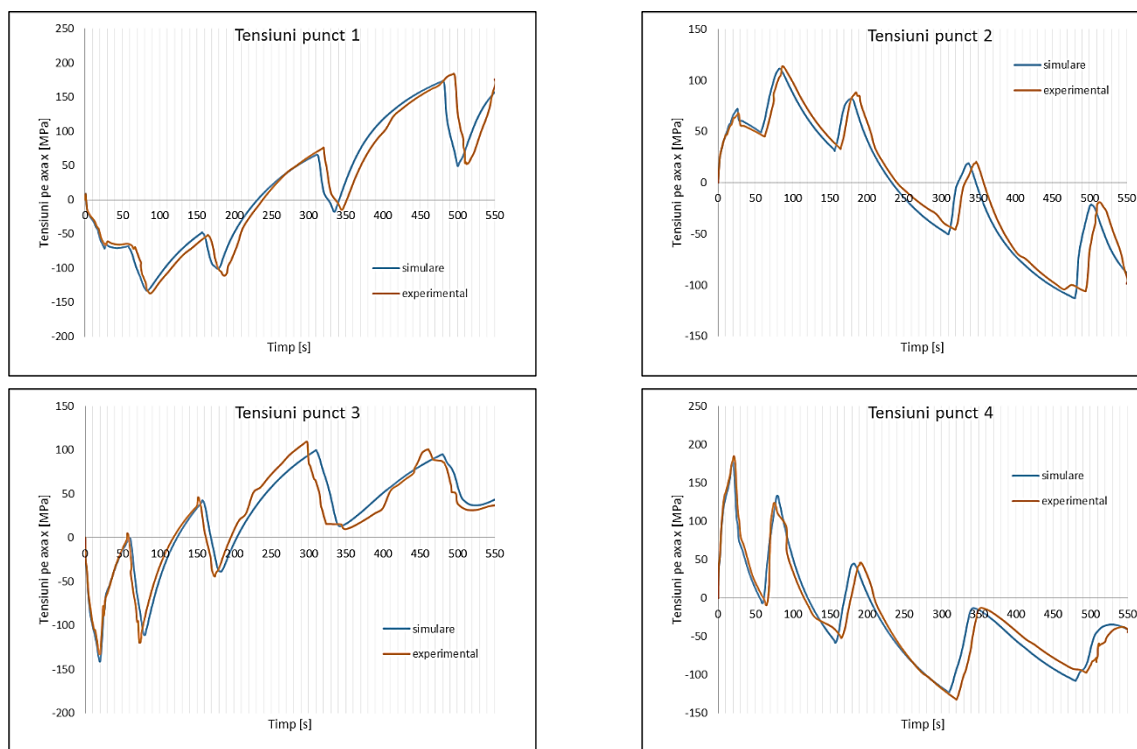


Fig. 6.11. Variația în timp a nivelului de tensiuni determinat prin MEF și experimental prin metoda cu mărci tensometrice

6.4. Concluzii

După finalizarea și interpretarea rezultatelor testelor experimentale și a analizei cu elemente finite a depunerii aliajului multi-element cu entropie medie $\text{AlCr}_{0,7}\text{FeNiMo}_{0,1}$ prin procedeul de sudare WIG, se pot sintetiza următoarele concluzii:

- Temperatura maximă atinsă în baia de metal topit este de $1650\text{-}1750^{\circ}\text{C}$, valori care sunt în concordanță cu valorile raportate în literatura de specialitate pentru sudarea prin topire a aliajelor feroase.
- Modelul dezvoltat pentru simularea procesului de depunere a aliajului $\text{AlCr}_{0,7}\text{FeNiMo}_{0,1}$ pe un material substrat din oțel S235 a fost validat experimental prin măsurarea valorilor temperaturii cu ajutorul termocuplurilor și a nivelului de tensiuni cu mărci tensometrice pe un stand original, proiectat și realizat în acest scop.
- Prin analiza comparativă a valorilor experimentale și numerice a distribuției temperaturilor și tensiunilor și calculul erorilor, au rezultat erori în intervalul 4-6%, demonstrând viabilitatea și acuratețea modelului numeric dezvoltat care poate fi aplicat și pentru alte materiale și regimuri de sudare.

CAPITOL 7

Concluzii finale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare

7.1. Concluzii finale

7.1.1. Stadiul dezvoltării aliajelor multi-element

În ultimele două decenii, a fost dezvoltată o nouă categorie de aliaje care a captat interesul cercetătorilor din întreaga lume. Aceste materiale, cunoscute sub denumirea de aliaje cu entropie înaltă, sunt constituite din cel puțin patru sau cinci elemente chimice. Elementele sunt distribuite în proporții echiatomice sau aproximativ echiatomice, fără ca unul din ele să aibă un rol dominant. Deși termenul "*entropie înaltă*" este frecvent utilizat pentru a descrie aceste aliaje, unii cercetători argumentează că nu entropia este caracteristica principală care conferă proprietăți deosebite acestor materiale. Prin urmare, au fost propuse și denumiri alternative, cum ar fi aliaje multi-component, aliaje multi-element sau aliaje complexe compoziționale. Datorită proprietăților lor unice și potențialului lor de aplicabilitate, aliajele cu entropie înaltă prezintă un interes deosebit în pentru domeniul cercetării materialelor și a comportării acestora în condiții de exploatare. Studiile asupra acestor noi materiale s-au concentrat pe înțelegerea mecanismelor care stau la baza comportamentului lor structural și funcțional, precum și pe optimizarea compoziției chimice în scopul obținerii unor performanțe îmbunătățite care să le facă capabile să reziste în diferite condiții de mediu și solicitări.

Îmbunătățirea proprietăților mecanice sau obținerea unor proprietăți similare, dar la costuri mai reduse, pot fi considerate avantaje serioase pentru integrarea unui aliaj multi-element în aplicații industriale. Cu toate acestea, deși progrese semnificative au fost realizate în cercetarea și dezvoltarea aliajelor multi-element, transferul acestor materiale din sfera de cercetare în cea industrială rămâne încă o provocare. O posibilă explicație ar fi că procedurile actuale de fabricație a acestor aliaje nu permit încă o implementare pe scară largă în industrie. În concluzie, continuarea cercetării pentru dezvoltarea și optimizarea unor noi tehnologii de fabricație, care să permită producerea eficientă și economică a acestor materiale avansate, este absolut necesară.

7.1.2. Procedeu original de obținere a aliajelor multi-element prin sudare WIG

După evaluarea stadiului actual al elaborării de aliaje multi-element, s-a identificat necesitatea de a continua cercetările în direcția dezvoltării unui procedeu nou de fabricare a aliajelor multi-element, și de a crea premisele transferului tehnologic din sfera cercetării în cea industrială. Pornind de la acest obiectiv major, a fost dezvoltată, în cadrul programului de studii universitare de doctorat, o metodă originală, inovatoare pentru depunerea aliajelor multi-element din clasa AlCrFeNi. Alegerea acestui tip de aliaj a fost motivată de proprietățile mecanice remarcabile ale acestor materiale, precum duritatea, rezistența la uzură și rezistența la coroziune, proprietăți esențiale pentru aplicațiile destinate îmbunătățirii calității suprafețelor oțelurilor.

Originalitatea procedurii de obținere a acestor aliaje multi-element, dezvoltat în cadrul programului de studii doctorale, a fost recunoscută prin acordarea brevetului de invenție nr. 135988/29.03.2024, premiat cu numeroase medalii, premii, trofee la Saloanele de Invenție EUROINVENT (Iași, 2023), UGAL INVENT (Galați, 2023), INVENTICA (Iași 2024) și alte evenimente științifice.

- Noua metodă de realizare a depunerilor cu aliaje multi-element constă în topirea unui fascicul de baghete, de compoziții chimice diferite, prin procedeul de sudare WIG, în mediu de gaz protector inert (Ar) pe suprafața unui material substrat din oțel.
- Această tehnică inovatoare permite controlul precis al compoziției chimice a aliajelor multi-element, prin selecția adecvată a baghetelor, numărului și diametrelor acestora.
- Compoziția chimică a aliajelor multi-element, obținute prin această tehnică originală, include elementele de micro-aliere regăsite în compoziția baghetelor, cum sunt carbonul (C), niobiul (Nb), manganul (Mn), molibdenul (Mo), tantalul (Ta), wolframul (W), etc. Elementele de micro-aliere au rolul, ca și în cazul aliajelor tradiționale, de a contribui la obținerea de proprietăți mecanice și chimice specifice.
- Pentru obținerea aliajelor din gama AlCrFeNi, depuse prin procedeul brevetat, au fost selectate baghete din aluminiu, oțel inoxidabil și aliaj Ni-Cr. Prin ajustarea numărului și diametrului baghetelor, se poate controla concentrația elementelor chimice din aliajul multi-element, dar și aspecte legate de reducerea riscului de fisurare, creșterea rezistenței la uzură, rezistenței la coroziune sau a plasticității.
- Această metodă inovatoare de obținere a depunerilor din aliaje multi-element reprezintă o soluție economică avantajoasă, care creează premisele transferului de tehnologie din domeniul cercetării în industrie. Folosind un procedeu de sudare, aplicat pe scară largă și materiale de adaos, deja, standardizate și disponibile pe piață, această tehnică originală oferă o modalitate accesibilă și eficientă pentru dezvoltarea de aliaje multi-element și lărgirea domeniului de utilizare în industrie.

Proiectarea conceptuală a procedurii originale de obținere a depunerilor cu aliaje multi-element a fost urmată de dezvoltarea unui program experimental complex, în cadrul căruia au fost realizate mai multe teste pentru optimizarea parametrilor de depunere prin sudare a aliajului din clasa AlCrFeNi. Concluziile acestor teste experimentale sunt sintetizate în cele ce urmează:

- Aliajul multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} poate fi obținut prin topirea unui fascicul de baghete cu diametrul de 2,4mm, compus dintr-o vergea de Al ALTIG AL99.7, o vergea din oțel inoxidabil INTERROD 22 9 3 și o vergea din aliaj Ni-Cr NIROD 625.
- Intensitatea curentului de sudare, care determină pătrunderea și este un parametru primar de o importanță majoră în controlul geometriei băii de metal topit, a fost menținută constant la valoarea de 220A, care s-a dovedit a fi optimă pentru toate variantele tehnologice de depunere a aliajului multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}.
- Rezultatele preliminare au dezvăluit că prevenirea apariției fisurilor în timpul depunerii aliajului AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, prin topirea fasciculului de baghete, este posibilă dacă temperatura între cordoanele succesive este de 300°C. Această temperatură este optimă pentru reducerea tensiunilor reziduale și a riscului de fisurare.

7.1.3. Caracterizarea aliajului multi-element cu entropie medie

AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} obținut prin depunere prin sudare WIG

Aliajele cu entropie medie sunt aliaje După stabilirea parametrilor optimi de sudare, au fost analizate proprietățile straturilor de aliaj multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, depuse prin patru variante tehnologice: depunere, fără retopire ulterioară (1D); depunere urmată de retopire longitudinală (1L); depunere urmată de retopire transversală (1T); depunere, urmată

de retopire combinată (transversală și longitudinală). Investigațiile s-au finalizat cu colectarea de informații valoroase pentru domeniul științei dezvoltării de materiale avansate, prezentate sintetic mai jos:

- Analiza macroscopică a epruvetelor, prelevate din cele patru probe, nu a evidențiat defecte vizibile, ceea ce înseamnă că, în condițiile determinării și aplicării unui regim optim de depunere prin sudare, poate fi asigurată o compatibilitate metalurgică la interfața dintre aliajul multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} și substratul din oțel S235.
- Rezultatele analizei microscopiei electronice cu scanare (SEM) a straturilor de aliaj multi-element, depuse prin sudare WIG, cu/sau fără retopire, au indicat că cele patru elemente chimice principale - Al, Fe, Ni, Cr - au o distribuție uniformă pe întregul strat depus, dovedindu-se, astfel, că procedeul de depunere a aliajelor multi-element, dezvoltat în perioada studiilor doctorale, este fezabil, viabil și placările realizate sunt de calitate.
- Formarea unor compuși bogați în niobiu (Nb) și molibden (Mo), la limita grăunților din aliajul multi-element, are o influență pozitivă asupra rezistenței la tracțiune, durității și rezistenței la coroziune, similar cu acțiunea exercitată și în aliajele tradiționale.
- Compoziția chimică a aliajului multi-element este influențată de participarea materialului substrat, a cărei valoare a fost estimată la aproximativ 45%, în acord cu valorile raportate și de alți cercetători care au studiat depunerea prin sudare WIG a unor materiale disimilare.
- Retopirea ulterioară procesului de depunere prin sudare WIG influențează substanțial compoziția chimică finală a aliajului multi-element. Astfel, analiza EDS a compoziției chimice a aliajului multi-element, obținut prin cele patru variante tehnologice, a arătat o creștere a concentrației de Fe de la 54% la 59% doar în straturile depuse și retopite ulterior prin procedeul de sudare WIG, fără material de adaos.
- Duritatea medie a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, depus prin cele patru variante tehnologice, este de 570HV_{0,5}.
- Rezultatele testelor tribologice ale aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} au arătat că aliajul are o rezistență la uzură superioară față de placările cu materiale tradiționale, demonstrând performanțele tribologice remarcabile ale acestui aliaj complex și potențialul lui de a fi selectat pentru numeroase aplicații industriale.
- Dintre cele patru probe, executate în diferite variante tehnologice, cea mai mică rezistență la uzură a fost înregistrată în cazul aliajului depus, fără retopire ulterioară, în timp ce aliajul cu cea mai ridicată rezistență la uzură a fost cel obținut prin depunere și retopire combinată rezistența la uzură fiind de aproximativ 2,7 ori mai ridicată față de aliajul fără retopire ulterioară.
- Rezultatele obținute în urma testelor de coroziune efectuate asupra depunerilor realizate cu aliajul multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} au demonstrat că rezistența la coroziune a acestui aliaj, obținut prin depunere prin sudare WIG, în mediu protector de gaz inert (Ar), este comparabilă sau chiar superioară față de cea a oțelurilor inoxidabile.
- Dintre cele patru probe, executate în diferite variante tehnologice, straturile depuse și retopite ulterior pe direcție transversală 1T și 1C au prezentat cele mai bune rezultate în ceea ce privește rezistența la coroziune în cadrul testelor efectuate.
- Studiile privind proprietățile aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, obținut prin această metodă originală, scot în evidență performanțele deosebite ale aliajului și avantajele economice care decurg din utilizarea unor echipamente de sudare convenționale și a unor materiale de adaos standardizate uzuale, care conțin o cantitate redusă de superaliaj Ni-Cr și nu conțin elemente scumpe, cum sunt mineralele critice (Co).

Rezultatele investigațiilor proprietăților straturilor depuse au evidențiat că straturile depuse de aliajul multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1} prezintă, simultan, două proprietăți deosebit de importante: rezistență la coroziune superioară față de oțelurile inoxidabile și rezistență la uzură mai bună, comparativ cu depunerile realizate cu materiale tradiționale, utilizate în aplicații similare. În contextul unei abordări sustenabile și economice, depunerile realizate cu aliajul cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, prin noul procedeu brevetat, reprezintă o opțiune promițătoare pentru aplicații industriale în care sunt necesare materiale rezistente atât la uzură, cât și la coroziune.

7.1.4. Modelarea și simularea procesului de depunere a aliajului multi-element, cu sau fără retopire, și validarea modelului numeric

Dezvoltarea modelului cu elemente finite și simularea depunerii prin sudare WIG a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, prin cele patru variante tehnologice dezvoltate în cadrul programului de studii universitare de doctorat, s-au finalizat cu obținerea unor informații semnificative, prezentate sintetic în cele ce urmează:

- În funcție de varianta tehnologică aplicată, temperatura maximă în baia de metal topit a atins valori situate în intervalul 1650...1800°C, fiind în concordanță cu rezultatele raportate în literatura de specialitate, axată pe simularea proceselor de sudare a aliajelor feroase.
- În varianta de depunere prin sudare, fără retopire ulterioară a straturilor depuse, valorile maxime ale tensiunilor echivalente Von Mises ating aproximativ 700MPa în aliajul multi-element și între 300 și 350MPa în placa din oțel S235. Cunoscându-se rezistența la tracțiune a acestor materiale (1400-2100MPa pentru aliajul multi-element și 440-450MPa pentru oțelul S235), se poate concluziona că structura multi-component obținută, în condițiile regimului aplicat, este corespunzătoare și va rezista în condiții de exploatare.
- În cazul depunerii cu retopire longitudinală ulterioară, valorile maxime ale tensiunilor Von Mises au atins nivelul de 700MPa în faza de depunere și 900MPa în faza de retopire a straturilor depuse, în timp ce în varianta de depunere cu retopire transversală, utilizarea unei energii liniare mai reduse a determinat un nivel mai scăzut al tensiunilor echivalente Von Mises (650MPa în timpul procesului de depunere și până la 700MPa în timpul procesului de retopire). Cele mai mari valori ale tensiunilor Von Mises, 930MPa în materialul depus, au rezultat la varianta cu retopire combinată, când timpul de menținere a probei la temperaturi ridicate a fost și cel mai îndelungat.
- Modelul numeric, dezvoltat în cadrul tezei de doctorat, pentru simularea procesului de depunere a aliajului AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, pe un substrat din oțel S235, a fost validat experimental prin metodele măsurării valorilor temperaturii cu termocupluri și cu mărci tensometrice pentru determinarea experimentală a nivelului de tensiuni.
- Erorile calculate analitic, pe baza rezultatelor numerice și experimentale determinate prin modelarea cu elemente finite și pe baza măsurătorilor experimentale, sunt de aproximativ 4-6%, fiind în concordanță cu valorile raportate de alți cercetători care au dezvoltat modele pentru simularea procesului de sudare prin topire.

7.2. Contribuții personale

Rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale, derulate în cadrul programului de studii universitare de doctorat, contribuie semnificativ la îmbunătățirea nivelului de cunoaștere în domeniul dezvoltării de materiale avansate și a dezvoltării proceselor și procedeele de sudare. Cercetările derulate au un caracter interdisciplinar avansat, îmbinând concepte și metode

specifice proceselor industriale, științei materialelor, transferului de căldură și prelucrării datelor prin instrumente matematice avansate. Contribuțiile personale, originale, rezultate prin dezvoltarea și implementarea unei metodologii de cercetare complexe, sunt prezentate sintetic în cele ce urmează:

- Elaborarea stadiului actual al cercetărilor în domeniul dezvoltării aliajelor multi-element, bazat pe analiza detaliată a 305 surse bibliografice, care sintetizează informații importante despre caracterizarea chimică și mecanică a acestor materiale avansate și despre procedeele de obținere, principalul scop fiind identificarea de noi direcții de cercetare, stabilirea metodologiei de cercetare și a obiectivelor tezei de doctorat (Cap. 1, Cap. 2).
- Dezvoltarea unui procedeu original și inovator de obținere a depunerilor cu aliaje multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi (Brevet de invenție acordat nr. 135988/29.03.2024), viabil și eficient din punct de vedere economic. Noutatea acestui procedeu constă în topirea și depunerea prin sudare WIG, în mediu de gaz protector inert (Ar), a unui fascicul de baghete cu compoziții chimice diferite și diametre identice sau diferite, pe un substrat din oțel nealiat, cu sau fără retopirea ulterioară a straturilor de aliaj multi-element depuse. Controlul compoziției chimice a aliajului multi-element este posibil prin selectarea sârmelor de compoziții chimice diferite, modificarea numărului și diametrelor vergelelor, în funcție de cerința/cerințele aplicațiilor industriale (rezistență la uzură, rezistență la coroziune, rezistență la oxidare, rezistență la impact) (Cap. 3).
- Dezvoltarea de rețete noi pentru obținerea de aliaje multi-element cu entropie medie și creșterea gradului de cunoaștere în domeniul dezvoltării aliajelor cu entropie medie, aliaje puțin studiate în literatură de specialitate (Cap. 3 – Subcap. 3.2).
- Dezvoltarea unei metode analitice de calcul pentru estimarea compoziției chimice a unui aliaj multi-element, obținut prin topirea unui fascicul de baghete cu compoziții chimice diferite, cu diametre identice sau diferite (Cap. 3 – Subcap. 3.2.2).
- Dezvoltarea unui program experimental complex pentru implementarea practică a procedurii originale de obținere a aliajelor multi-element din clasa de aliere AlCrFeNi, prin depunere prin sudare WIG, în mediu de gaz protector inert, și de investigare a proprietăților acestor materiale avansate, în vederea creării premizelor de transfer de tehnologie din laboratoarele de cercetare în sectorul industrial (Cap. 4).
- Proiectarea și optimizarea tehnologiei de obținere a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, prin topirea și depunerea prin sudare WIG a unui fascicul de trei baghete, cu compoziții chimice diferite și diametre identice, în vederea obținerii unor plăci cu aliaje multi-element de calitate (Cap. 4 - Subcap.4.1).
- Proiectarea și optimizarea tehnologiilor de retopire ulterioară pe direcțiile transversală, longitudinală și combinată (transversală și longitudinală), prin procedeul de sudare WIG, fără material de adaos, a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, realizat prin depunerea și topirea, prin sudare WIG, a unui fascicul de baghete, în vederea obținerii unor plăci cu aliaje multi-element de calitate (Cap. 4 - Subcap. 4.1).
- Investigarea compoziției chimice și caracterizarea straturilor de aliaj multi-element cu entropie medie AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, depuse prin sudare WIG, precum și a straturilor retopite pe direcțiile transversală, longitudinală și combinată, în raport cu direcția de depunere, pentru a obține informații despre fenomenul de difuzie a elementelor chimice, și prezența eventualelor impurități și eterogenități chimice (Cap. 4 - Subcap. 4.2).
- Investigarea și evaluarea rezistenței la uzură a aliajului multi-element AlCr_{0,7}FeNiMo_{0,1}, obținut prin depunere prin sudare WIG, precum și a straturilor de aliaj multi-element, retopite pe direcțiile transversală, longitudinală și combinată, în raport cu direcția de depunere, în scopul estimării performanțelor și aplicabilității industriale a acestor structuri

multi-component (substrat de oțel S235, placat cu aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1) în condiții de exploatare care implică expunerea la uzură și frecare (Cap. 4 – Subcap. 4.2).

- Investigarea și evaluarea rezistenței la coroziune a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr0,7FeNiMo0,1, obținut prin depunere prin sudare WIG, precum și a straturilor de aliaj multi-element, retopite pe direcțiile transversală, longitudinală și combinată, în raport cu direcția de depunere, în scopul estimării performanțelor și aplicabilității industriale a acestor structuri multi-component (substrat de oțel S235, placat cu aliajul multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1) în condiții de exploatare care implică expunerea în medii corozive, specifice industriei chimice, transportului marin (Cap. 4 – Subcap. 4.2).
- Dezvoltarea unui model original cu elemente finite pentru simularea efectelor termice (câmpuri termice, cicluri termice) și mecanice (tensiuni echivalente Von Mises și deplasări), generate de procesul de depunere prin sudare WIG și de retopire ulterioară, fără material de adaos, pe direcțiile longitudinală, transversală și combinată a straturilor de aliaj multi-element cu entropie medie AlCr0,7FeNiMo0,1, depuse pe materialul substrat din oțel S235 (Cap. 5 – Subcap. 5.3, Subcap. 5.4).
- Proiectarea și realizarea unui stand original pentru determinarea experimentală, cu termocupluri și mărci tensometrice, a distribuției temperaturilor și nivelului de tensiuni remanente, generate în materialul substrat, de procesul de depunere prin sudare WIG a aliajului multi-element cu entropie medie AlCr0,7FeNiMo0,1 (Cap. 6 – Subcap. 6.1.1).

7.3. Perspective și direcții viitoare de cercetare

Rezultatele cercetărilor privind implementarea practică a metodei originale, inovatoare, de depunere a aliajului multi-element AlCr0,7FeNiMo0,1, prin procedeul de sudare WIG, cu sau fără retopire ulterioară, și investigarea proprietăților straturilor depuse pe substratul de oțel S235 sunt promițătoare și deschid perspective noi în domeniul dezvoltării materialelor avansate. Printre noile direcții de cercetare care merită a fi abordate în viitor sunt:

- Investigarea influenței parametrilor primari de sudare asupra coeficientului de participare al materialului substrat la formarea băii de metal topit, în scopul estimării mai exacte a compoziției chimice a aliajului multi-element, în special în zona liniei de fuziune.
- Investigarea influenței poziționării vergelelor, în fasciculul de baghete și față de arcul electric, asupra gradului de omogenitate al compoziției chimice a aliajului depus.
- Investigarea posibilității matisării fasciculului de baghete, cu sârmă cu compoziție chimică similară sau diferită față de celelalte baghete, și analiza influenței acestei metode asupra omogenității și proprietăților aliajului multi-element depus.
- Îmbunătățirea metodei de calcul analitic pentru estimarea compoziției chimice a aliajului multi-element, în special în zona liniei de fuziune, prin introducerea unor coeficienți care să țină seama și de compoziția chimică a materialului substrat.
- Dezvoltarea de noi rețete de aliaje multi-element, obținute prin diversificarea baghetelor, din punct de vedere al compoziției chimice, și prin modificarea numărului și diametrelor vergelelor care intră în componența fasciculului de material de adaos.
- Investigarea influenței tratamentului termic asupra proprietăților mecanice ale straturilor din aliaje multi-element depuse prin această metodă originală.
- Investigarea proprietăților structurii multi-component, obținută prin depunerea prin sudare a unui strat tampon între materialul substrat și aliajul multi-element.
- Investigarea reconfigurării traseelor de depunere și retopire prin sudare asupra nivelului de tensiuni și deformații generate în aliajul multi-element și materialul substrat.

Bibliografie selectivă

- [1] Krishna, S.A.; Noble, N.; Radhika, N.; Saleh, B. A Comprehensive Review on Advances in High Entropy Alloys: Fabrication and Surface Modification Methods, Properties, Applications, and Future Prospects. *Journal of Manufacturing Processes* 2024, 109, 583–606, doi:10.1016/j.jmapro.2023.12.039.
- [2] Miracle, D.B. High Entropy Alloys as a Bold Step Forward in Alloy Development. *Nat Commun* 2019, 10, 1805, doi:10.1038/s41467-019-09700-1.
- [3] Miracle, D.B.; Senkov, O.N. A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts. *Acta Materialia* 2017, 122, 448–511, doi:10.1016/j.actamat.2016.08.081.
- [4] George, E.P.; Raabe, D.; Ritchie, R.O. High-Entropy Alloys. *Nat Rev Mater* 2019, 4, 515–534, doi:10.1038/s41578-019-0121-4.
- [5] Ye, Y.F.; Wang, Q.; Lu, J.; Liu, C.T.; Yang, Y. High-Entropy Alloy: Challenges and Prospects. *Materials Today* 2016, 19, 349–362, doi:10.1016/j.mattod.2015.11.026.
- [6] Gao, X.; Chen, R.; Liu, T.; Fang, H.; Qin, G.; Su, Y.; Guo, J. High-Entropy Alloys: A Review of Mechanical Properties and Deformation Mechanisms at Cryogenic Temperatures. *J Mater Sci* 2022, 57, 6573–6606, doi:10.1007/s10853-022-07066-2.
- [7] Sharma, P.; Dwivedi, V.K.; Dwivedi, S.P. Development of High Entropy Alloys: A Review. *Materials Today: Proceedings* 2021, 43, 502–509, doi:10.1016/j.matpr.2020.12.023.
- [8] Sarswat, P.; Smith, T.; Sarkar, S.; Murali, A.; Free, M. Design and Fabrication of New High Entropy Alloys for Evaluating Titanium Replacements in Additive Manufacturing. *Materials* 2020, 13, 3001, doi:10.3390/ma13133001.
- [9] George, E.P.; Curtin, W.A.; Tasan, C.C. High Entropy Alloys: A Focused Review of Mechanical Properties and Deformation Mechanisms. *Acta Materialia* 2020, 188, 435–474, doi:10.1016/j.actamat.2019.12.015.
- [10] Gopinath, V.M.; Arulvel, S. A Review on the Steels, Alloys/High Entropy Alloys, Composites and Coatings Used in High Temperature Wear Applications. *Materials Today: Proceedings* 2021, 43, 817–823, doi:10.1016/j.matpr.2020.06.495.
- [11] King, D.J.M. Investigation of High-Entropy Alloys for Use in Advanced Nuclear Applications, University of Technology: Sydney, 2016.
- [12] Zhang, Y.; Li, R. New Advances in High-Entropy Alloys. *Entropy* 2020, 22, 1158, doi:10.3390/e22101158.
- [13] Menghani, J.; Vyas, A.; Patel, P.; Natu, H.; More, S. Wear, Erosion and Corrosion Behavior of Laser Cladded High Entropy Alloy Coatings – A Review. *Materials Today: Proceedings* 2021, 38, 2824–2829, doi:10.1016/j.matpr.2020.08.763.
- [14] Scutelnicu, E.; Simion, G.; Rusu, C.C.; Gheonea, M.C.; Voiculescu, I.; Geanta, V. High Entropy Alloys Behaviour During Welding. *Rev. Chim.* 2001, 71, 219–233, doi:10.37358/RC.20.3.7991.
- [15] Tsai, M.-H.; Yeh, J.-W. High-Entropy Alloys: A Critical Review. *Materials Research Letters* 2014, 2, 107–123, doi:10.1080/21663831.2014.912690.
- [16] Li, W.; Xie, D.; Li, D.; Zhang, Y.; Gao, Y.; Liaw, P.K. Mechanical Behavior of High-Entropy Alloys. *Progress in Materials Science* 2021, 118, 100777, doi:10.1016/j.pmatsci.2021.100777.
- [17] Liu, J.; Guo, X.; Lin, Q.; He, Z.; An, X.; Li, L.; Liaw, P.K.; Liao, X.; Yu, L.; Lin, J.; et al. Excellent Ductility and Serration Feature of Metastable CoCrFeNi High-Entropy Alloy at Extremely Low Temperatures. *Sci. China Mater.* 2019, 62, 853–863, doi:10.1007/s40843-018-9373-y.

- [18] Zherebtsov, S.; Stepanov, N.; Ivanisenko, Y.; Shaysultanov, D.; Yurchenko, N.; Klimova, M.; Salishchev, G. Evolution of Microstructure and Mechanical Properties of a CoCrFeMnNi High-Entropy Alloy during High-Pressure Torsion at Room and Cryogenic Temperatures. *Metals* 2018, 8, 123, doi:10.3390/met8020123.
- [19] Waseem, O.A.; Ryu, H.J. Combinatorial Development of the Low-Density High-Entropy Alloy Al₁₀Cr₂₀Mo₂₀Nb₂₀Ti₂₀Zr₁₀ Having Gigapascal Strength at 1000 °C. *Journal of Alloys and Compounds* 2020, 845, 155700, doi:10.1016/j.jallcom.2020.155700.
- [20] Wang, W.-R.; Wang, W.-L.; Yeh, J.-W. Phases, Microstructure and Mechanical Properties of Al_xCoCrFeNi High-Entropy Alloys at Elevated Temperatures. *Journal of Alloys and Compounds* 2014, 589, 143–152, doi:10.1016/j.jallcom.2013.11.084.
- [21] Yeh, J. -W.; Chen, S. -K.; Lin, S. -J.; Gan, J. -Y.; Chin, T. -S.; Shun, T. -T.; Tsau, C. -H.; Chang, S. -Y. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Adv Eng Mater* 2004, 6, 299–303, doi:10.1002/adem.200300567.
- [22] Cantor, B.; Chang, I.T.H.; Knight, P.; Vincent, A.J.B. Microstructural Development in Equiatomic Multicomponent Alloys. *Materials Science and Engineering: A* 2004, 375–377, 213–218, doi:10.1016/j.msea.2003.10.257.
- [23] Senkov, O.N.; Senkova, S.V.; Woodward, C. Effect of Aluminum on the Microstructure and Properties of Two Refractory High-Entropy Alloys. *Acta Materialia* 2014, 68, 214–228, doi:10.1016/j.actamat.2014.01.029.
- [24] Salishchev, G.A.; Tikhonovsky, M.A.; Shaysultanov, D.G.; Stepanov, N.D.; Kuznetsov, A.V.; Kolodiy, I.V.; Tortika, A.S.; Senkov, O.N. Effect of Mn and V on Structure and Mechanical Properties of High-Entropy Alloys Based on CoCrFeNi System. *Journal of Alloys and Compounds* 2014, 591, 11–21, doi:10.1016/j.jallcom.2013.12.210.
- [25] Ng, C.; Guo, S.; Luan, J.; Wang, Q.; Lu, J.; Shi, S.; Liu, C.T. Phase Stability and Tensile Properties of Co-Free Al_{0.5}CrCuFeNi₂ High-Entropy Alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 2014, 584, 530–537, doi:10.1016/j.jallcom.2013.09.105.
- [26] Jiang, L.; Lu, Y.; Dong, Y.; Wang, T.; Cao, Z.; Li, T. Annealing Effects on the Microstructure and Properties of Bulk High-Entropy CoCrFeNiTi_{0.5} Alloy Casting Ingot. *Intermetallics* 2014, 44, 37–43, doi:10.1016/j.intermet.2013.08.016.
- [27] Ji, W.; Fu, Z.; Wang, W.; Wang, H.; Zhang, J.; Wang, Y.; Zhang, F. Mechanical Alloying Synthesis and Spark Plasma Sintering Consolidation of CoCrFeNiAl High-Entropy Alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 2014, 589, 61–66, doi:10.1016/j.jallcom.2013.11.146.
- [28] Wang, Y.P.; Li, B.S.; Ren, M.X.; Yang, C.; Fu, H.Z. Microstructure and Compressive Properties of AlCrFeCoNi High Entropy Alloy. *Materials Science and Engineering: A* 2008, 491, 154–158, doi:10.1016/j.msea.2008.01.064.
- [29] Jiang, Z.J.; He, J.Y.; Wang, H.Y.; Zhang, H.S.; Lu, Z.P.; Dai, L.H. Shock Compression Response of High Entropy Alloys. *Materials Research Letters* 2016, 4, 226–232, doi:10.1080/21663831.2016.1191554.
- [30] Qiu, X.-W. Microstructure and Properties of AlCrFeNiCoCu High Entropy Alloy Prepared by Powder Metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds* 2013, 555, 246–249, doi:10.1016/j.jallcom.2012.12.071.
- [31] Dong, Y.; Lu, Y.; Kong, J.; Zhang, J.; Li, T. Microstructure and Mechanical Properties of Multi-Component AlCrFeNiMox High-Entropy Alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 2013, 573, 96–101, doi:10.1016/j.jallcom.2013.03.253.
- [32] Kuznetsov, A.V.; Shaysultanov, D.G.; Stepanov, N.D.; Salishchev, G.A.; Senkov, O.N. Tensile Properties of an AlCrCuNiFeCo High-Entropy Alloy in as-Cast and Wrought Conditions. *Materials Science and Engineering: A* 2012, 533, 107–118, doi:10.1016/j.msea.2011.11.045.
- [33] Liu, L.; Zhu, J.B.; Zhang, C.; Li, J.C.; Jiang, Q. Microstructure and the Properties of FeCoCuNiSn_x High Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A* 2012, 548, 64–68, doi:10.1016/j.msea.2012.03.080.
- [34] Daoud, H.M.; Manzoni, A.; Völkl, R.; Wanderka, N.; Glatzel, U. Microstructure and Tensile Behavior of Al₈Co₁₇Cr₁₇Cu₈Fe₁₇Ni₃₃ (at.%) High-Entropy Alloy. *JOM* 2013, 65, 1805–1814, doi:10.1007/s11837-013-0756-3.

- [35] Zhang, H.; Meng, H.; Meng, F.; Tong, Y.; Liaw, P.K.; Yang, X.; Zhao, L.; Wang, H.; Gao, Y.; Chen, S. Magnificent Tensile Strength and Ductility Synergy in a NiCoCrAlTi High-Entropy Alloy at Elevated Temperature. *Journal of Materials Research and Technology* 2024, 28, 522–532, doi:10.1016/j.jmrt.2023.12.038.
- [36] Carroll, R.; Lee, C.; Tsai, C.-W.; Yeh, J.-W.; Antonaglia, J.; Brinkman, B.A.W.; LeBlanc, M.; Xie, X.; Chen, S.; Liaw, P.K.; et al. Experiments and Model for Serration Statistics in Low-Entropy, Medium-Entropy and High-Entropy Alloys. *Sci Rep* 2015, 5, 16997, doi:10.1038/srep16997.
- [37] Man, J.; Wu, B.; Duan, G.; Zhang, L.; Du, X.; Liu, Y.; Esling, C. Super-High Strength of a CoCrNiFe Based High Entropy Alloy. *Journal of Materials Science & Technology* 2024, 177, 79–84, doi:10.1016/j.jmst.2023.08.032.
- [38] Cui, Y.; Shen, J.; Manladan, S.M.; Geng, K.; Hu, S. Wear Resistance of FeCoCrNiMnAlx High-Entropy Alloy Coatings at High Temperature. *Applied Surface Science* 2020, 512, 145736, doi:10.1016/j.apsusc.2020.145736.
- [39] Poletti, M.G.; Fiore, G.; Gili, F.; Mangherini, D.; Battezzati, L. Development of a New High Entropy Alloy for Wear Resistance: FeCoCrNiW0.3 and FeCoCrNiW0.3+ 5 at.% of C. *Materials & Design* 2017, 115, 247–254, doi:10.1016/j.matdes.2016.11.027.
- [40] Sun, Z.; Zhang, M.; Wang, G.; Yang, X.; Wang, S. Wear and Corrosion Resistance Analysis of FeCoNiTiAlx High-Entropy Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding. *Coatings* 2021, 11, 155, doi:10.3390/coatings11020155.
- [41] Löbel, M.; Lindner, T.; Mehner, T.; Lampke, T. Microstructure and Wear Resistance of AlCoCrFeNiTi High-Entropy Alloy Coatings Produced by HVOF. *Coatings* 2017, 7, 144, doi:10.3390/coatings7090144.
- [42] Chen, M.; Shi, X.H.; Yang, H.; Liaw, P.K.; Gao, M.C.; Hawk, J.A.; Qiao, J. Wear Behavior of Al 0.6 CoCrFeNi High-Entropy Alloys: Effect of Environments. *J. Mater. Res.* 2018, 33, 3310–3320, doi:10.1557/jmr.2018.279.
- [43] Thurston, K.V.S.; Gludovatz, B.; Hohenwarter, A.; Laplanche, G.; George, E.P.; Ritchie, R.O. Effect of Temperature on the Fatigue-Crack Growth Behavior of the High-Entropy Alloy CrMnFeCoNi. *Intermetallics* 2017, 88, 65–72, doi:10.1016/j.intermet.2017.05.009.
- [44] Feng, R.; Rao, Y.; Liu, C.; Xie, X.; Yu, D.; Chen, Y.; Ghazisaeidi, M.; Ungar, T.; Wang, H.; An, K.; et al. Enhancing Fatigue Life by Ductile-Transformable Multicomponent B2 Precipitates in a High-Entropy Alloy. *Nat Commun* 2021, 12, 3588, doi:10.1038/s41467-021-23689-6.
- [45] Chen, P.; Lee, C.; Wang, S.-Y.; Seifi, M.; Lewandowski, J.J.; Dahmen, K.A.; Jia, H.; Xie, X.; Chen, B.; Yeh, J.-W.; et al. Fatigue Behavior of High-Entropy Alloys: A Review. *Sci. China Technol. Sci.* 2018, 61, 168–178, doi:10.1007/s11431-017-9137-4.
- [46] Li, W.; Chen, S.; Liaw, P.K. Discovery and Design of Fatigue-Resistant High-Entropy Alloys. *Scripta Materialia* 2020, 187, 68–75, doi:10.1016/j.scriptamat.2020.05.047.
- [47] Seifi, M.; Li, D.; Yong, Z.; Liaw, P.K.; Lewandowski, J.J. Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Behavior of As-Cast High-Entropy Alloys. *JOM* 2015, 67, 2288–2295, doi:10.1007/s11837-015-1563-9.
- [48] Hou, L.; Hui, J.; Yao, Y.; Chen, J.; Liu, J. Effects of Boron Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlFeCoNiBx High Entropy Alloy Prepared by Vacuum Arc Melting. *Vacuum* 2019, 164, 212–218, doi:10.1016/j.vacuum.2019.03.019.
- [49] Stepanov, N.D.; Yurchenko, N.Yu.; Zhrebtsov, S.V.; Tikhonovsky, M.A.; Salishchev, G.A. Aging Behavior of the HfNbTaTiZr High Entropy Alloy. *Materials Letters* 2018, 211, 87–90, doi:10.1016/j.matlet.2017.09.094.
- [50] Karati, A.; Guruvidyathri, K.; Hariharan, V.S.; Murty, B.S. Thermal Stability of AlCoFeMnNi High-Entropy Alloy. *Scripta Materialia* 2019, 162, 465–467, doi:10.1016/j.scriptamat.2018.12.017.
- [51] Feng, J.; Song, K.; Liang, S.; Guo, X.; Jiang, Y. Electrical Wear of TiB2 Particle-Reinforced Cu and Cu–Cr Composites Prepared by Vacuum Arc Melting. *Vacuum* 2020, 175, 109295, doi:10.1016/j.vacuum.2020.109295.
- [52] Güler, S.; Alkan, E.D.; Alkan, M. Vacuum Arc Melted and Heat Treated AlCoCrFeNiTiX Based High-Entropy Alloys: Thermodynamic and Microstructural Investigations. *Journal of Alloys and Compounds* 2022, 903, 163901, doi:10.1016/j.jallcom.2022.163901.

- [53] Zhang, P.; Li, Y.; Chen, Z.; Zhang, J.; Shen, B. Oxidation Response of a Vacuum Arc Melted NbZrTiCrAl Refractory High Entropy Alloy at 800–1200 °C. *Vacuum* 2019, 162, 20–27, doi:10.1016/j.vacuum.2019.01.026.
- [54] Geanta, V.; Voiculescu, I. Characterization and Testing of High-Entropy Alloys from AlCrFeCoNi System for Military Applications. In *Engineering Steels and High Entropy-Alloys*; Sharma, A., Duriagina, Z., Kumar, S., Eds.; IntechOpen, 2020 ISBN 978-1-78985-947-8.
- [55] Onawale, O.T.; Cobbinah, P.V.; Nzeukou, R.A.; Matizamhuka, W.R. Synthesis Route, Microstructural Evolution, and Mechanical Property Relationship of High-Entropy Alloys (HEAs): A Review. *Materials* 2021, 14, 3065, doi:10.3390/ma14113065.
- [56] Santodonato, L.J.; Zhang, Y.; Feygenson, M.; Parish, C.M.; Gao, M.C.; Weber, R.J.K.; Neuefeind, J.C.; Tang, Z.; Liaw, P.K. Deviation from High-Entropy Configurations in the Atomic Distributions of a Multi-Principal-Element Alloy. *Nat Commun* 2015, 6, 5964, doi:10.1038/ncomms6964.
- [57] Jablonski, P.D.; Licavoli, J.J.; Gao, M.C.; Hawk, J.A. Manufacturing of High Entropy Alloys. *JOM* 2015, 67, 2278–2287, doi:10.1007/s11837-015-1540-3.
- [58] Wang, C.; Ji, W.; Fu, Z. Mechanical Alloying and Spark Plasma Sintering of CoCrFeNiMnAl High-Entropy Alloy. *Advanced Powder Technology* 2014, 25, 1334–1338, doi:10.1016/j.apt.2014.03.014.
- [59] Joseph, J.; Hodgson, P.; Jarvis, T.; Wu, X.; Stanford, N.; Fabijanic, D.M. Effect of Hot Isostatic Pressing on the Microstructure and Mechanical Properties of Additive Manufactured AlxCoCrFeNi High Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A* 2018, 733, 59–70, doi:10.1016/j.msea.2018.07.036.
- [60] Shen, Q.; Kong, X.; Chen, X. Fabrication of Bulk Al-Co-Cr-Fe-Ni High-Entropy Alloy Using Combined Cable Wire Arc Additive Manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and Mechanical Properties. *Journal of Materials Science & Technology* 2021, 74, 136–142, doi:10.1016/j.jmst.2020.10.037.
- [61] Ma, S.G.; Zhang, S.F.; Gao, M.C.; Liaw, P.K.; Zhang, Y. A Successful Synthesis of the CoCrFeNiAl_{0.3} Single-Crystal, High-Entropy Alloy by Bridgman Solidification. *JOM* 2013, 65, 1751–1758, doi:10.1007/s11837-013-0733-x.
- [62] Zuo, T.; Yang, X.; Liaw, P.K.; Zhang, Y. Influence of Bridgman Solidification on Microstructures and Magnetic Behaviors of a Non-Equiatomic FeCoNiAlSi High-Entropy Alloy. *Intermetallics* 2015, 67, 171–176, doi:10.1016/j.intermet.2015.08.014.
- [63] Ma, S.G.; Zhang, S.F.; Qiao, J.W.; Wang, Z.H.; Gao, M.C.; Jiao, Z.M.; Yang, H.J.; Zhang, Y. Superior High Tensile Elongation of a Single-Crystal CoCrFeNiAl_{0.3} High-Entropy Alloy by Bridgman Solidification. *Intermetallics* 2014, 54, 104–109, doi:10.1016/j.intermet.2014.05.018.
- [64] Zuo, T.; Ren, S.; Liaw, P.K.; Zhang, Y. Processing Effects on the Magnetic and Mechanical Properties of FeCoNiAl_{0.2}Si_{0.2} High Entropy Alloy. *Int J Miner Metall Mater* 2013, 20, 549–555, doi:10.1007/s12613-013-0764-x.
- [65] Laurent-Brocq, M.; Akhatova, A.; Perrière, L.; Chebini, S.; Sauvage, X.; Leroy, E.; Champion, Y. Insights into the Phase Diagram of the CrMnFeCoNi High Entropy Alloy. *Acta Materialia* 2015, 88, 355–365, doi:10.1016/j.actamat.2015.01.068.
- [66] Jiang, L.; Jiang, H.; Lu, Y.; Wang, T.; Cao, Z.; Li, T. Mechanical Properties Improvement of AlCrFeNi₂Ti_{0.5} High Entropy Alloy through Annealing Design and Its Relationship with Its Particle-Reinforced Microstructures. *Journal of Materials Science & Technology* 2015, 31, 397–402, doi:10.1016/j.jmst.2014.09.011.
- [67] Alijani, F.; Reihanian, M.; Gheisari, Kh. Study on Phase Formation in Magnetic FeCoNiMnV High Entropy Alloy Produced by Mechanical Alloying. *Journal of Alloys and Compounds* 2019, 773, 623–630, doi:10.1016/j.jallcom.2018.09.204.
- [68] Salemi, F.; Abbasi, M.H.; Karimzadeh, F. Synthesis and Thermodynamic Analysis of Nanostructured CuNiCoZnAl High Entropy Alloy Produced by Mechanical Alloying. *Journal of Alloys and Compounds* 2016, 685, 278–286, doi:10.1016/j.jallcom.2016.05.274.

- [69] Li, W.; Liu, P.; Liaw, P.K. Microstructures and Properties of High-Entropy Alloy Films and Coatings: A Review. *Materials Research Letters* 2018, 6, 199–229, doi:10.1080/21663831.2018.1434248.
- [70] Li, J.; Huang, Y.; Meng, X.; Xie, Y. A Review on High Entropy Alloys Coatings: Fabrication Processes and Property Assessment. *Adv. Eng. Mater.* 2019, 21, 1900343, doi:10.1002/adem.201900343.
- [71] Arif, Z.U.; Khalid, M.Y.; ur Rehman, E.; Ullah, S.; Atif, M.; Tariq, A. A Review on Laser Cladding of High-Entropy Alloys, Their Recent Trends and Potential Applications. *Journal of Manufacturing Processes* 2021, 68, 225–273, doi:10.1016/j.jmapro.2021.06.041.
- [72] Duchaniya, R.K.; Pandel, U.; Rao, P. Coatings Based on High Entropy Alloys: An Overview. *Materials Today: Proceedings* 2021, 44, 4467–4473, doi:10.1016/j.matpr.2020.10.720.
- [73] Sharma, A. High Entropy Alloy Coatings and Technology. *Coatings* 2021, 11, 372, doi:10.3390/coatings11040372.
- [74] Meghwal, A.; Anupam, A.; Murty, B.S.; Berndt, C.C.; Kottada, R.S.; Ang, A.S.M. Thermal Spray High-Entropy Alloy Coatings: A Review. *J Therm Spray Tech* 2020, 29, 857–893, doi:10.1007/s11666-020-01047-0.
- [75] Liao, W.-B.; Zhang, H.; Liu, Z.-Y.; Li, P.-F.; Huang, J.-J.; Yu, C.-Y.; Lu, Y. High Strength and Deformation Mechanisms of Al_{0.3}CoCrFeNi High-Entropy Alloy Thin Films Fabricated by Magnetron Sputtering. *Entropy* 2019, 21, 146, doi:10.3390/e21020146.
- [76] Liao, W.; Lan, S.; Gao, L.; Zhang, H.; Xu, S.; Song, J.; Wang, X.; Lu, Y. Nanocrystalline High-Entropy Alloy (CoCrFeNiAl_{0.3}) Thin-Film Coating by Magnetron Sputtering. *Thin Solid Films* 2017, 638, 383–388, doi:10.1016/j.tsf.2017.08.006.
- [77] Braic, M.; Braic, V.; Vladescu, A.; N. Zoita, C.; Balaceanu, M. Solid Solution or Amorphous Phase Formation in TiZr-Based Ternary to Quinary Multi-Principal-Element Films. *Progress in Natural Science: Materials International* 2014, 24, 305–312, doi:10.1016/j.pnsc.2014.06.001.
- [78] Shen, W.-J.; Tsai, M.-H.; Yeh, J.-W. Machining Performance of Sputter-Deposited (Al_{0.34}Cr_{0.22}Nb_{0.11}Si_{0.11}Ti_{0.22})₅₀N₅₀ High-Entropy Nitride Coatings. *Coatings* 2015, 5, 312–325, doi:10.3390/coatings5030312.
- [79] An, Z.; Jia, H.; Wu, Y.; Rack, P.D.; Patchen, A.D.; Liu, Y.; Ren, Y.; Li, N.; Liaw, P.K. Solid-Solution CrCoCuFeNi High-Entropy Alloy Thin Films Synthesized by Sputter Deposition. *Materials Research Letters* 2015, 3, 203–209, doi:10.1080/21663831.2015.1048904.
- [80] Jiang, Y.Q.; Li, J.; Juan, Y.F.; Lu, Z.J.; Jia, W.L. Evolution in Microstructure and Corrosion Behavior of AlCoCr_xFeNi High-Entropy Alloy Coatings Fabricated by Laser Cladding. *Journal of Alloys and Compounds* 2019, 775, 1–14, doi:10.1016/j.jallcom.2018.10.091.
- [81] Liu, J.; Liu, H.; Chen, P.; Hao, J. Microstructural Characterization and Corrosion Behaviour of AlCoCrFeNiTi_x High-Entropy Alloy Coatings Fabricated by Laser Cladding. *Surface and Coatings Technology* 2019, 361, 63–74, doi:10.1016/j.surfcoat.2019.01.044.
- [82] Ji, X.; Duan, H.; Zhang, H.; Ma, J. Slurry Erosion Resistance of Laser Clad NiCoCrFeAl₃ High-Entropy Alloy Coatings. *Tribology Transactions* 2015, 58, 1119–1123, doi:10.1080/10402004.2015.1044148.
- [83] Zhang, H.; Wu, W.; He, Y.; Li, M.; Guo, S. Formation of Core–Shell Structure in High Entropy Alloy Coating by Laser Cladding. *Applied Surface Science* 2016, 363, 543–547, doi:10.1016/j.apsusc.2015.12.059.
- [84] Fereidouni, M.; Sarkari Khorrami, M.; Heydarzadeh Sohi, M. Liquid Phase Cladding of Al_xCoCrFeNi High Entropy Alloys on AISI 304L Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology* 2020, 402, 126331, doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126331.
- [85] Huo, W.; Shi, H.; Ren, X.; Zhang, J. Microstructure and Wear Behavior of CoCrFeMnNbNi High-Entropy Alloy Coating by TIG Cladding. *Advances in Materials Science and Engineering* 2015, 2015, 1–5, doi:10.1155/2015/647351.
- [86] Shang, C.; Axinte, E.; Sun, J.; Li, X.; Li, P.; Du, J.; Qiao, P.; Wang, Y. CoCrFeNi(W_{1-x}Mox) High-Entropy Alloy Coatings with Excellent Mechanical Properties and Corrosion Resistance Prepared by Mechanical Alloying and Hot Pressing Sintering. *Materials & Design* 2017, 117, 193–202, doi:10.1016/j.matdes.2016.12.076.

- [87] Tang, Y.; Wang, S.; Sun, B.; Wang, Y.; Qiao, Y. FABRICATION AND WEAR BEHAVIOR ANALYSIS ON AlCrFeNi HIGH ENTROPY ALLOY COATING UNDER DRY SLIDING AND OIL LUBRICATION TEST CONDITIONS. *Surf. Rev. Lett.* 2016, 23, 1650018, doi:10.1142/S0218625X16500189.
- [88] Scutelnicu, E.; Simion, G.; Mircea, O.; Rusu, C.C.; Mistodie, L.R.; Gheonea, M.C.; Geanta, V.; Voiculescu, I. Procedeu de Realizare a Unei Depuneri Din Aliaj Multielement Tip AlCrFeNi Prin Topire Cu Arc Electric in Mediu de Gaz Protector Inert 2024.
- [89] Ren, M.; Wang, G.; Li, B. Microstructure and Properties of AlCrFeNi Intermetallic for Electronic Packaging Shell. In *Proceedings of the 2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*; IEEE: Harbin, August 2017; pp. 817–820.
- [90] Yuan, J.; Yang, Y.; Duan, S.; Dong, Y.; Li, C.; Zhang, Z. Rapid Design, Microstructures, and Properties of Low-Cost Co-Free Al-Cr-Fe-Ni Eutectic Medium Entropy Alloys. *Materials* 2022, 16, 56, doi:10.3390/ma16010056.
- [91] Silwal, B.; Walker, J.; West, D. Hot-Wire GTAW Cladding: Inconel 625 on 347 Stainless Steel. *Int J Adv Manuf Technol* 2019, 102, 3839–3848, doi:10.1007/s00170-019-03448-0.
- [92] Xu, G.; Kutsuna, M.; Liu, Z.; Yamada, K. Comparison between Diode Laser and TIG Cladding of Co-Based Alloys on the SUS403 Stainless Steel. *Surface and Coatings Technology* 2006, 201, 1138–1144, doi:10.1016/j.surfcoat.2006.01.040.
- [93] Shang, C.Y.; Wang, Y. AlCrFeNi High-Entropy Coating Fabricated by Mechanical Alloying and Hot Pressing Sintering. *MSF* 2017, 898, 628–637, doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.898.628.
- [94] Jumaev, E.; Abbas, M.A.; Mun, S.C.; Song, G.; Hong, S.-J.; Kim, K.B. Nano-Scale Structural Evolution of Quaternary AlCrFeNi Based High Entropy Alloys by the Addition of Specific Minor Elements and Its Effect on Mechanical Characteristics. *Journal of Alloys and Compounds* 2021, 868, 159217, doi:10.1016/j.jallcom.2021.159217.
- [95] Dong, T.; Zheng, X.; Li, G.; Wang, H.; Liu, M.; Zhou, X.; Li, Y. Effect of Tungsten Inert Gas Remelting on Microstructure, Interface, and Wear Resistance of Fe-Based Coating. *Journal of Engineering Materials and Technology* 2018, 140, 041007, doi:10.1115/1.4040005.
- [96] Zhu, L.; Cui, Y.; Cao, J.; Tian, R.; Cai, Y.; Xu, C.; Han, J.; Tian, Y. Effect of TIG Remelting on Microstructure, Corrosion and Wear Resistance of Coating on Surface of 4Cr5MoSiV1 (AISI H13). *Surface and Coatings Technology* 2021, 405, 126547, doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126547.
- [97] Tian, H.L.; Wei, S.C.; Chen, Y.X.; Tong, H.; Liu, Y.; Xu, B.S. Microstructure and Wear Resistance of an Arc-Sprayed Fe-Based Coating After Surface Remelting Treatment. *Strength Mater* 2014, 46, 229–234, doi:10.1007/s11223-014-9540-z.
- [98] Ji, M.; Huang, L.; An, Q.; Bao, Y.; Cui, X.; Jiao, Y.; Geng, L. Microstructure Refinement and Strengthening Mechanisms of Network Structured TiBw/Ti6Al4V Composites by TIG Remelting. *Materials Science and Engineering: A* 2021, 804, 140755, doi:10.1016/j.msea.2021.140755.
- [99] Chişiu, G.; Gheţa, R.-A.; Stoica, A.-M.; Stoica, N.-A. Comparative Micro-Scale Abrasive Wear Testing of Thermally Sprayed and Hard Chromium Coatings. *Lubricants* 2023, 11, 350, doi:10.3390/lubricants11080350.
- [100] Silva, F.J.G.; Martinho, R.P.; Baptista, A.P.M. Characterization of Laboratory and Industrial CrN/CrCN/Diamond-like Carbon Coatings. *Thin Solid Films* 2014, 550, 278–284, doi:10.1016/j.tsf.2013.11.042.
- [101] Cozza, R.C. A Study on Friction Coefficient and Wear Coefficient of Coated Systems Submitted to Micro-Scale Abrasion Tests. *Surface and Coatings Technology* 2013, 215, 224–233, doi:10.1016/j.surfcoat.2012.06.088.
- [102] Sadiq, K.; Sim, M.; Black, R.; Stack, M. Mapping the Micro-Abrasion Mechanisms of CoCrMo: Some Thoughts on Varying Ceramic Counterface Diameter on Transition Boundaries In Vitro. *Lubricants* 2020, 8, 71, doi:10.3390/lubricants8070071.
- [103] Resendiz-Calderon, C.D.; Cázares-Ramírez, I.; Samperio-Galicia, D.L.; Farfan-Cabrera, L.I. Method for Conducting Micro-Abrasion Wear Testing of Materials in Oscillating Sliding. *MethodsX* 2022, 9, 101703, doi:10.1016/j.mex.2022.101703.

- [104] Thakare, M.R.; Wharton, J.A.; Wood, R.J.K.; Menger, C. Effect of Abrasive Particle Size and the Influence of Microstructure on the Wear Mechanisms in Wear-Resistant Materials. *Wear* 2012, 276–277, 16–28, doi:10.1016/j.wear.2011.11.008.
- [105] Navas, C.; Colaço, R.; De Damborenea, J.; Vilar, R. Abrasive Wear Behaviour of Laser Clad and Flame Sprayed-Melted NiCrBSi Coatings. *Surface and Coatings Technology* 2006, 200, 6854–6862, doi:10.1016/j.surfcoat.2005.10.032.
- [106] Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.; ASTM G102-89(2010); West Conshohocken, PA, USA, 1999.
- [107] Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) on Coated and Uncoated Metallic Specimens.; ISO 16773-1-4:2016; Geneva, Switzerland, 2016.
- [108] Simion, G.; Bertapelle, M.; Mirza-Rosca, J.; Voiculescu, I.; Scutelnicu, E. The Influence of the Re-Melting on the Microstructure and Corrosion Resistance of New Welding Material. *Microscopy and Microanalysis* 2024, 30, ozae044.670, doi:10.1093/mam/ozae044.670.
- [109] Stern, M.; Geaby, A.L. Electrochemical Polarization. *J. Electrochem. Soc.* 1957, 104, 56, doi:10.1149/1.2428496.
- [110] Jones, D.A. Principles and Prevention of Corrosion; 2. int. ed.; Pearson Education: Harlow, 2014; ISBN 978-1-292-04255-8.
- [111] Xu, Y.; Zhou, Q.; Liu, L.; Zhang, Q.; Song, S.; Huang, Y. Exploring the Corrosion Performances of Carbon Steel in Flowing Natural Sea Water and Synthetic Sea Waters. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 2020, 55, 579–588, doi:10.1080/1478422X.2020.1765476.
- [112] Onyeji, L.; Kale, G. Preliminary Investigation of the Corrosion Behavior of Proprietary Micro-Alloyed Steels in Aerated and Deaerated Brine Solutions. *J. of Materi Eng and Perform* 2017, 26, 5741–5752, doi:10.1007/s11665-017-3031-x.
- [113] Saeed, A. Low Activation-Modified High Manganese-Nitrogen Austenitic Stainless Steel for Fast Reactor Pressure Vessel Cladding. *NS* 2018, 3, 45, doi:10.11648/j.ns.20180303.14.
- [114] Nadliriyah, N.; Putri, A.L.; Triwikantoro, T. PANi/ZrO₂ -Composite Coating for Corrosion Protection in 3.5 M NaCl Solution. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019, 496, 012059, doi:10.1088/1757-899X/496/1/012059.
- [115] Moradi, M.; Ghoreishi, M.; Rahmani, A. Numerical and Experimental Study of Geometrical Dimensions on Laser-TIG Hybrid Welding of Stainless Steel 1.4418. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 2016, 5, 21–31.
- [116] Ullah, R.; Lian, J.; Akmal, J.; Wu, J.; Niemi, E. Prediction and Validation of Melt Pool Dimensions and Geometric Distortions of Additively Manufactured AlSi10Mg. *Int J Adv Manuf Technol* 2023, 126, 3593–3613, doi:10.1007/s00170-023-11264-w.
- [117] Suman, S.; Biswas, P. Microstructural, Strength and Residual Stress Studies on Single- and Double-Side Single-Pass Submerged Arc Welding of 9Cr–1Mo–V Steel Plate. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 2022, 103, 1177–1191, doi:10.1007/s40032-022-00870-4.
- [118] Ahmad, A.S.; Wu, Y.; Gong, H.; Liu, L. Numerical Simulation of Thermal and Residual Stress Field Induced by Three-Pass TIG Welding of Al 2219 Considering the Effect of Interpass Cooling. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2020, 21, 1501–1518, doi:10.1007/s12541-020-00357-1.
- [119] Farias, R.M.; Teixeira, P.R.F.; Araújo, D.B. Thermo-Mechanical Analysis of the MIG/MAG Multi-Pass Welding Process on AISI 304L Stainless Steel Plates. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2017, 39, 1245–1258, doi:10.1007/s40430-016-0574-y.
- [120] Reda, R.; Magdy, M.; Rady, M. Ti–6Al–4V TIG Weld Analysis Using FEM Simulation and Experimental Characterization. *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng* 2020, 44, 765–782, doi:10.1007/s40997-019-00287-y.

ACTIVITATEA ȘTIINȚIFICĂ

Articole publicate în reviste și volume indexate Web of Scenice (Clarivate): 5

- [1] Chaturvedi M., Subbiah A.V., **Simion G.**, Rusu C.C., Scutelnicu E., *Critical Review on Magnetically Impelled Arc Butt Welding: Challenges, Perspectives and Industrial Applications*, Materials **2023**, Vol. 16, 7054. <https://doi.org/10.3390/ma16217054>, FI(2023)=3.1, **revistă zona roșie, WOS: 001099516300001**.
- [2] Voiculescu, I.; Geanta, V.; Stefanescu, E.V.; **Simion, G.**; Scutelnicu, E. *Effect of Diffusion on Dissimilar Welded Joint between Al0.8CoCrFeNi High-Entropy Alloy and S235JR Structural Steel*. Metals **2022**, Vol. 12, 548, doi:10.3390/met12040548, FI(2022)=2.9, **revistă zona galbenă, WOS:000786074200001**.
- [3] Mitru, A.; Semenescu, A.; **Simion, G.**; Scutelnicu, E.; Voiculescu, I. *Study on the Weldability of Copper—304L Stainless Steel Dissimilar Joint Performed by Robotic Gas Tungsten Arc Welding*. Materials **2022**, Vol. 15, 5535, doi:10.3390/ma15165535, FI(2022)=3,4, **revistă zona galbenă, WOS:000845640800001**.
- [4] **Simion G.**, Birsan D., Voiculescu I., Scutelnicu E., *Simulation by FEM of TIG deposition welding of multicomponent alloy on carbon steel substrate*, The 5th International Conference Modern Technologies in Manufacturing - MTeM 2023, Cluj-Napoca, 18-21 oct. 2023, <https://easychair.org/cfp/MTeM2023>, în curs de indexare în WoS.
- [5] **Simion G.**, Bertapelle M., Mirza-Rosca J., Voiculescu I., Scutelnicu E., *The Influence of the Re-Melting on the Microstructure and Corrosion Resistance of New Welding Material*, Microscopy and Microanalysis, Vol. 30, Suppl.(1), The Official M&M 2024 Proceedings, <https://doi.org/10.1093/mam/ozae044.670>, pag. 1363–1366, Cleveland, Ohio, USA, July 28 – August 1, 2024, în curs de indexare în WoS.

Articole publicate în reviste indexate BDI, în acord cu standardele CNATDCU – C16: 4

- [1] Georgescu B., **Simion G.**, *A Synthetic Approach to Cold Pressure Welding on Cogged Surfaces*, Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology (AWET), Vol. 34, Year XXXIV, **2023**, Elsevier-SCOPUS, pp. 57-64, DOI: 10.35219/awet.2023.06, **Elsevier-SCOPUS, ProQuest, DOAJ**.
- [2] Birsan, D.C.; **Simion, G.** *Numerical Modelling of Thermo-Mechanical Effects Developed in Resistance Spot Welding of E304 Steel with Copper Interlayer*, Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology (AWET), Vol. 33, Year XXXIII, **2022**, pp. 89-94, DOI:10.35219/awet.2022.07, **Elsevier-SCOPUS, ProQuest, DOAJ**.
- [3] Birsan, D.C.; **Simion, G.**; Voiculescu, I.; Scutelnicu, E., *Numerical Model Developed for Thermo-Mechanical Analysis in AlCrFeMnNiHf0.05–Armox 500 Steel Welded Joint*, Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XII Welding Equipment and Technology **2021**, Vol. 32, Year XXXII, pp. 37–46, doi:10.35219/awet.2021.05, **Elsevier-SCOPUS, ProQuest, DOAJ**.
- [4] Scutelnicu E., **Simion G.**, Rusu C. C., Gheonea M. C., Voiculescu I., Geanta V., *High Entropy Alloys Behaviour During Welding*, Revista de Chimie, 2020, Vol. 71, pag. 219-233, **Elsevier-SCOPUS**.

Articole publicate în reviste de specialitate recunoscute CNCSIS: 1

- [1] **Simion G.**, Rusu C. C., Scutelnicu E., Voiculescu I., Geantă V., *Stadiul actual al sudării aliajelor cu entropie ridicată (State of the Art of Welding High Entropy Alloys*, Revista SUDURA, Vol. 3, 2019, pag 5-15, ISSN: 1453 – 0384, <https://asr.ro/revista-sudura-nr-3-2019/>

Lucrări prezentate la conferințe internaționale: 8

- [1] **Simion G.**, Scutelnicu E., Mirza Rosca J., Voiculescu I., *New Medium Entropy Alloy Deposition Achieved by TIG Cladding*, 13th International Conference on Materials Science & Engineering – BRAMAT 2024, 13th – 16th March 2024, Brasov, poster.
- [2] **Simion G.**, Bertapelle M., Mirza-Rosca J., Voiculescu I., Scutelnicu E., *The Influence of the Re-Melting on the Microstructure and Corrosion Resistance of New Welding Material*, Microscopy and Microanalysis (M&M) 2024 Conference July 28 - August 1, 2024, Cleveland, USA, poster.
- [3] **Simion G.**, Birsan D., Voiculescu I., Scutelnicu E., *Simulation by FEM of TIG Deposition Welding of Multicomponent Alloy on Carbon Steel Substrate*, The 5th International Conference Modern Technologies in Manufacturing - MTeM 2023, 18-21 oct 2023, Cluj-Napoca, Romania, https://www.utcluj.ro/media/documents/2023/Final-Program-MTeM_2023_v3.pdf
- [4] **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C, Gheonea M.C., Birsan D.C., Voiculescu I., Scutelnicu E., *Numerical model developed for simulating multicomponent-alloy cladding on a steel substrate*, The 11th Edition of Scientific

- Conference of Doctoral Schools, *Perspectives and Challenges in Doctoral Research*, 8th-9th June 2023, Galați, Romania.
- [5] Mircea O., **Simion G.**, Gheonea M.C., *Caracterizarea îmbinărilor din cupru și aluminiu sudate prin presiune la rece*, Conferința Internațională SUDURA 2023, 27-28 apr. 2023, Galați, https://asr.ro/documents/manifestari_stiintifice/ASR-Program%20Conferinta%20Sudura%202023%20Galati%2C%2027-28.04.2023.pdf
- [6] **Simion G.**, Mircea O., Gheonea M.C., Bîrsan D.C., Rusu C.C., Scutelnicu E., *Simularea comportării termomecanice a depunerii unui aliaj multicomponent pe un substrat din oțel carbon*, Conferința Internațională SUDURA 2023, 27-28 apr 2023, Galați, Romania, https://asr.ro/documents/manifestari_stiintifice/ASR-Program%20Conferinta%20Sudura%202023%20Galati%2C%2027-28.04.2023.pdf
- [7] **Simion. G.**, Scutelnicu E., *Overview on high entropy alloys: Characterisation and applicability*, The 9th Edition Scientific Conference of Doctoral Schools, *Perspectives and Challenges in Doctoral Research*, 10th-11th June 2021, Galați, Romania.
- [8] **Simion G.**, Scutelnicu E., *High Entropy Alloy Cladding – a short Review*, 1st International Conference on Advanced Research in Engineering CARE 2020, Școala Doctorală "Acad. Radu Voinea", 30 Oct. 2020, Craiova, Romania.

Lucrări prezentate la alte evenimente științifice naționale: 7

- [1] **Simion. G.**, *Sisteme de protecție individuală și colectivă pe bază de aliaje cu entropie ridicată*, Conferința TECH-TALK(ING) *Smart Industry. Smart Technology. Smart People*, Prima Ediție, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 15 Decembrie, 2020, Galați, Romania.
- [2] **Simion G.**, Rusu C. C., Gheonea M. C., Voiculescu I., Geanta V., Scutelnicu E., *Proiectarea morfo-funcțională a sistemelor de protecție pentru domeniul militar*, Conferința ASR "SUDURA 2020", Educație, cercetare și inovare în domeniul sudării, 20–22 Oct. 2020, Ploiești, Romania.
- [3] **Simion G.**, *Studiul configurației blindajelor militare realizate din aliaje cu entropie ridicată*, Sesiunea Națională de Comunicări Științifice Studentești "ANGHEL SALIGNY", ediția a XII-a, 2020, Secțiunea nr. 6: *Masterandul de Azi – Cercetătorul de Mâine*, Galați, Romania.
- [4] **Simion G.**, Scutelnicu E., *Caracterizarea aliajelor cu entropie ridicată utilizate la sistemele de protecție individuală și colectivă*, Workshop "Tendențe actuale și perspective în dezvoltarea proceselor de sudare", organizat de Centrul de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV) în colaborare cu Asociația de Sudură din România - Sucursala Galați (ASR) și LINDE GAZ România, 23 Mai 2019, Galați, Romania.
- [5] **Simion G.**, Scutelnicu E., *Tehnici de sudare și brazare pentru îmbinarea aliajelor cu entropie ridicată*, Workshop "Tendențe actuale și perspective în dezvoltarea proceselor de sudare" organizat de Centrul de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV) în colaborare cu Asociația de Sudură din România - Sucursala Galați (ASR) și LINDE GAZ România, 23 Mai 2019, Galați, Romania.
- [6] **Simion G.**, *Stadiul actual al sudării și brazării aliajelor cu entropie ridicată*, Sesiunea Națională de Comunicări Științifice Studentești "ANGHEL SALIGNY", ediția a XI-a 2019, Secțiunea nr. 7: *Masterandul de Azi – Cercetătorul de Mâine*, Galați, Romania.
- [7] **Simion G.**, *Studiul încălzirii la sudarea cap la cap prin presiune în stare solidă*, în Sesiunea Națională de Comunicări Științifice Studentești "ANGHEL SALIGNY", 17-18 mai 2018 Galați, Romania.

Brevete acordate: 1

- [1] Scutelnicu E., **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Mistodie L.R., Gheonea M.C., Geanta V, Voiculescu I., *Procedeu de realizare a unei depuneri din aliaj multi-element tip AlCrFeNi prin topire cu arc electric in mediu de gaz protector inert*, Brevet de invenție nr . 135988/29.03.2024.

Cărți publicate: 1

- [1] Rusu C.C., **Simion G.**, Scutelnicu E., *Caracterizarea îmbinărilor sudate* *Lucrări aplicative*, Editura Zigotto, Galați, 2022, ISBN 978-606-669-208-3, 120 pag.

Proiecte de cercetare: 2

- [1] Proiect complex **PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0875**, *Sisteme de protecție individuală și colectivă pentru domeniul militar pe bază de aliaje cu entropie ridicată – HEAPROTECT*, Contract: 20PCCDI / 2018, Autoritatea contractantă: Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și Inovării (UEFISCDI), perioadă implementare 2018 – 2021, membru în echipa proiectului (asistent de cercetare).

- [2] Grant cercetare *Sudarea subacvatică a subansamblurilor de aluminiu pentru industria navală și off-shore (AQUA-WELD)*, contract de finanțare nr: RF 2472/31.05.2024 câștigat prin competiție instituțională, membru în echipa proiectului (asistent de cercetare).

Proiecte finanțate de UE: 1

- [1] *STEM for Youngsters*, proiect Erasmus+ - STEM Education for Primary Schools, contract de finanțare nr. 2021-1-EL01-KA220-SCH-000023967, perioada de implementare 2022-2024, membru în echipa proiectului (formator)

Premii: 10

- [1] **Medalia de aur INVENTICA 2024** pentru Brevetul nr. 135988/29.03.2024, *Procedeu de realizare a unei depuneri din aliaj multi-element tip AlCrFeNi prin topire cu arc electric în mediu de gaz protector inert*, autori: Scutelnicu E., **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Mistodie L.R., Gheonea M.C., Geantă V., Voiculescu I., Expoziția Internațională de Invenții INVENTICA 2024, Iași, 03-05.07.2024, ediția a XXVIII.
- [2] **Premiul Special al Universității Tehnice din Cluj-Napoca** pentru Brevetul nr. 135988/29.03.2024, *Procedeu de realizare a unei depuneri din aliaj multi-element tip AlCrFeNi prin topire cu arc electric în mediu de gaz protector inert*, autori: Scutelnicu E., **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Mistodie L.R., Gheonea M.C., Geantă V., Voiculescu I., Expoziția Internațională de Invenții INVENTICA 2024, Iași, 03-05.07.2024, ediția a XXVIII.
- [3] **Premiul Special al Universității Politehnica Timișoara** pentru brevetul nr. 135988/29.03.2024, *Procedeu de realizare a unei depuneri din aliaj multi-element tip AlCrFeNi prin topire cu arc electric în mediu de gaz protector inert*, autori: Scutelnicu E., **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Mistodie L.R., Gheonea M.C., Geantă V., Voiculescu I., Expoziția Internațională de Invenții INVENTICA 2024, Iași, 03-05.07.2024, ediția a XXVIII.
- [4] **Premiul pentru cea mai bună lucrare din secțiunea *Advanced Manufacturing Technologies***, autori: **Simion G.**, Birsan D., Voiculescu I., Scutelnicu E., *Simulation by FEM of TIG deposition welding of multicomponent alloy on carbon steel substrate*, The 5th International Conference - MTeM 2023, Cluj-Napoca, 18-21 oct 2023.
- [5] **Marele Premiu acordat de Forumul Inventatorilor din România**, pentru cererea de brevet no. A100210/21.04.2022, *Procedure for obtaining deposition of AlCrFeNi multi-element alloy by fusion with electric arc and inert shielding gas*, autori: Scutelnicu E., **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Mistodie L.R., Gheonea M.C., Geantă V., Voiculescu I., Salonul de Inovare și Cercetare UGAL INVENT 2023, Galați.
- [6] **Medalia de Aur și Trofeul UGAL INVENT 2023** pentru cererea de brevet no. A100210/21.04.2022, *Procedure for obtaining deposition of AlCrFeNi multi-element alloy by fusion with electric arc and inert shielding gas*, autori: Scutelnicu E., **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Mistodie L.R., Gheonea M.C., Geantă V., Voiculescu I., Salonul de Inovare și Cercetare UGAL INVENT 2023, Galați.
- [7] **GOLD MEDAL** pentru cererea de brevet no. A100210/21.04.2022, *Procedure for Obtaining Multi-element Alloys from the AlCrFeNi System*, autori: Scutelnicu E., **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Mistodie L.R., Gheonea M.C., Geantă V., Voiculescu I., European Exhibition of Creativity and Innovation - EUROINVENT 2023, Iași.
- [8] **Premiul I** pentru lucrarea *Numerical model developed for simulating multicomponent-alloy cladding on a steel substrate*, autori: **Simion G.**, Mircea O., Rusu C.C., Gheonea M.C., Birsan D.C., Voiculescu I., Scutelnicu E., The 11th Edition of Scientific Conference of Doctoral Schools, 8th-9th of June 2023 Galați.
- [9] **Mențiune** pentru lucrarea *Overview on high entropy alloys: Characterisation and applicability*, autori: **Simion G.**, Scutelnicu E., The 9th Edition of Scientific Conference of Doctoral Schools, Galați, 10th-11th June 2021.
- [10] **Mențiune** pentru lucrarea **Simion G.**, *Stadiul actual al sudării și brazării aliajelor cu entropie ridicată*, Sesiunea Națională de Comunicări Științifice Studentești "ANGHEL SALIGNY", ediția a XI-a 2019, Secțiunea nr. 7: *Masterandul de Azi – Cercetătorul de Mâine*.

Referate susținute în perioada de pregătire doctorală: 3

- [1] **Simion G.**, *Stadiul actual al studiilor privind straturile depuse prin sudare cu aliaje multicomponent*, 2021.
- [2] **Simion G.**, *Investigații asupra proprietăților straturilor depuse prin sudare cu aliaje multicomponent*, 2022.
- [3] **Simion G.**, *Modelarea cu elemente finite a nivelului de tensiuni și deformații din straturile depuse cu aliaje multicomponent*, 2023