

**UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ DIN BUCUREȘTI  
FACULTATEA ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR**



**Autoare: Ing. LAZĂR (NATRA) CLAUDIA ALINA**

**REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT**

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND  
COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA  
COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BRAZATE  
PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA  
AUTOMOBILELOR**

**Conducător de doctorat: Prof. habil. dr. ing. Brândușa GHIBAN**

**București 2022**

## MULȚUMIRI

În primul rând, doresc să îi mulțumesc conducătorului științific, doamnei Prof. univ.dr.ing. **Brândușa GHIBAN**, pentru îndrumarea, sprijinul și ajutorul acordate pe parcursul întregii perioade de cercetare, cât și finalizarea cu succes a întregii teze de doctorat. De asemenea, îi mulțumesc pentru buna dispoziție și sinceritatea cu care m-a călăuzit pe acest drum.

Alese multumiri îi adresez domnului Prof.univ.dr.ing. **Cristian PREDESCU**, din cadrul facultății Știința și Ingineria Materialelor, de la departamentul Procesarea Materialelor și Ecometalurgie, care mi-a fost mentor pe parcursul anilor de studiu și mi-a îndrumat pașii spre actuala carieră profesională.

În al doilea rând, îi mulțumesc conducerii Societății ALRO S.A. Slatina, în mod deosebit domnului director general dr.ing. **Gheorghe DOBRA** pentru încrederea și susținerea primite pe parcursul elaborării acestei teze, pentru posibilitatea deosebită de a realiza și finaliza cercetările experimentale. De asemenea, doresc să-i mulțumesc doamnei ing. **Luxandra MARIN**, șef laborator Încercări Fizico-Mecanice, de la ALRO S.A. Slatina, pentru ajutorul neprecupețit în realizarea și interpretarea rezultatelor privind analiza statistică complexă.

Gândurile mele sunt îndreptate spre doamna Prof.dr.ing. **Ioana CSAKI**, un om ales, care mi-a îndreptat pașii spre realizarea acestei teze de doctorat.

Adresez, de asemenea, respectuoase mulțumiri doamnei Prof.univ.dr.ing. **Ionelia VOICULESCU**, de la Facultatea de Inginerie industrială și Robotică, din cadrul Universității Politehnica din București, pentru sprijinul necondiționat acordat în investigarea structurală la microscopul electronic cu baleiaj și pentru ajutorul acordat în interpretarea analizelor structurale.

Mulțumesc colectivului Departamentului de Știința Materialelor Metalice, Metalurgie Fizică - UPB, domnilor profesori **Florin MICULESCU**, **Dan GHEORGHE**, **Mihai BRÂNZEI**, **Marian MICULESCU**, pentru buna colaborare și expertiza în investigarea materialelor metalice pe bază de aluminiu.

Distinșilor profesor referenți științifici le mulțumesc pentru bunăvoința de a fi acceptat această muncă și pentru aprecierile făcute tezei de doctorat.

Și, nu în ultimul rând, dragi mulțumiri familiei mele minunate, a soțului și a copilului, precum și a părinților, pentru susținerea, încrederea și motivația oferite și, de asemenea, pentru timpul acordat.

## CUPRINS

<b>INTRODUCERE</b>	6
<b>CAPITOLUL 1- STADIUL ACTUAL AL DEZVOLTĂRII ALIAJELOR DE ALUMINIU PENTRU INDUSTRIA AUTOMOBILELOR</b>	9
1.1 Stadiul actual al dezvoltării aliajelor de aluminiu pentru industria automobilelor	9
1.1.1 Preambul	9
1.1.2 Aluminiul și aliajele sale în industria de automobile	10
1.1.3 Aliajele din aluminiu pentru aplicațiile caroseriei brute (body-in-white-BIW)	11
1.1.4 Aliajele din aluminiu aplicații tip table brazate	17
1.1.5 Tendința viitoare a materialelor ușoare în industria automobilelor /observații finale	22
1.2 Considerații asupra brazării aliajelor de aluminiu	23
1.2.1 Procese de brazare	25
1.2.2 Proprietățile îmbinărilor brazate	27
1.2.3 Exemple de aplicații: Schimbătoare de căldură pentru automobile	31
1.3 Comportarea la coroziune a schimbătoarelor de căldură din aliaje de aluminiu brazat	33
<b>CAPITOLUL 2 - MATERIALUL ȘI METODICA DE CERCETARE</b>	38
2.1 Obținerea materialelor placate	38
2.2 Pregătirea epruvetelor experimentale	40
<b>CAPITOLUL 3 - STUDII SI CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND EVOLUTIA CARACTERISTICILOR MECANICE PENTRU PRODUSELE DIN ALIAJ DE ALUMINIU 3003 PLACAT IN FUNCTIE DE CARACTERISTICILE DE FABRICATIE</b>	36
3.1 Preambul	45
3.2 Analiza statistică privind produsele realizate din aliaj de aluminiu 3003 placat în funcție de grosime, aliajul de placare, procentul de placare	47
3.3. Evoluția caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu 3003 placat în diferite stări structurale	51
<b>CAPITOLUL 4 -CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND OPTIMIZAREA TRATAMENTELOR TERMICE APLICATE PRODUSELOR PLACATE DIN ALIAJ TIP 3003</b>	81

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA  
COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BRAZATE PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA  
AUTOMOBILELOR**

4.1 Preambul	81
4.2 Cercetări experimentale privind posibilităților de micșorare a temperaturii tratamentului termic intermediar, în vederea scăderii consumurilor specifice	82
4.3 Cercetări experimentale privind posibilitățile de îmbunătățire a indicatorilor de performanță a cuptoarelor de tratament termic	91
<b>CAPITOLUL 5 -CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND CARACTERIZAREA STRUCTURALĂ A TABLELOR DIN ALIAJ DE ALUMINIU TIP 3003 PLACAT CU ALIAJE DIN SERIA 4xxx</b>	97
5.1 Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4045	98
5.2 Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4343	111
5.3 Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4343 pe o parte și aliaj 7072 pe cealaltă parte	119
5.4 Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4004	121
<b>CAPITOLUL 6 -COMPORTAREA LA COROZIUNE A TABLELOR DIN ALIAJ DE ALUMINIU TIP 3003 BRAZAT CU ALIAJE DIN SERIA 4XXX</b>	129
6.1 Cercetări preliminare	129
6.2.Cercetări privind determinarea potențialelor de coroziune a aliajului tip 3003 placat cu aliaje din seria 4xxx, în diferite stări ale suprafeței tablelor	135
6.3 Studiu de caz privind investigarea structurală a aripioarelor unui radiator	145
<b>CAPITOLUL 7 - CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII ȘI PRESPECTIVE ALE CERCETĂRILOR VIITOARE</b>	157
6.1 Concluzii	157
6.2 Contribuții originale	161
6.3 Direcții și perspective ale cercetărilor viitoare	162
<b>LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE</b>	163
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	164

## INTRODUCERE

Progresul înregistrat în dezvoltarea umanității s-a bazat întodeauna pe descoperirile spectaculoase în domeniul materialelor și ale performanțele acestora, fiecare etapă a acestora fiind marcată de un salt important în domeniul materialelor, în general, al materialelor metalice, în special. În industria automobilelor, competiția materialelor este permanent intensă, satisfacerea cerințelor pentru îmbunătățirea siguranței pasagerilor fiind în balans cu preocupările legate de încălzirea globală, respectiv reducerea emisiilor evacuate de vehicule. Un material în permanentă atenție este aluminiul și aliajele sale. Utilizarea aluminiului în aplicațiile auto a crescut cu peste 80% în ultimii 5 ani. Automobilele moderne de înaltă performanță utilizează schimbătoare de căldură din aliaje de aluminiu, a căror cotă de piață a crescut uluitor, tabla brazată fiind punctul principal în cadrul produselor de nișă. Cercetările ultimului deceniu s-au axat în principal de dezvoltarea așa-numitelor aliaje "long-life", în vederea creșterii fiabilității acestor componente.

Privind din prisma acestor aspecte, respectiv aliajele de aluminiu și posibilități de explorare a proprietăților acestora, prezenta teză de doctorat se înscrie în preocupările actuale.

Obiectivele generale ale tezei de doctorat constau în următoarele aspecte:

- Identificarea posibilităților de îmbunătățire a comportării mecanice și de rezistență la coroziune a tablelor placate din aliaj de aluminiu tip 3003, cu diferite aliaje din seria 4xxx prin optimizarea tratamentelor termice aplicate, respectiv:
- Analiza temporală, statistică a evoluției caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu tip 3003 placat cu aliaj 4xxx în funcție de caracteristicile de fabricație
- Identificarea principalelor caracteristici structurale ale tablelor din aliaj de aluminiu tip 3003, aflate în diferite stări structurale, placate cu diferite aliaje din seria 4xxx
- Determinarea comportării la coroziune a tablelor placate din aliaj de aluminiu tip 3003, cu diferite aliaje din seria 4xxx, respectiv:

În vederea îndeplinirii obiectivelor propuse au fost efectuate atât analize statistice, cât și investigații structurale pe epruvete provenind de la ALRO Slatina, table din aliaje de aluminiu tip 3003, aflate în diferite stări structurale, dimensiuni și tipuri de îmbinări prin brazare cu aliaj din seria 4xxx.

Teza cuprinde 6 capitole, după cum urmează:

Capitolul 1, intitulat "*Stadiul actual al cercetărilor în domeniul aliajelor de aluminiu pentru schimbătoare de căldură*" este destinat prezentării principalelor aspecte legate de dezvoltarea aliajelor de aluminiu din industria automobilelor. Sunt prezentate principalele aplicații ale aliajelor de aluminiu în domeniul auto, respectiv aplicații de caroserii auto, aplicații pentru panouri interioare sau exterioare, încheinduse cu aplicațiile tablelor brazate. Sunt prezentate tendințele viitoare a materialelor ușoare în industria automobilelor. Un subcapitol este destinat prezentării celor mai importante elemente de brazare a aliajelor de aluminiu, procese de brazare, proprietățile îmbinărilor brazate, încheindu-se cu exemple de aplicații de schimbătoare de căldură pentru automobile. Capitolul se încheie cu principalele elemente legate de comportarea la coroziune a schimbătoarelor de căldură.

Capitolul 2 este destinat prezentării materialelor și a procedurilor experimentale utilizate pe parcursul cercetărilor experimentale, încheinduse cu prezentarea programului experimental.

Capitolul 3 este intitulat "*Studii și cercetări experimentale privind evoluția caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu tip 3003 placat în funcție de caracteristicile de fabricație*". După prezentarea elementelor teoretice de pornire, este realizată o analiză statistică a produselor realizate din aliaj de aluminiu 3003 placat în funcție de grosime, aliajul de placare, procentul de placare, prezentând în final evoluția

caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu 3003 placat în diferite stări structurale, într-o prezentare tot printr-o analiză statistică complexă. Analiza statistică utilizată în controlul calității produselor a fost efectuată cu ajutorul a două tipuri de diagrame : o diagramă de control a variabilelor (X- Chart) și o diagramă de control a amplitudinilor (variațiilor dintre determinări) (R- Chart), fiind prezentate diagrame pentru rezistența la rupere, limita de curgere și alungirea corespunzătoare tablelor din aliaj tip 3003, în diferite stări structurale și grosimi de material. În final sunt folosiți indicii de capabilitate CPK și de performanță PPK, care permit o evaluare completă și sigură a caracterizării mecanice a performanțelor produselor placcate din aliaj 3003, din producția ALRO Slatina. Capitolul se încheie cu obținerea unei ecuații de regresie, care este valabilă pentru Si  $\in$  [0,07 0,60%], Fe  $\in$  [0,10 - 0,70%], Cu  $\in$  [0,05 - 0,75/0] Mn  $\in$  (0,18 1,5%).

Capitolul 4 se intitulează ”*Cercetări experimentale privind optimizarea tratamentelor termice aplicate produselor placcate din aliaj 3003*”. După prezentarea motivației care a determinat demararea acestor experimentări, sunt redate cercetările experimentale privind posibilităților de micșorare a temperaturii tratamentului termic intermediar, în vederea scăderii consumurilor specific. Experimentările în condiții de laborator au fost confirmate de testări în regim industrial, care au determinat obținerea unor valori ale caracteristicilor mecanice cu aproximativ 5MPa mai mari decât cele pentru care tratamentul termic s-a realizat în condiții de laborator. Pentru alungire valorile pentru care tratamentul termic s-a realizat industrial sunt mai mici cu aprox. 6%. Ultimul subcapitol este destinat cercetărilor experimentale privind posibilitățile de îmbunătățire a indicatorilor de performanță a cuptoarelor de tratament termic.

Capitolul 5 este intitulat ”*cercetări experimentale privind caracterizarea structurală a tablelor din aliaj de aluminiu tip 3003 placat cu aliaje din seria 4xxx*”. Analiza structurală complexă a permis identificarea modificărilor structurale ale produselor din aliaj de aluminiu 3003 (aflat în diferite stări), brazate cu diferite tipuri de aliaje de aluminiu din seria 4xxx, respectiv: determinarea mărimii de grăunte înainte și după simularea procesului de brazare, determinarea distribuției fazelor, determinarea grosimii stratului de placare și identificarea zonei „brown band”, adică elemente structurale cantitative și calitative care definesc această zonă. În final este realizată o analiză comparativă a valorilor mărimii de grăunte a tablelor din aliaj 3003 placat cu diferite aliaje din seria 4xxx, prin care se arată faptul că după simularea procesului de brazare la 600°C /10 minute în toate situațiile mărimea de grăunte a fost de până la 80μm (adică clasa 4.5 conform ASTM E112), iar prin creșterea duratei de menținere la 1 ora mărimea de grăunte se finisează, având valori peste 80μm (clasa 4 conform ASTM E112).

Capitolul 6 se intitulează ”*Comportarea la coroziune a tablelor din aliaj de aluminiu tip 3003 brazat cu aliaje din seria 4xxx*”. Cercetările preliminare cuprind investigații privind potențialele de coroziune ale diferitelor clase de aliaje de aluminiu, evidențiindu-se influența conținuturilor de cupru și zinc asupra valorilor de potențial de coroziune. Cercetări privind determinarea potențialelor de coroziune a aliajului tip 3003 placat cu aliaje din seria 4xxx, în diferite stări ale suprafeței tablelor au evidențiat modul de influență a valorilor de potențial funcție de starea de livrare, starea de curățare chimică a suprafeței sau de starea de postbrazare. În final este prezentat un studiu de caz privind investigarea structurală a aripioarelor unui radiator provenit de la un tractor scos din funcțiune după 6 ani.

### CAPITOLUL 3

## STUDII SI CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND EVOLUTIA CARACTERISTICILOR MECANICE PENTRU PRODUSELE DIN ALIAJ DE ALUMINIU 3003 PLACAT IN FUNCTIE DE CARACTERISTICILE DE FABRICATIE

### 3.2. Analiza statistică privind produsele realizate din aliaj de aluminiu 3003 placat în funcție de grosime, aliajul de placare, procentul de placare

Analiza privind produsele realizate din aliaj de aluminiu 3003 placat s-a realizat pentru perioada 01.11.2016 ÷ 31.10.2017. Datele pentru această analiza au fost extrase din aplicatia Centralizator. În figura 3.4 se reprezinta structura plachetelor realizate în funcție de grosimea acestora. Astfel cele mai multe plachete realizate (528) au avut grosimea de 48 mm și corespund unui procent de placare de 10%.

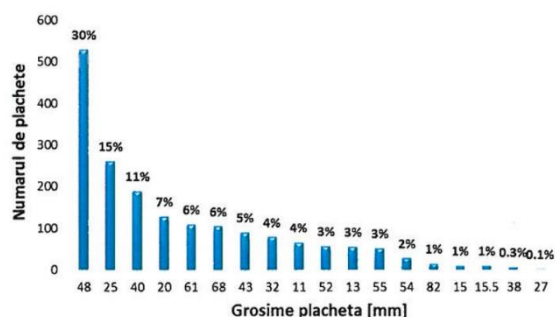


Fig. 3.4. Structura plachetelor realizate in perioada 01.11.2016 ÷ 31.10.2017 in functie de grosime

Distributia cantitatii predate de secția LTB în functie de tipul de aliaj pentru perioada analizată este reprezentată în fig. 3.5.

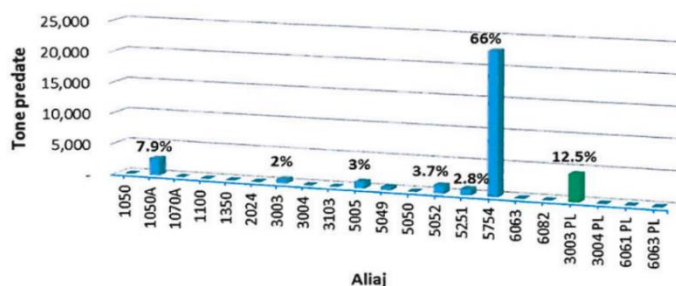


Figura 3.5. Structura cantitatii predate ia sectia LTB in functie de tipul de aliaj pentru perioada 01.11.2016 - 31.10.2017

Pentru perioada analizata (01.11.2016-31.10.2017), pentru fiecare produs placat predat s-a calculat în funcție de procentul de placare cantitatea reprezentată de aliajul de placare. Datele obtinute sunt prezentate în tabelul 3.4. Astfel pentru perioada analizata (01.11.2016 -31.10.2017) cele mai utilizate aliaje de placare pentru obtinerea de produse placate au fost aliajele 4004 (214 t - 39%) si 4045P1 (202 t - 37%).Grosimile cele mai solicitate in functie de cantitatea predata pentru produsele placate, aliaj de baza 3003, au fost: 0,8 mm; 2,5 mm; 0,6 mm; 1,5 mm.

### 3.3. Evoluția caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu 3003 placat în diferite stări structurale

În standardul european EN 485-2 [4] pentru produsele placate nu există valori impuse pentru caracteristicile mecanice (rezistența la rupere -  $R_m$ , limita la curgere -  $R_{p0.5}$  și alungirea -  $A_{50mm}$ ), de cele mai multe ori pentru aceste produse se solicita de către clienți încadrarea produselor placate în limitele valorilor impuse pentru aliajul 3003 specificate în standard. De remarcat faptul ca în standardul american ASTM

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA  
COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BRAZATE PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA  
AUTOMOBILELOR**

B209 [5] sunt specificate valori impuse pentru caracteristicile mecanice atât pentru aliajul 3003, cât și pentru aliajele placate (Tabel 3.6).

**Tabel 3.6. Caracteristicile mecanice pentru produsele din aliaj 3003 și 3003 PL, starea 0, standard EN vs. ASTM**

EN 485-2						ASTM B209											
3003, Starea 0						3003, Starea 0						Alclad 3003, Starea 0					
Grosime [mm]		Rm [MPa]	Rp [MPa]	A [%]		Grosime [mm]		Rm [MPa]	Rp [MPa]	A [%]		Grosime [mm]		Rm [MPa]	Rp [MPa]	A [%]	
0.2	0.5	95	135	35	15	0.15	0,2	96.5	131	34	5	0.15	0.2	90	124	31	4.5
0.5	1.5	95	135	35	17	0.2	0.3	96.5	131	34	5	0.2	0.3	90	124	31	4.5
1.5	3	95	135	35	20	0.3	0.8	96.5	131	34	5	0.3	0.8	90	124	31	4.5
3	6	95	135	35	23	0.8	1.3	96.5	131	34	5	0.8	1.3	90	124	31	4.5
6	12.5	95	135	35	24	1.3	6.3	96.5	131	34	5	1.3	6.3	90	124	31	4.5
12.5	50	95	135	35	23	6.35	76.2	96.5	131	34	5	6.35	12.7	90	124	31	4.5
												12.7	76.2	96.5	131	34	

Se observă diferențe minore ale cele două standarde între valorile impuse pentru Rm și Rp<sub>0,2</sub> pentru produsele din aliaj 3003, stare 0, în schimb pentru alungire valoarea minimă impusă în standardul EN este de 15%, iar în standardul ASTM de 5%.

Pentru produsele din aliaj 3003 PL valorile impuse pentru caracteristicile mecanice sunt mai mici (3 ÷ 7 MPa) decât cele pentru produsele din aliaj 3003.

Analiza statistică utilizată în controlul calității produselor a fost efectuată utilizând două tipuri de diagrame : o diagramă de control a variabilelor (X- Chart) și o diagramă de control a amplitudinilor (variațiilor dintre determinări) (R- Chart), fiind cel mai des utilizate în cadrul controlului statistic industrial. Diagrama de control a variabilelor este o reprezentare grafică a variației dintre mediile subgrupurilor, iar diagrama variațiilor dintre determinări, analizează variabilitatea în cadrul acestor subgrupuri. Variația în cadrul subgrupurilor este reprezentată de intervalul. Gama de valori pentru fiecare subgrup este reprezentat grafic pe axa Y a diagramei R. Linia centrală este media sau media intervalului. Limitele de control de pe grafice sunt date de următoarele formule:

Rezultatele analizei complete statistice sunt redată comparativ în tabelul 3.8.

**Tabelul 3.8. Rezumatul proprietăților mecanice (Rm, Rp<sub>0,2</sub>, A<sub>50</sub>) ale tablelor placate din aliaj 3003, în diferite stări și grosimi**

Valori	Stare O/ 0,5mm			Stare H14 / 0,5mm			Stare O/ 0,5mm			Stare O/ 2,5mm			Stare H14 / 0,5mm		
	Rm	Rp <sub>0,5</sub>	A <sub>50</sub>	Rm	Rp <sub>0,5</sub>	A <sub>50</sub>	Rm	Rp <sub>0,5</sub>	A <sub>50</sub>	Rm	Rp <sub>0,5</sub>	A <sub>50</sub>	Rm	Rp <sub>0,5</sub>	A <sub>50</sub>
Limita inferioară specificată (LSL)	95	34	15	145	125	2	95	35	17	95	35	20	145	125	3
Limita superioară specificată (USL)	130	-	-	185	-	-	135	-	-	135	-	-	185	-	-
Min	95	49	15	146	126	2,8	98	45	28	101	58	30,5	149	144	5
Max	121	80	49,5	173	164	12,5	130	84	49,5	112	72	50,5	174	163	10,5
Mean	107,97	58,04	32,72	159,34	147,62	7,04	108,16	58,18	41,68	105,95	63,29	45,57	159,93	152,5	6,73
Median	107	56,5	32,5	158	147	7,00	108	57	42,5	106	62	46	160	154	6,5
Mode	107	55,00	29	158,157	143	5,5	110	57	45	101	61	46	159	158	6,5
Stdev	4,53	6,28	5,36	6,84	8,91	1,97	5,03	6,77	4,22	2,98	4,33	3,79	6,96	5,59	1,47
Cpk	3,15	4,27	3,15	2,7	3,66	2,19	4,92	3,69	4,83	6,78	9,31	6,12	6,55	7,24	3,57
Ppk	0,95	1,28	1,10	0,7	0,85	0,85	0,87	1,14	1,95	1,23	2,18	2,25	0,71	1,64	0,84

Analiza detaliată a tuturor datelor referitoare la comportarea statistică a valorilor caracteristicilor mecanice ale tablelor din aliaj 3003 aflate în diferite stări de livrare (starea O și starea H14) și diferite grosimi de table (0.5mm/ 0.97mm/ 2.5mm) arată faptul că procesele considerate sunt stabile (în control) în sensul că toate valorile X și R din fișele de control se află în interiorul limitelor de control și nu există tendințe specifice. Stabilitatea unui proces este deosebit de importantă, deoarece un proces stabil în prezent este foarte probabil să



rămână stabil și pe viitor, dacă nu apar modificări majore în evoluția sa. Astfel dacă un proces este stabil, este foarte probabil ca și capabilitatea sa să fie previzibilă pe baza performanței anterioare.

- Analizând datele din prisma valorilor indicelui de performanță  $C_{PK}$ , se remarcă faptul că în toate situațiile (fig.3.57) acest indice este mult mai mare decât 1.33 / , ceea ce înseamnă că procesele sunt stabile cu o distribuție normală a valorilor.
- Valorile indicelui de capabilitate  $P_{PK}$  sunt cu mult mai mici decât ale  $C_{PK}$ .
- Distribuția valorilor de alungire (în stare O, la grosime 0.97- cu valoarea indicelui de capabilitate  $P_{PK}$  1.95 și starea O grosime 2.5- cu valoarea indicelui de capabilitate  $P_{PK}$  2.25 mm) are o valoare mai mare decât 1.67, ceea ce indică faptul că această caracteristică se află în stare de control statistic (adica  $P_{PK} \geq 1.67$  și  $C_{pk} \geq 1.33$ ).
- Faptul că pentru celelalte caracteristici valoarea indicelui de capabilitate  $P_{PK} \leq 1.67$ , și totuși procesul este stabil, înseamnă că trebuie să existe îmbunătățiri ale procesului prin diferite măsuri corective până la atingerea stabilității continue.

Analiza completă statistică efectuată asupra valorilor caracteristicilor mecanice ale tablelor placate din aliaj 3003, aflate în diferite stări de livrare și grosimi diferite a evidențiat faptul ca procesele tehnologice aplicate au condus la obținerea unor caracteristici mecanice corespunzătoare, fără abateri de la limitele de toleranță, cu mare reproductibilitate și stabilitate. Totodata folosirea suplimentara a indicilor de capabilitate  $C_{PK}$  și de performanță  $P_{PK}$  a permis o evaluare completă și sigură a caracterizării mecanice a performanțelor produselor placate din aliaj 3003, din producția ALRO Slatina.

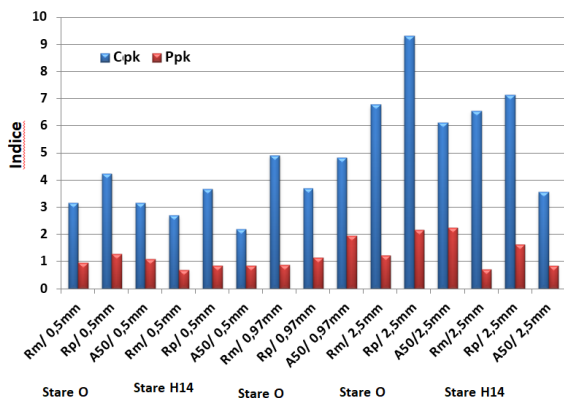


Fig. 3.57- Valorile indicilor de capabilitate și de performanță pentru caracteristicilor mecanice ale produselor din 3003, după prelucrarea statistică (în starea O și stare H14, și diferite grosimi ale tablelor placate)

În final pentru determinarea unei corelații între o valoare dependentă (respectiv rezistența la rupere  $R_m$ , în cazul de față) și o multime de valori independente (compoziția chimică, parametrii de proces, etc) am utilizat metoda celor mai mici pătrate [6].

În funcție de valoarea coeficientului de determinare obținut se poate stabili dacă există sau nu o corelație între principalele caracteristici de fabricație și proprietățile mecanice. Astfel, valoarea acestuia este cuprinsă în intervalul de la 0 la 1. Dacă este 1, există o corelație perfectă în esanțion. La cealaltă extremă, dacă coeficientul de determinare este 0, ecuația regresiei obținută nu va fi folositoare.

Pentru aceasta analiză am considerat produsele obținute din aliaj de aluminiu 3003 PL pentru perioada ianuarie 2016 - octombrie 2017 (aprox. 700 de loturi), starea O. Pentru produsele din aliaj 3003 PL, stare O, avem:

$$R_m = 90,81 + 9,15 \cdot Si + 6,37 \cdot Fe + 60,26 \cdot Cu + 5,48 \cdot Mn \quad (3.1)$$

cu o valoare a coeficientului de determinare de **0,90**, fără a fi excluse date din analiză.

Ecuația (3.1) este valabilă pentru  $Si \in [0,07 - 0,60\%]$ ,  $Fe \in [0,10 - 0,70\%]$ ,  $Cu \in [0,05 - 0,75\%]$   $Mn \in [0,18 - 1,5\%]$ .

## CAPITOLUL 4

### CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND OPTIMIZAREA TRATAMENTELOR TERMICE APLICATE PRODUSELOR PLACATE DIN ALIAJ TIP 3003

În vederea creșterii productivității cuptoarelor de tratament termic din cadrul secției LTB au fost efectuate inițial teste în condiții de laborator cu scopul optimizării tratamentelor termice pentru rulourile de tablă din aliaj 3003PL. În Tabelul 4.1 sunt redate în funcție de stările metalurgice tratamentele de recoacere care sunt utilizate în prezent în secția LTB pentru obținerea de table și benzi din aliaj 3003PL. Deasemenea pentru fiecare stare au fost prezentate limitele impuse pentru caracteristicile mecanice, conform standardului EN 485-2:2009.

Starea	TT intermediar	TT final	Rm [MPa]	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	A* [%]
O	-	415 °C/ 3h	95 — 135	35	23
H12	415 °C/ 3h	190 °C/ 3h	120 — 160	90	6
H14	415 °C/ 3h	190 °C/ 3h	145 — 185	125	4
H16	415 °C/ 3h	190 °C/ 3h	170 — 210	150	2
H22	415 °C/ 3h	190 °C/ 3h	120 — 160	80	9
H24	415 °C/ 3h	190 °C/ 3h	145 — 185	115	6

**Tabelul 4.1. Tratamentele de recoacere utilizate în secția LTB și caracteristicile impuse de standard pentru diferite stări ale produselor din aliaj 3003**

\*Au fost trecute doar valorile pentru grosimi mai mari de 3 mm. Aceste valori sunt verificate implicit și de grosimile mai mici

Pentru obținerea stării moale (O) se realizează un singur tratament final de recoacere totală, respectiv la parametrii 415 °C/ 3h. Pentru obținerea stărilor H12, H14, H16, H22 și H24 se realizează:

- un tratament de recoacere parțială la parametrii 415 °C/ 3h care are rolul de a detensiona materialul laminat pentru a putea fi supus unor noi pase de laminare la rece, cât și pentru a obține caracteristicile mecanice conform specificațiilor din standarde sau cerințelor clientului;
- un tratament termic final de uscare la parametrii 190 °C/ 3h.

Analiza detaliată a caracteristicilor mecanice din tabelul 4.1 permite formularea a două observații pertinente:

- pe de o parte studierea posibilităților de micșorare a temperaturii tratamentului termic intermediar (de la 415 °C/3h la valori mai scăzute), în vederea scăderii consumurilor specifice, temperatura mai scăzută fiind suficientă pentru obținerea stării moale,
- pe de altă parte, deoarece limitele impuse pentru caracteristicile mecanice (Rm, Rp<sub>0,2</sub> și A<sub>50mm</sub>) impuse pentru stările H12 și H24 fiind identice, să se studieze posibilitatea folosirii unui singur tratament termic de recoacere parțială (de exemplu la 275 °C/3h).

#### 4.2 Cercetări experimentale privind posibilităților de micșorare a temperaturii tratamentului termic intermediar, în vederea scăderii consumurilor specifice

Experimentele s-au realizat în cadrul Laboratorului de încercări Fizico-Chimice Aluminii Prelucrat. Pentru aceasta s-au prelevat probe din ruloul nr. 2175, lot nr. 46001, aliaj 3003P7 placat cu 4343P2, 4%, 1 față, grosime 0,5mm, înainte de realizarea tratamentului termic final de recoacere totală. Prelevarea s-a realizat la sliter-ul Salico. Compozițiile chimice ale șarjelor de turnare utilizate pentru obținerea ruloului nr. 2175 sunt redate în tabelul 4.2.

La grosimea de 1,50 mm s-a realizat operația de tăiere la margini, iar la grosimea de 0,50 mm ruloul a fost supus operației de îndreptare prin întindere, urmată de operația de fâșiere în fâșii cu lățimea de 96,7mm în timpul operației de fâșiere s-au prelevat probe cu dimensiunile

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA  
COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BAZATE PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA  
AUTOMOBILELOR**

0,5x30x250mm pentru determinarea caracteristicilor mecanice și simularea tratamentului de recoacere în laborator la diferiți parametri.

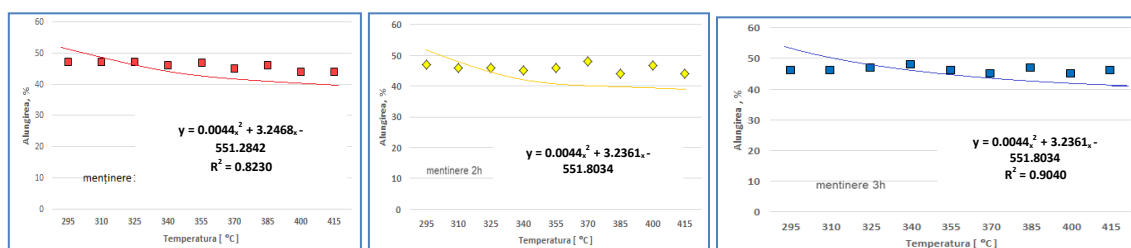
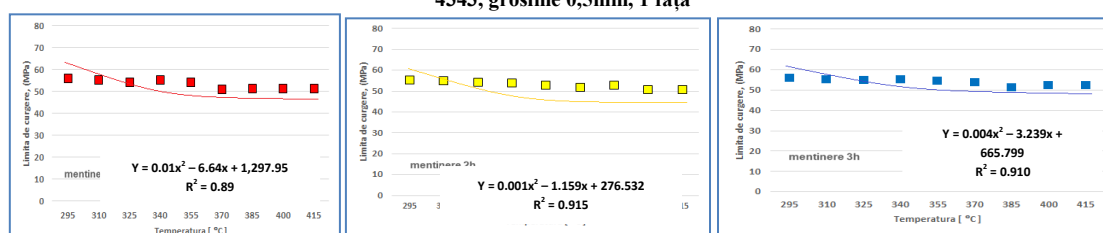
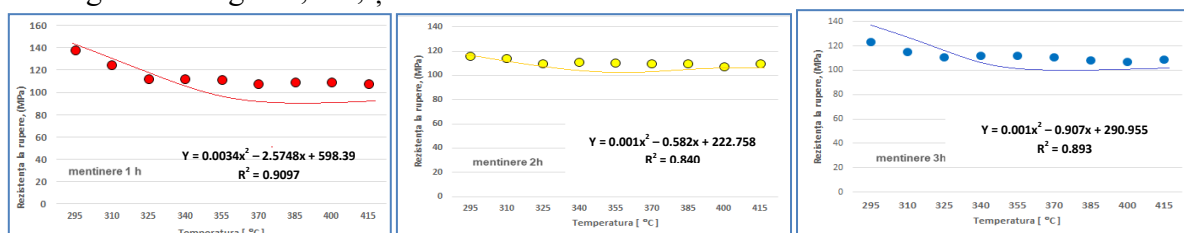
Aliaj	Standard	Limite	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
3003P7	SP 13 Rev. 13/2016	min.	-	-	0,05	1,0	-	-	-	-	-
		max.	0,6	0,7	0,20	1,5	0,01	-	-	0,10	-
	51503523/5 - realizat	0,29	0,43	0,08	1,23	0,003	0,004	0,007	0,007	0,015	
4343P2	SP 13 Rev. 13/2016	min.	6,8	-	-	-	-	-	-	-	-
		max.	8,2	0,8	0,25	0,10	0,05	-	-	0,20	-
	S15090904/5 - realizat	6,99	0,25	0,005	0,024	0,002	0,007	0,007	0,005	0,012	

**Tabel 4.2. Compozițiile chimice ale șarjelor utilizate pentru obținerea materialului 3003P7 placat cu 4343P2**

Operația tehnologică	Grosime intrare [mm]	Grosime ieșire [mm]	Reducerea pe pas [%]	Reducerea totală [%]
Laminare pas 1	7,50	4,50	40	40
Laminare pas 2	4,50	2,50	44,44	66,67
Laminare pas 3	2,50	1,50	40	80
Laminare pas 4	1,50	1,00	33,33	86,67
Laminare pas 5	1,00	0,70	30	90,67
Laminare pas 6	0,70	0,50	28,57	93,33

**Tabelul 4.3. Reducerile aplicate ruloului nr. 2175, pentru obținerea aliajului 3003P7 placat cu 4343P2, 4%, 1 față, grosime 0.5mm, starea O**

Caracteristicile mecanice ale probelor prelevate înainte de realizarea tratamentului termic final de recoacere totală și cărora li s-a realizat în laborator diferite tratamente termice sunt redate grafic în Fig. 4.4, 4.5, și 4.6.



Din analiza rezultatelor (Fig. 4.4, fig. 4.5 și fig.4.6) se observă că aproape toate valorile obținute pentru caracteristicile mecanice, cu excepția celor înregistrate pentru tratamentul realizat la temperatura de 290°C, se încadrează în limitele impuse de standardul EN 485:2-

2009 pentru produsele din aliaj 3003 starea O, respectiv pentru Rm s-au obținut valori între 95 ÷ 135MPa, pentru Rp<sub>0.2</sub> valorile sunt strict mai mari decât 35MPa, iar pentru alungire valorile obținute au fost strict mai mari decât 23%. Trebuie remarcat faptul că analiza de regresie făcută pentru a determina influența temperaturii asupra valorilor caracteristicilor mecanice a determinat obținerea ecuațiilor de gradul doi, care au fost inserate pentru fiecare caz în parte. Analiza statistică efectuată pentru verificarea corectitudinii tratamentelor termice a fost efectuată excluzând valorile extreme, adică valorile caracteristicilor mecanice corespunzătoare temperaturii de menținere de 290°C. Rezultatele analizei statistice sunt redate în tabelul 4.7. Se observă că valorile obținute pentru caracteristicile mecanice se concentrează în jurul valorilor medii, diferența dintre valoarea maximă și minimă determinată pentru Rm, respectiv Rp<sub>0.2</sub> fiind de 6MPa. De asemenea pentru alungire amplitudinea valorilor este de 7.5%. Concentrarea caracteristicilor mecanice determinate în jurul valorilor medii este indicată și de valorile scăzute obținute pentru abaterea standard: 1,7 pentru fiecare dintre caracteristicile Rm, Rp<sub>0.2</sub> și A<sub>50 mm</sub> care reprezintă o măsură a dispersiei valorilor în jurul mediei. Pentru aliajul 3003PL4343 s-a simulat în laborator și tratamentul de recoacere 340°C/4h având în vedere faptul că pentru produsele din aliaj 6063PL se realizează industrial acest tratament și rulourile ar putea fi încărcate în aceeași șarjă, evitându-se astfel crearea unui nou tratament de recoacere. Rezultatele obținute (Tabelul 4.6) se încadrează în limitele impuse de standardul EN 485:2-2009 pentru produsele din aliaj 3003, starea O.

Indicator statistic	Rm [MPa]	Rp <sub>0.2</sub> [MPa]	A <sub>50 mm</sub> [%]
Min	107	50	41
Max	113	56	48,5
Medie	109,9	53,1	46,0
Abaterea standard	1,7	1,7	1,7
Amplitudinea	6	6	7,5

**Tabel 4.7. Indicatorii statistici pentru caracteristicile mecanice obținute pentru aliajul 3003 placat cu 4343, 1 față, grosime 0.5mm, în urma simulărilor realizate în laborator, exceptând tratamentul realizat la temperatura de 290°C**

Rezultatele metalografice privind determinarea mărimii de grăunte rezultate prin aplicarea celor două tratamente termice în condiții de laborator, respectiv 415°C/3h și 340°C/4h sunt redate sintetic în tabelul 4.8.

Proba	Mărimea medie de grăunte [μm]	Clasa conform ASTM E 112
recoacere la 415 °C/3h	35,56	6.5
recoacere la 340 °C/4h	33,01	7.0

**Tabelul 4.8. Mărimea medie de grăunte pentru mostre din aliaj 3003PL 4343, 4%, 1 față, grosime 0,5mm, supuse la diferiți parametrii de tratament termic**

Probele au fost pregătite pe secțiunea L-LT (plană). Rezultatele indică o granulație ușor mai fină (de clasa 7.0) pentru materialul supus tratamentului termic de recoacere la parametrii 340 °C/4h comparativ cu materialul supus tratamentului termic la parametrii 415 °C/3h, unde s-a obținut clasa 6.5 conform standardului ASTM E 112.

### TESTĂRI ÎN REGIM INDUSTRIAL

În vederea validării rezultatelor din laborator s-au comparat valorile obținute în laborator la parametrii 415 °C/3h cu cele obținute industrial la aceeași parametrii. Ruloul nr. 2175, lot nr. 46001, aliaj 3003P7 placat cu 4343P2, 4%, 1 față, grosime 0,5mm a fost supus tratamentului termic final de recoacere totală în cuptorul SecoWarwick nr. 3.

Stare material	Caracteristica mecanică					
	Rm, [MPa]		R <sub>p0.2</sub> , [MPa]		A <sub>50 mm</sub> [%]	
recoacere 415°C/3h – în condiții industriale	112	114	55	57	38,5	42,5
recoacere 415°C/3h – în condiții de laborator	109	109	53	52	46	45,5

**Tabel 4.9. Caracteristicile mecanice pentru același material (3003PL4343) în diferite condiții de tratament termic final**

Conform rezultatelor din tabelul 4.9 nu s-au obținut diferențe majore între cele două determinări pentru același material. Astfel valorile obținute pentru Rm și Rp<sub>0.2</sub> în condiții

industriale sunt cu aprox. 5MPa mai mari decât cele pentru care tratamentul termic s-a realizat în condiții de laborator. Pentru alungire valorile pentru care tratamentul termic s-a realizat industrial sunt mai mici cu aprox. 6%.

#### 4.3. Cercetări experimentale privind posibilitățile de îmbunătățire a indicatorilor de performanță a cuptoarelor de tratament termic

Cercetările experimentale s-au realizat în cadrul Laboratorului de Incercari Fizico-Chimice Aluminiu Prelucrat. Pentru aceasta s-au prelevat probe dintr-un rulou experimental, aliaj 3003P8 placat cu 4343P2, 4%, 1 fata, grosime 0,5mm, înainte de realizarea tratamentului termic final de recoacere totală. Prelevarea s-a realizat la sliter-ul Salico. Compozițiile chimice ale sarjelor de turnare utilizate pentru obținerea ruloului experimental sunt redate în tabelul 4.10.

Aliaj	Standar	Limite	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Z	T
3003P8	SP 13 Rev. 13/2016	min	-	-	0,05	1,0	-	-	-	-	-
		max.	0,6	0,7	0,20	1,5	0,05	-	-	0,10	-
	experimental	0,25	0,43	0,09	1,30	0,002	0,001	0,01	0,008	0,016	-
4343P2	SP 13 Rev. 13/2016	min.	6,8	-	-	-	-	-	-	-	-
		max.	8,2	0,8	0,25	0,10	0,05	-	-	0,20	-
	experimental	6,99	0,25	0,005	0,024	0,002	0,007	0,007	0,005	0,012	-

Tabel 4.10. Compozițiile chimice ale sarjelor utilizate pentru obținerea materialului 3003P8 placat cu 4343P2

Ruloul obtinut în urma laminarii la cald a fost supus urmatoarelor reduceri la rece , așa cum este ilustrat în tabelul 4.3.

La grosimea de 1,50 mm s-a realizat operația de tăiere la margini, iar la grosimea de 0,50 mm ruloul a fost supus operației de îndreptare prin întindere, urmată de operația de fâșiere în fâșii cu lățimea de 96,7mm. În timpul operației de fâșiere s-au prelevat probe cu dimensiunile 0,5x30x250mm pentru determinarea caracteristicilor mecanice și simularea tratamentului de recoacere în laborator la diferiți parametri.

În vederea simulării condițiilor industriale în laborator s-a utilizat pentru tratamentul de recoacere rampa 100 °C/h.

Caracteristicile mecanice ale probelor prelevate înainte de realizarea industrială a tratamentului termic final de recoacere totală și cărora li s-a realizat în laborator diferite tratamente termice sunt grafic în Fig. 4.9. Din analiza rezultatelor se observă că numai valorile obținute pentru 260 °C/3h, 260 °C/4h și 270 °C/2h se încadrează în limitele impuse de standardul EN 485:2-2009 pentru produsele din aliaj 3003, starea H14 și starea H24. Creșterea temperaturii de recoacere determină o scădere a rezistenței la rupere cu:

- 1,61 MPa/ °C pentru un timp de mentinere de 2h;
- 1,34 MPa/°C pentru un timp de mentinere de 3h;
- 1,28 MPa/ °C pentru un timp de mentinere de 4h.

Trebuie remarcat faptul că analiza de regresie făcută pentru a determina influența temperaturii asupra valorilor caracteristicilor mecanice a determinat obținerea ecuațiilor de gradul întâi, care au fost inserate pentru fiecare caz în parte.

Astfel, în urma cercetărilor industriale se pot face următoarele aprecieri:

○ Testele realizate au presupus simularea în laborator a tratamentului termic de recoacere la diferiți parametri, respectiv temperatura de menținere variind de la 290 °C la 415 °C, iar timpul de menținere de la 1 ora la 4 ore.

○ În urma testelor realizate se observă că aproape toate valorile obținute pentru caracteristicile mecanice, cu excepția celor înregistrate pentru tratamentul realizat la temperatura de 290 °C, se încadrează în limitele impuse de standardul EN 485:2-2009 pentru produsele din aliaj 3003 starea O.

○ S-a simulat în laborator și tratamentul de recoacere 340 °C/4h având în vedere faptul că pentru produsele din aliaj 6063PL se realizează industrial acest tratament și rulourile ar putea fi încărcate în aceeași șarjă, evitându-se astfel crearea unui nou tratament de recoacere.

Caracteristicile mecanice obținute s-au încadrat în limitele impuse de standard. Pentru mărimea de graunte s-a obținut o granulație ușor mai fină, clasa 7.0, decât pentru materialul supus la parametrii 415 °C/3h, pentru care s-a obținut clasa 6.5 conform ASTM E 112.

○ În vederea validării rezultatelor din laborator s-au comparat valorile obținute în laborator la parametrii 415°C/3h cu cele obținute industrial la aceeași parametri. Nu s-au obținut diferențe majore între cele două determinări pentru același material. Astfel valorile obținute pentru Rm și Rp<sub>0,2</sub> în condiții industriale sunt cu aproximativ 5MPa mai mari decât cele pentru care tratamentul termic s-a realizat în condiții de laborator. Pentru alungire valorile pentru care tratamentul termic s-a realizat industrial sunt mai mici cu aprox. 6%.

## CAPITOLUL 5

### CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND CARACTERIZAREA STRUCTURALĂ A TABLELOR DIN ALIAJ DE ALUMINIU TIP 3003 PLACAT CU ALIAJE DIN SERIA 4XXX

Prezentul studiu are ca scop identificarea modificărilor structurale ale produselor din aliaj de aluminiu 3003 (aflat în diferite stări), brazate cu diferite tipuri de aliaje de aluminiu din seria 4xxx, respectiv: determinarea mărimii de grăunte înainte și după simularea procesului de brazare, determinarea distribuției fazelor, determinarea grosimii stratului de placare și identificarea zonei „brown band”, adică elemente structurale cantitative și calitative care definesc această zonă. În capitolul care urmează se vor prezenta cele mai importante aspectele structurale, pe diferite îmbinări prin brazare.

#### 5.1 Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4045

În acest subcapitol sunt redate rezultatele privind analiza structurală asupra îmbinărilor sudate prin brazare ale aliajului 3003 cu aliajul 4045, care prezintă un nivel de siliciu apropiat de nivelul concentrației eutectice, de circa 9÷11 %. În vederea determinării mărimii de grăunte, înainte de brazare s-au pregătit probe din mostrele de tablă 3003 placată cu 4045, atât în secțiune longitudinală, cât și în secțiune transversală. Probele analizate au evidențiat o textură cu grăunți alungiiți, cu limite de grăunte difuze, de tip „pancake”.

Zona	Microcompoziție locală, % masic				
	Mg	Si	Mn	Fe	Zn
20	1,69	13,53	1,15	8,68	1,72
25	1,55	13,49	1,14	5,62	1,65
30	1,55	12,65	1	1,74	1,67
40	1,55	3,3	1,32	0,31	1,55
50	1,47	2,1	4,75	2,38	0,25
60	1,33	2,42	6,04	3,09	0,36
70	1,52	1,05	5,81	0,87	0,32

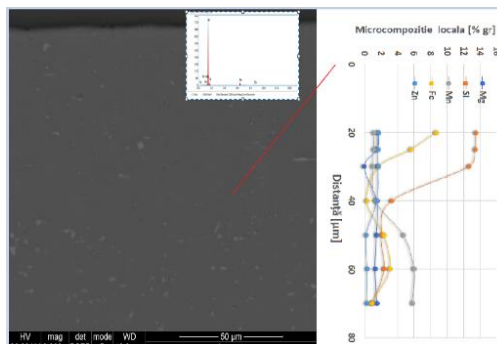
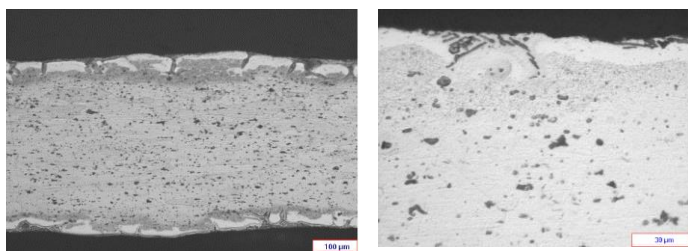


Fig. 5.6- Analiza la microscopul electronic cu baleiaj (SEM) a epruvetelor din aliaj 3003 placat cu 4045, cu indicarea microcompoziției locale și a distribuției acesteia în secțiune transversală

Identificarea zonei „brown band” – după simularea procesului de brazare a fost evidențiată prin analiza microstructurală, cu rezultate spectaculoase prezentate în fig. 5.8, respectiv fig. 5.9. Astfel, pe epruvete din aliaj 3003 placat cu 4045, în stare H24, cu grosimea de 0,6mm, s-au evidențiat aspecte ale procesului de simulare al brazării, la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, pentru identificarea zonei „brown band” (fig. 5.8). Dimensiunea maximă a zonei „brown band” a fost de aproximativ 43,82μm (fața A) și 48,08μm (fața B), (fig. 5.9). Se remarcă în stratul de brazare eutecticul precipitat intergranular

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA  
COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BRAZATE PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA  
AUTOMOBILELOR**



**Fig. 5.8 Aspectul microstructural al epruvetelor placate din aluminiu 3003 cu aluminiu 4045, stare H24, supuse la 600°/10 minute  
(a- x100, b- x500)**

După aplicarea unui proces de simulare a brazării la temperatura de 600°C, timp de 1 ora pe epruvete aflate în aceeași stare H24 cu grosimea de 0,6mm, s-a constatat creșterea grosimii zonei „brown band” la 78,89μm (fața A) și 83,26μm (fața B).

Analiza microstructurală efectuată pe epruvete din aliaj 3003 placat cu 4045, în stare O, cu grosimea de 0,6mm, pentru identificarea zonei „brown band”, după ce a fost supusă procesului de simulare al brazării este redată în **fig. 5.10** pentru brazare la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, respectiv **fig. 5.11** pentru brazare la temperatura de 600°C, timp de 1 ora . Astfel, dacă după brazarea la 600°C, timp de 10 minute dimensiunea maximă a zonei „brown band” a fost de aproximativ 37,15μm (fața A) și 41,52μm (fața B) (fig. 5.10), după brazarea la 600°C, timp de 1 ora, dimensiunea maximă a zonei „brown band” a fost de aproximativ 74,31μm (fața A) și 90,71μm (fața B). Se remarcă astfel că procesul de simulare efectuat pe epruvete în stare O duce la dimensiuni neegale pe cele două fețe ale tablei în ambele variante de simulare, fie menținere 10 minute, fie menținere de o oră.

Analiza privind determinarea mărimii de grăunte, după simularea procesului de brazare este prezentată comparativ în **tabelul 5.1**. Astfel la epruvetele din aliaj 3003, placat cu 4045, în stare H24, cu grosimea de 0,6mm, după aplicarea procesului de simulare al brazării, la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, mărimea medie de grăunte a fost de 79,25μm (clasa 4,5, conform ASTM E112).

Aceeași analiză pentru determinarea mărimii de grăunte a tablelor din 3003, placate cu 4045, dar în stare O, după procesului de simulare al brazării, la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, a evidențiat o mărime medie de grăunte a fost de 79,10μm (clasa 4,5, conform ASTM E112), (fig. 5.14) și o mărime de grăunte de grăunte a fost de 87,27μm (clasa 4,0, conform ASTM E112), după creșterea duratei procesului de brazare la 1 oră, fig. 5.15.

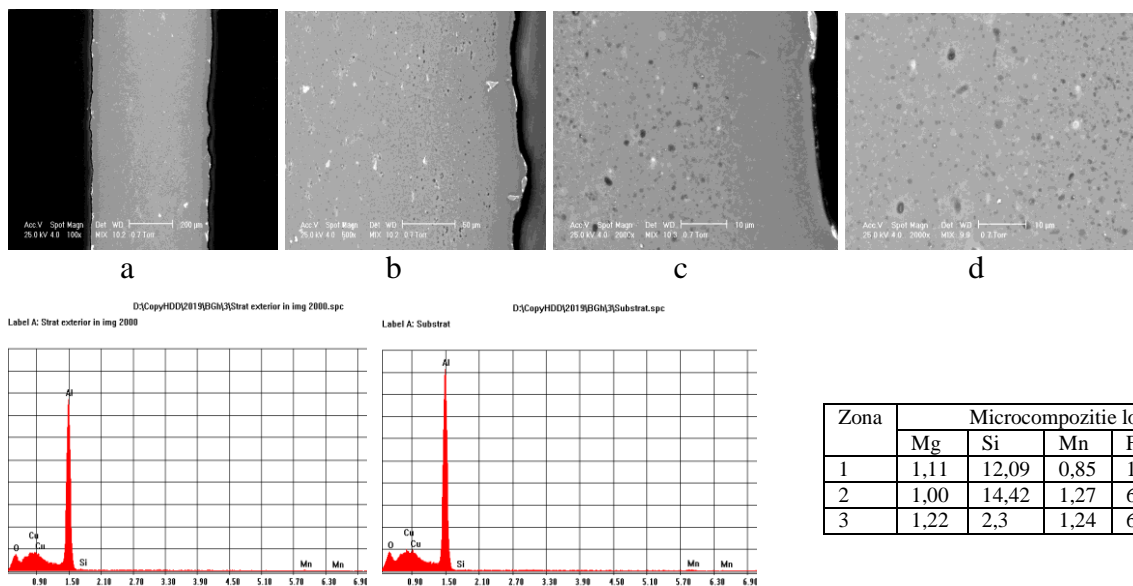
Stare	Proces de simulare a brazării	Mărime medie de grăunte, μm	Clasa ASTM E112	Figura
H24	600°C/10 minute	79,25	4,5	5.12
	600°C/1 oră	83,15	4	5.13
O	600°C/10 minute	79,10	4,5	5.14
	600°C/1 oră	87,27	4	5.15

**Tabelul 5.1 Rezultatele analizei de mărime de grăunte a tablelor placate din aliaj 3003 cu aliaj 4045, în diferite stări și diferite durate de menținere la 600°C**

Se poate face remarcată observația cu în urma simulării procesului de brazare la 600°C/10 minute, indiferent de starea aliajului 3003 (H24, sau O) mărimea de grăunte de circa 79μm (clasa 4.5), iar prin creșterea duratei de menținere la o ora, mărimea de grăunte se finisează, ajungând la circa 85μm, (clasa 4).

Analiza la microscopul electronic cu baleiaj a epruvetelor după simularea procesului de brazare a confirmat modificarea microcompoziției locale din zona ”brown band”. Astfel în figura 5.16 se poate vedea fie aspectul macroscopic (**fig.5.16a**), fie aspecte microstructurale în secțiune transversală la puteri de mărime mari (**fig. 5.16 b,c,d**), cu evidențierea schimbării microcompoziției locale.

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA  
COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BRAZATE PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA  
AUTOMOBILELOR**

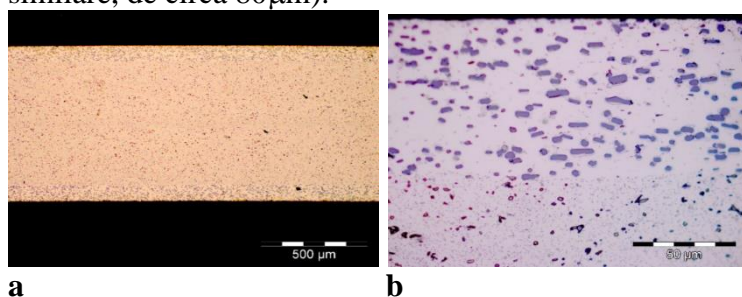


**Fig.5.16-** Analiza la microscopul electronic cu baleiaj a epruvetei din aliaj 3003 placat cu 4045, după brazare, la 600/1h, cu indicarea microcompoziției locale

### 5.2 Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4343

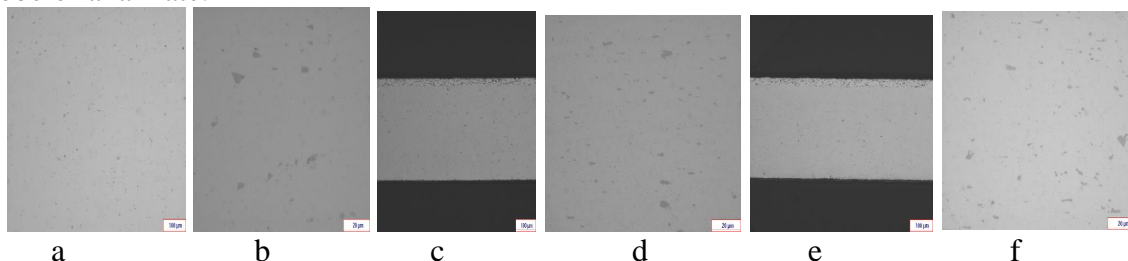
În acest subcapitol sunt redată rezultatele privind analiza structurală asupra îmbinărilor sudate prin brazare ale aliajului 3003 cu aliajul 4343, care prezintă un nivel de siliciu mai scăzut decât cel eutectic, respectiv de circa  $6,8 \div 8,2$  %.

În **figura 5.17** este redat aspectul microstructural al aliajului 3003 brazat cu 4343, în secțiune transversală. Se remarcă o distribuție uniformă a precipitatelor atât în materialul de bază (respectiv aliaj 3003), cât și în straturile de placare, aliaj 4343 (superior și inferior de grosimi similare, de circa 80μm).



**Fig. 5.17-** Aspectul microscopic al secțiunii transversale din aliaj 3003 placat cu 4343, în stare O

Analiza detaliată microstructurală a probelor pregătite din aliaj 3003, placat cu 4343, grosime 0,3mm, este redată comparativ în **figura 5.18**. Se remarcă faptul că atât pe direcție plană, cât și pe direcție longitudinală și/sau transversală, se evidențiază o distribuție uniformă a fazelor de  $MnAl_6$  și  $\alpha(AlMnSi)$ , majoritatea fazelor de  $MnAl_6$  și  $\alpha(AlMnSi)$  sunt sfericizate, distribuite relativ uniform, Precipitatul (de Mn) este fin și uniform distribuit în toată secțiunea probelor analizate.



**Fig. 5.18-** Aspectul microstructural al epruvetelor din 3003 placat cu 4045, în starea O, neatcat, secțiuni și puteri de mărire (a,c,e x100; b,d, f- x500; a,b- secțiune plană; c,d, secțiune transversală; e,f- secțiune longitudinală)



Analiza la microscopul electronic cu baleiaj (SEM) a epruvetelor din aliaj 3003 placat cu aliaj 4045 este redată sugestiv în **figura 5.19**. Se remarcă faptul că în strat conținutul de siliciu poate ajunge până la 13,38% și poate scădea brusc în secțiune pe o distanță de 30μm până la 4,78%, ajungând în materialul de bază la conținutul aliajului 3003, de circa 1-2%Si.

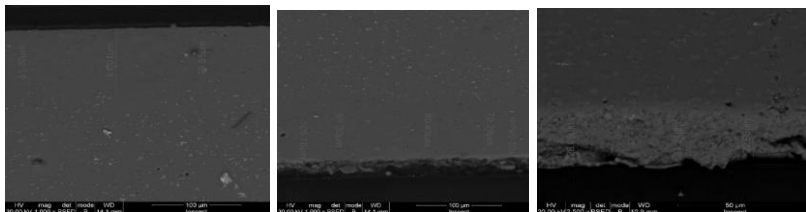


Fig. 5.19- Analiza la microscopul electronic cu baleiaj (SEM) a epruvetelor din aliaj 3003 placat cu 4343, cu indicarea microcompoziției locale și a distribuției acestuia în secțiune transversală

Analiza microstructurală detaliată a probelor placate din aliaj 3003, cu aliaj 4343, în stare O, la grosime de 0,3mm, după atacul electrolic a evidențiat în aliajul de bază, 3003 o structură cu grăunți puternic alungiți, puternic deformați pe cele două direcții (longitudinală și transversală), cu limite de grăunte difuze.

Prin aplicarea diferiților parametri de simulare a procesului de brazare, conform specificației Behr, așa cum sunt indicați în tabelul 5.3, au putut fi identificate zonele "brown band". Aspectul microstructural al zonelor "brown band" este redat sugestiv în **fig. 5.22**. Se remarcă stratul exterior de placare care este constituit din eutectic, cu aspect dendritic și insule de soluție solidă  $\alpha$ , cu o grosime de circa 80μm. Dimensiunea "brown band" pentru probe din aliaj 3003LLplacat cu 4343grosimea 0,3mm – secțiune transversală (LT-ST), supuse brazării, conform specificației Behr și atacate electrolic, a fost cuprinsă între 27,37μm și 49,25 μm, cu o medie, realizată pe 17 măsuratori de 38,43 μm, care reprezintă 12,81% din grosimea totală a tablei de 0,3mm, așa cum este redat în **figura 5.23**.

Grosimea stratului de placare (pentru fața placată) pentru probele pregătite (secțiune transversală, LT-ST) din tablă 3003 placată cu 4343, grosime 0,3 mm, este dată în tabelul 5.4, Valoarea impusă pentru grosimea stratului de placare pentru fața placată este 8,5%±1,5%. Se constată că grosimea stratului de placare (pentru fața placată) la toate probele din rulou s-a încadrat în valoarea impusă de 8,5%±1,5% .

Tabelul 5.3 Parametri tratament termic pentru simularea procesului de brazare aplicat tablelor din aliaj 3003 placat cu aliaj 4343

Temperatură –Durată de menținere				
Încălzire		Brazare		Răcire
RT-300 <sup>0</sup> C	300-577 <sup>0</sup> C	>577 <sup>0</sup> C	T <sub>max</sub>	T <sub>max</sub> -RT
10 <sup>+/-2</sup> min.	9 <sup>+/-2</sup> min.	6 <sup>+/-2</sup> min.	600 <sup>+/-5</sup> °C	12 <sup>+/-2</sup> min.

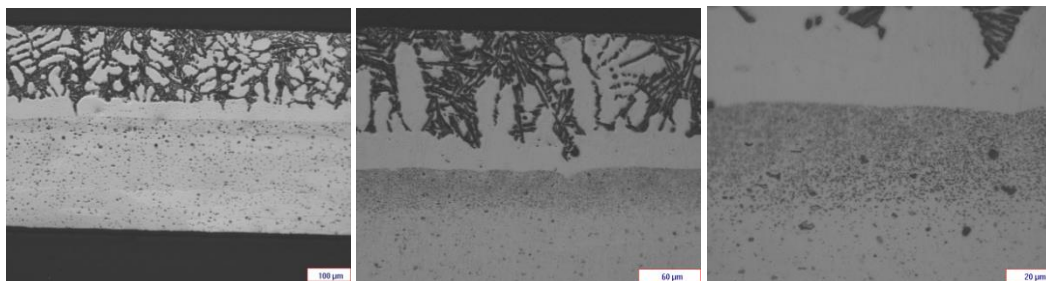


Fig. 5.22- Aspectul microstructural al stratului de brazare a aliajului 3003 cu aliaj 4343, la diferite puteri de mărire

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BRAZATE PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA AUTOMOBILELOR**

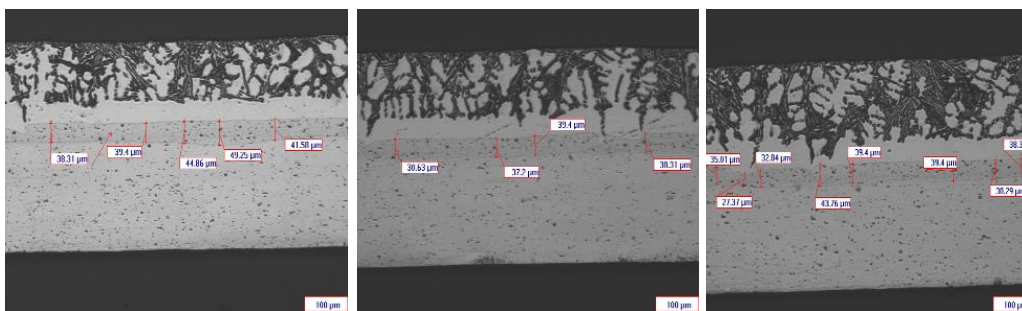


Fig. 5.23- Măsurarea grosimii "brown band" a stratului de placare a aliajului 3003 cu aliaj 4343, la mărire de x100

Astfel la epruvetele din aliaj 3003, placat cu 4343, în stare stare H24, cu grosimea de 0,3mm, după aplicarea procesului de simulare al brazării, la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, mărimea medie de grăunte a fost de 78,65μm (clasa 4,5, conform ASTM E112), iar după creșterea duratei de menținere la 600°C timp de o oră, mărimea medie de grăunte a fost de 84,19μm (clasa 4, conform ASTM E112). Se poate face remarcată aceeași observație ca la placarea aliajului 3003 cu aliaj 4004, că și la placarea cu aliaj 4343, prin creșterea duratei de menținere la o ora, mărimea de grăunte se finisează, de la clasa 4 la clasa 4,5.

**Tabelul 5.5** Rezultatele analizei de mărime de grăunte a tablelor placate din aliaj 3003 cu aliaj 4343, în stare H24 și diferite durate de menținere la 600°C

Stare	Proces de simulare a brazării	Mărime medie de grăunte, μm	Clasa ASTM E112	Figura
H24	600°C/10 minute	78,65	4,5	-
	600°C/1 oră	84,19	4	5.2

#### 5.4 Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4004

În acest subcapitol sunt redate rezultatele privind analiza structurală asupra îmbinărilor sudate prin brazare ale aliajului 3003 cu aliajul 4004, care prezintă un nivel de siliciu mai scăzut decât cel eutectic, respectiv de circa 9,0÷10,5 %.

Se remarcă o distribuție uniformă a precipitatelor atât în materialul de bază (respectiv aliaj 3003), cât și în straturile de placare, aliaj 4004 (superior și inferior de grosimi similare, de circa 80μm).

Analiza la microscopul electronic cu baleiaj (SEM) a epruvetelor din aliaj 3003 placat cu aliaj 4004 este redată sugestiv în **figura 5.28**. Se remarcă faptul că în strat conținutul de siliciu poate ajunge până la 14% și poate scădea brusc în secțiune pe o distanță de 20-30μm până la 3%, ajungând în materialul de bază la conținutul aliajului 3003, de circa 0,5÷2%Si.

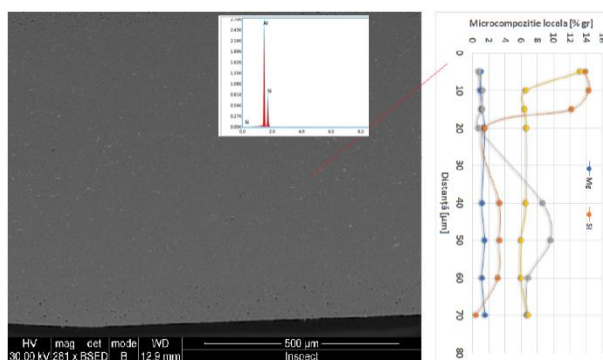


Fig. 5.28- Analiza la microscopul electronic cu baleiaj (SEM) a epruvetelor din aliaj 3003 placat cu 4004, cu indicarea microcompoziției locale și a distribuției acesteia în secțiune transversală

Zona	Microcompoziție locală, % masic			
	Mg	Si	Mn	Fe
5	1,11	14,02	0,85	13,36
10	1,00	14,42	1,27	6,65
15	1,22	12,3	1,24	6,50
20	1,56	1,58	0,83	6,73
40	1,25	3,39	8,74	6,68
50	1,54	3,39	9,68	6,08
60	1,25	3,23	6,92	6,04
70	1,59	0,50	6,81	6,91

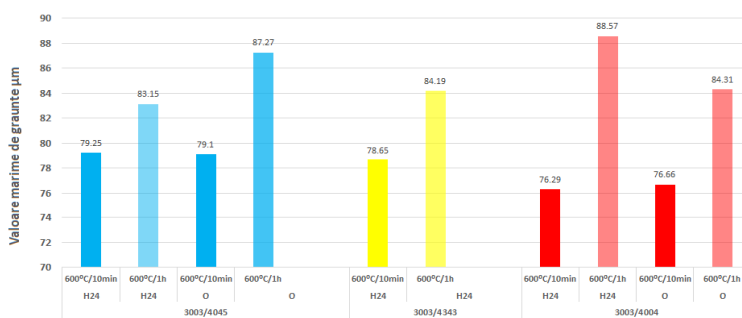
Analiza privind determinarea mărimii de grăunte, după simularea procesului de brazare este prezentată comparativ în **tabelul 5.6**. Astfel la epruvetele din aliaj 3003, placat cu 4004, în stare H24, cu grosimea de 0,98mm, după aplicarea procesului de simulare al brazării, la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, mărimea medie de grăunte a fost de 76,29μm (clasa 4,5, conform ASTM E112) .La creșterea temperaturii procesului de simulare a brazării la 600°C, timp de 1 ora, mărimea medie de grăunte a devenit de 88,57μm (clasa 4,0, conform ASTM E112). Aceeași analiză pentru determinarea mărimii de grăunte a tablelor din 3003, placate cu 4004, dar în stare O, după procesului de simulare al brazării, la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, a evidențiat o mărime medie de grăunte a fost de 76,66μm (clasa 4,5, conform ASTM E112) și o mărime de grăunte de grăunte a fost de 84,31μm (clasa 4,0, conform ASTM E112), după creșterea duratei procesului de brazare la 1 oră,.

Stare	Proces de simulare a brazării	Mărime medie de grăunte, μm	Clasa ASTM E112	Figura
H24	600°C/10 minute	76,29	4,5	5.29
	600°C/1 oră	88,57	4	5.30
O	600°C/10 minute	76,66	4,5	5.31
	600°C/1 oră	84,31	4	5.32

**Tabelul 5.6 Rezultatele analizei de mărime de grăunte a tablelor placate din aliaj 3003 cu aliaj 4004, în diferite stări și diferite durate de menținere la 600°C**

Se poate face remarcată aceeași observație ca și în cazul placării 3003 cu 4045, și în această situație, respectiv placarea tablelor din 3003 cu 4004 în urma simulării procesului de brazare la 600°C/10 minute, indiferent de starea aliajului 3003 (H24, sau O) mărimea de grăunte de circa 79μm (clasa 4.5), iar prin creșterea duratei de menținere la o ora, mărimea de grăunte se finisează, ajungând la circa 85μm, (clasa 4).

O analiză comparativă a valorilor mărimii de grăunte a tablelor din aliaj 3003 placat cu diferite aliaje din seria 4xxx, respectiv a rezultatelor din tabelul 5.1, tabelul 5.5 și tabelul 5.6 arată faptul că după simularea procesului de brazare la 600°C /10 minute în toate situațiile mărimea de grăunte a fost de până la 80μm (adică clasa 4.5 conform ASTM E112), iar prin creșterea duratei de menținere la 1 ora mărimea de grăunte se finisează, având valori peste 80μm (clasa 4 conform ASTM E112). Această comportare este redată sintetic în figura 5.33.



**Fig.5.33- Distribuția valorilor de mărime de grăunte determinate pe aliaje placate din aluminiu tip 3003, în diferite stări structurale, cu diferite tipuri de aliaje de aluminiu din seria 4xxx**

## CAPITOLUL 6

### COMPORTAREA LA COROZIUNE A TABLELOR DIN ALIAJ DE ALUMINIU TIP 3003 BRAZAT CU ALIAJE DIN SERIA 4XXX

#### 6.2.Cercetări privind determinarea potențialelor de coroziune a aliajului 3003 placat cu aliaje din seria 4000, în diferite stări ale suprafeței tablelor

Probele au fost pregătite asemănător cu cele din cercetările preliminare, respectiv conform PO-043 și analizate conform ASTM G69 și PO- 042. Probele investigate au fost aliaj 3003/4045, 3003/4004 și 3003/4343, la care s-au determinat potențialele de coroziune în stare de livrare, stare curățat chimic și stare postbrazare. Valorile potențialelor de coroziune obținute în urma investigațiilor sunt redată în tabelul 6.3, iar variațiile potențialelor de coroziune astfel obținute sunt redată comparativ în figurile 6.6, 6.7 și 6.8.

Analiza valorilor potențialelor de coroziune permite formularea următoarelor concluzii:

- Starea materialului influențează valoarea potențialelor de coroziune, astfel: cele mai mici valori se înregistrează pentru starea de livrare, apoi pentru starea curățat chimic și cele mai mari valori pentru starea postbrazare, pentru toate aliajele brazate) în această ordine ierarhică). Această comportare este similară pentru ambele valori ale duratei de menținere la brazare (respectiv 30 și 60 minute), cu mențiunea că la creșterea duratei de menținere la brazare are loc creșterea valorilor potențialelor de coroziune;
- Prin diferitele procedee de prelucrare a suprafeței aliajelor 3003 placat cu diferite aliaje din seria 4000, valorile potențialelor de coroziune se modifică cu aproximativ 20%, fiind situate în domeniul  $-777 \text{ eV} \div +698 \text{ eV}$ . Această modificare de potențial de coroziune nu scoate din clasa de rezistență la coroziune aceste aliaje, valoarea potențialului fiind relativ mică;
- Se poate face o ierarhizare a rezistenței la coroziune a aliajelor 3003 brazate cu aliaje din seria 4000, astfel: cel mai rezistent este aliajul 3003/4045, urmat de 3003/4004 și 3003/4343.

**Tabelul 6.3- Valorile potențialelor de coroziune ale tablelor brazate din aliaje de aluminiu**

Material	Durata menținere min	Valoare medie potențial de coroziune, eV		
		Starea materialului		
		In stare de livrare	Curatat chimic	Post brazare
3003/4045	30	-777	-760	-703
	60	-766	-756	-698
3003/4004	30	-758	-748	-735
	60	-749	-740	-729
3003/4343	30	-757	-728	-716
	60	-741	-715	-703

### **6.2.2 Cercetări privind determinarea potențialelor de coroziune a tablelor din aliaj 3003, de diferite grosimi, funcție de mărimea de găunte**

Aceste cercetări au avut ca scop stabilirea unei posibile corelații între mărimea de găunte a tablelor din aliaj 3003 cu diferite grosimi și diferite stări.

În tabelul 6.4 sunt redată sintetic valorile obținute pentru potențialul de coroziune ale probelor pregătite din mostrele de bandă, aliaj 3003 placat cu 4045, cu grosimea 0,6 mm, comparativ cu valorile rezultate ale mărimii de găunte. Se remarcă faptul că pentru tablele placate din aliaj 3003, valorile potențialelor de coroziune sunt asemănătoare, aflate în domeniul  $-721 \div -742 \text{ (mV)}$ , iar mărimea de găunte se află în domeniul  $79 \mu\text{m} \div 83 \mu\text{m}$  (afându-se în clasa 4,5, respectiv 4, conform ASTM).

Analiza detaliată a valorilor cuprinse în tabelul 6.5 permite formularea unor concluzii interesante, adică se poate stabili o corelație între grosimea tablei placate din aliaj 3003/4045, mărimea de găunte și valorile potențialelor de coroziune. Astfel pe măsura creșterii grosimii tablei se observă o creștere a granulației, respective de la  $63 \mu\text{m}$  (la grosime 0,3mm), până la  $200 \mu\text{m}$  (la 2,5mm), fapt ilustrat în figura 6.18. Totodată pe măsura creșterii grosimii tablei, potențialele sunt uneori mai electronegative, așa cum se poate observa și din diagram din figura 6.19. Valorile potențialelor de coroziune medii se află în domeniul  $-721 \text{ (mV)} \div -766 \text{ (mV)}$ .

**Tabelul 6.4 - Valorile potențialelor de coroziune și ale mărimii de grăunte ale tablelor din aliaj placate 3003, post brazare, cu grosimea 0,6 mm**

Stare	Aliaj	E corr medie (mV)	E corr min. (mV)	E corr max. (mV)	Mărime de grăunte
H24	4045	-742,57	-744,51	-739,81	79,25μm (clasa 4.5)/ post brazare 600°C/10 min 83,15μm (clasa 4.0)/ post brazare 600°C/1 h
	3003	-738,09	-739,92	-735,30	
O	4045	-743,53	-745,86	-741,07	79,10μm (clasa 4.5) post brazare 600°C/10 min 87,27μm (clasa 4.0) / post brazare 600°C/1 h
	3003	-721,89	-724,09	-720,64	

**Tabelul 6.5 - Valorile mărimii de grăunte și ale potențialelor de coroziune ale tablelor 3003 în stare O, post brazare, cu diferite grosimi**

Tablă placată	Grosime (mm)	Mărime de grăunte		Potențial de coroziune		
		μm	clasa	E corr med (mV)	E corr min (mV)	E corr max (mV)
3003/4045 postbrazare 600°C/1h	0,3	63,17	5	730,14	727,58	732,7
	0,6	80	4,5	721,29	724,09	720,64
	1,2	107,02	3,5	748,02	745,02	751,02
	1,5	155	2,5	752,58	748,81	756,35
	2	171,02	2	760,17	755,23	765,11
	2,5	200,89	1,5	766,0	762,57	769,43

### 6.3 Studiu de caz privind investigarea structurală a aripioarelor unui radiator

Prezentul studiu este realizat pe un radiator de tractor, care a fost scos din uz după 6 ani de funcționare.

**Tabelul 6.6 - Măsurarea dimensiunilor zonei brazate ale aripioarelor de radiator**

Aripioara	inferioară		superioară		Dimensiunea medie a zonei brazate	
	Lungime (μm)	Lățime (μm)	Lungime (μm)	Lățime (μm)	Lungime (μm)	Lățime (μm)
1	300	64,38	466,66	63,65	419,25	67,82
2	400	85,05	506,66	71,93		
3	453,33	71,12	discontinuuă			
4	453,33	74,34	380	65,1		
5	466,66	56,38	346,66	58,43		

**Tabelul 6.7 - Descrierea aspectelor structurale ale aripioarelor de radiator**

Aripioara	Inferioară	Superioară
1	Coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular, fisuri intergranulare de circa 80μm	Coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular cu fisuri de circa 50μm, distrugerea parțială a grosimii aripioarei
2	Coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular, fisuri intergranulare de circa 100μm	Coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular cu fisuri de circa 30μm, discontinuitate în aripioară de 50 μm
3	Coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular, numeroase zone cu fisuri intergranulare de circa 100μm	Distrugerea zonei brazate, coroziunea tubulaturii pe distanțe mari peste 100 μm
4	Coroziune generală a aripioarei cu afectarea a peste 50% din grosime, fisuri intergranulare ale tubulaturii de circa 50 μm	Distrugerea parțială a aripioarei cu defect peste 100 μm
5	Coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular	Fisuri intergranulare pe tubulatură circa 30-50 μm

## CAPITOLUL 6.

### CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII ȘI PERSPECTIVE ALE CERCETĂRILOR VIITOARE

#### 6.1 CONCLUZII

Cercetările efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat au condus la obținerea unor rezultate care au permis atingerea obiectivelor propuse initial, respectiv:

- Identificarea posibilităților de îmbunătățire a comportării mecanice și de rezistență la coroziune a tablelor placate din aliaj de aluminiu tip 3003, cu diferite aliaje din seria 4xxx prin optimizarea tratamentelor termice aplicate, respectiv:
  - Determinarea posibilităților de micșorare a temperaturii tratamentului termic intermediar, în vederea scăderii consumurilor specifice;
  - Determinarea posibilităților de îmbunătățire a indicatorilor de performanță a cuptoarelor de tratament termic
- Analiza temporală, statistică a evoluției caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu tip 3003 placat cu aliaj 4xxx în funcție de caracteristicile de fabricație
- Identificarea principalelor caracteristici structurale ale tablelor din aliaj de aluminiu tip 3003, aflate în diferite stări structurale, placate cu diferite aliaje din seria 4xxx
- Determinarea comportării la coroziune a tablelor placate din aliaj de aluminiu tip 3003, cu diferite aliaje din seria 4xxx, respectiv:
  - Stabilirii unei corelații relevante între starea de livrare, potențialul de coroziune și structura metalografică la aliajele de aluminiu (seriile 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx),
  - Determinarea potențialelor de coroziune a aliajului 3003 placat cu aliaje din seria 4000, în diferite stări ale suprafeței tablelor,
  - Evidențierea comportării la coroziune într-un studiu de caz a unui radiator de tractor, care a fost scos din uz după 6 ani de funcționare.

#### ***6.1.1 Concluzii finale desprinse din cercetările asupra evoluției caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu tip 3003 placat cu aliaj din seria 4xxx în funcție de caracteristicile de fabricație***

Analiza evoluției caracteristicilor mecanice pentru produsele din aliaj de aluminiu tip 3003 placat cu aliaj din seria 4xxx, în funcție de caracteristicile de fabricație, a fost luată în considerație cunoscându-se, pe de o parte multitudinea factorilor care pot influența comportarea mecanică a acestor produse, și, pe de altă parte, pentru a vedea reproductibilitatea rezultatelor de-a lungul diferitelor perioade de procesare ale acestor produse în cadrul ALRO Slatina. Din analiza statistică realizată pentru perioada 01.11.2016 - 31.10.2017 au fost formulate următoarele concluzii:

- S-au predat 4338 t de produse din aliaj de aluminiu 3003 placat, aprox. 12,5% din cantitatea totală predată la secția LTB
- Pentru aliajul 3003 placat s-au realizat 58 de combinații aliaj de bază, aliaj de placare și procent de placare.
- Principala stare metalurgică pentru produsele din aliaj 3003 placat predate în perioada analizată o reprezintă produsele în stare moale, respectiv 44,6 % (1934 t).
- Cele mai multe plachete realizate (528 bucăți 30%) au avut grosimea de 48 mm și corespund unui procent de placare de 10%.
- Cele mai utilizate aliaje de placare pentru obținerea de produse placate au fost aliajele 4004 (39%) și 4045P1 (37%).

- Pentru obtinerea de produse placate, pentru perioada analizată s-a obținut un coeficient de încărcare de 1,82 t/t.
- Grosimile cele mai solicitate în funcție de cantitatea predată pentru produsele placate, aliaj de baza 3003 au fost: 0,8 mm (13%); 2,5 mm (12%); 0,6 mm (11%) și 1,5 mm (10%).
- A fost determinată o ecuație de regresie pentru produsele placate, aliaj de baza 3003, starea O: respectiv:  $R_m = 90,81 + 9,15 \cdot Si + 6,37 \cdot Fe + 60,26 \cdot Cu + 5,48 \cdot Mn$ , cu o valoare a coeficientului de determinare de 0,90. Ecuația de regresie este valabilă pentru o compoziție chimică de:  $Si \in [0,07 \div 0,60\%]$ ,  $Fe \in [0,10 \div 0,70\%]$ ,  $Cu \in [0,05 \div 0,75\%]$  și  $Mn \in [0,18 \div 1,5\%]$ .

### **6.1.2 Concluzii desprinse din cercetările experimentale privind optimizarea tratamentelor termice aplicate produselor placate din aliaj 3003**

În vederea creșterii productivității cuptoarelor de tratament termic din cadrul secției LTB au fost efectuate inițial teste în condiții de laborator cu scopul optimizării tratamentelor termice pentru rulourile de tablă din aliaj 3003PL. Ulterior au fost efectuate și testări în condiții industriale pentru verificarea rezultatelor investigațiilor de laborator.

Experimentările în condiții de laborator au fost efectuate înainte de realizarea tratamentului termic final de recoacere totală. Testele realizate au presupus simularea în laborator a tratamentului termic de recoacere la diferiți parametrii, respectiv temperatura de menținere variind de la 290 °C la 415 °C, iar timpul de menținere de la 1 ora la 4 ore.

În urma testelor realizate se observă că aproape toate valorile obținute pentru caracteristicile mecanice, cu excepția celor înregistrate pentru tratamentul realizat la temperatura de 290 °C, se încadrează în limitele impuse de standardul EN 485:2-2009 pentru produsele din aliaj 3003 starea O.

S-a simulat în laborator și tratamentul de recoacere 340 °C/4,h având în vedere faptul că pentru produsele din aliaj 6063PL se realizează industrial acest tratament și rulourile ar putea fi încărcate în aceeași șarjă, evitându-se astfel crearea unui nou tratament de recoacere. Caracteristicile mecanice obținute s-au încadrat în limitele impuse de standard. Pentru mărimea de grăunte s-a obținut o granulație ușor mai fină, clasa 7.0, decât pentru materialul supus la parametrii 415 °C/3h, pentru care s-a obținut clasa 6.5 conform ASTM E 112.

În vederea validării rezultatelor din laborator s-au comparat valorile obținute în laborator la parametrii 415°C/3h cu cele obținute industrial la aceeași parametrii. Nu s-au obținut diferențe majore între cele două determinări pentru același material. Astfel valorile obținute pentru  $R_m$  și  $R_{p0,2}$  în condiții industriale sunt cu aproximativ 5MPa mai mari, decât cele pentru care tratamentul termic s-a realizat în condiții de laborator. Pentru alungire valorile pentru care tratamentul termic s-a realizat industrial sunt mai mici cu aprox. 6%.

### **6.1.3 Concluzii desprinse din cercetările experimentale privind caracterizarea structurală a tablelor din aliaj de aluminiu tip 3003 placat cu aliaje din seria 4xxx**

Au fost efectuate analize structurale complexe deosebit de importante în stabilirea fiabilității produselor metalice investigate, precum și în prognozarea unei comportări în exploatare în concordanță cu cerințele impuse. Analizele efectuate au condus la identificarea modificărilor structurale ale produselor din aliaj de aluminiu tip 3003 (aflat în diferite stări), brazate cu diferite tipuri de aliaje de aluminiu din seria 4xxx, respectiv: determinarea mărimii de grăunte înainte și după simularea procesului de brazare, determinarea distribuției fazelor, determinarea grosimii stratului de placare și identificarea zonei „brown band”, adică elemente structurale cantitative și calitative care definesc această zonă.

- **Analiza microstructurală a straturilor de placare a aliajului de aluminiu 3003 cu aliaj de aluminiu 4045** a permis identificarea unei distribuții uniforme a precipitatelor atât în materialul de bază (respectiv aliaj 3003), cât și în straturile de placare, aliaj 4045 (superior și inferior de grosimi similare, de circa 75μm). Analiza la microscopul electronic cu baleiaj

(SEM) a arătat modificarea drastică a compoziției chimice locale, în strat conținutul de siliciu putând ajunge până la 14%, pentru a scădea brusc în secțiune pe o distanță de 20-30 $\mu$ m până la 8%, ajungând în materialul de bază la conținutul aliajului tip 3003, de circa 1-2%Si. Analiza privind determinarea mărimii de grăunte înainte și după simularea procesului de brazare a evidențiat faptul că indiferent de starea aliajului 3003 (H24, sau O) mărimea de grăunte este de circa 79 $\mu$ m (clasa 4.5, conform ASTM E112), iar prin creșterea duratei de menținere la o ora, mărimea de grăunte se finisează, ajungând la circa 85 $\mu$ m, (clasa 4, conform ASTM E112).

- **Analiza detaliată microstructurală a straturilor de placare din aliaj tip 3003, cu aliaj de aluminiu tip 4343**, grosime 0,3mm a arătat faptul că atât pe direcție plană, cât și pe direcție longitudinală și/sau transversală, se evidențiază o distribuție uniformă a fazelor de MnAl<sub>6</sub> și  $\alpha$ (AlMnSi), majoritatea fazelor de MnAl<sub>6</sub> și  $\alpha$ AlMnSi sunt sfericizate, distribuite relativ uniform, Precipitatul (de Mn) este fin și uniform distribuit în toată secțiunea probelor analizate. Analiza la microscopul electronic cu baleiaj (SEM) a evidențiat faptul că în strat conținutul de siliciu poate ajunge până la 13,38% și poate scădea brusc în secțiune pe o distanță de 30 $\mu$ m până la 4,78%, ajungând în materialul de bază la conținutul aliajului 3003, de circa 1-2%Si. Dimensiunea "brown band" pentru probe din aliaj 3003LLplacat cu 4343grosimea 0,3mm – secțiune transversală (LT-ST), supuse brazării, conform specificației Behr și atacate electrolic, a fost cuprinsă între 27,37 $\mu$ m și 49,25  $\mu$ m, cu o medie, realizată pe 17 măsuratori de 38,43  $\mu$ m, care reprezintă 12,81% din grosimea totală a tablei de 0,3mm. Grosimea stratului de placare (pentru fața placată) pentru probele pregătite (secțiune transversală, LT-ST) s-a încadrat în valoarea impusă de 8,5% $\pm$ 1,5% . Analiza privind determinarea mărimii de grăunte înainte și după simularea procesului de brazare a evidențiat faptul că după simulare 600°C, timp de 10 minute, mărimea medie de grăunte a fost de 78,65 $\mu$ m (clasa 4,5, conform ASTM E112), iar după creșterea duratei de menținere la 600°C timp de o oră, mărimea medie de grăunte a fost de 84,19 $\mu$ m (clasa 4, conform ASTM E112).
- **Analiza detaliată microstructurală a straturilor de placare din aliaj tip 3003, cu aliaj de aluminiu tip 4004**, grosime 0,98mm a arătat faptul că precipitatele au o distribuție uniformă atât în materialul de bază (respectiv aliaj 3003), cât și în straturile de placare, aliaj 4004 (superior și inferior de grosimi similare, de circa 80 $\mu$ m). Analiza la microscopul electronic cu baleiaj (SEM) a arătat faptul că în strat conținutul de siliciu poate ajunge până la 14% și poate scădea brusc în secțiune pe o distanță de 20-30 $\mu$ m până la 3%, ajungând în materialul de bază la conținutul aliajului 3003, de circa 0,5 $\div$ 2%Si. Analiza privind determinarea mărimii de grăunte, după simularea procesului de brazare la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, a evidențiat o mărime medie de grăunte 76,29 $\mu$ m (clasa 4,5, conform ASTM E112) , iar la creșterea duratei de menținere la 600°C de 1 oră mărimea medie de grăunte a devenit de 88,57 $\mu$ m (clasa 4,0, conform ASTM E112). Aceeași analiză pentru determinarea mărimii de grăunte a tablelor din 3003, placate cu 4004, dar în stare O, după procesului de simulare al brazării, la temperatura de 600°C, timp de 10 minute, a evidențiat o mărime medie de grăunte a fost de 76,66 $\mu$ m (clasa 4,5, conform ASTM E112) și o mărime de grăunte de grăunte a fost de 84,31 $\mu$ m (clasa 4,0, conform ASTM E112), după creșterea duratei procesului de brazare la 1 oră.
- **Analiză comparativă a valorilor mărimii de grăunte** a tablelor din aliaj 3003 placat cu diferite aliaje din seria 4xxx a arătat faptul că după simularea procesului de brazare la 600°C /10 minute în toate situațiile mărimea de grăunte a fost de până la 80 $\mu$ m (adică clasa 4.5 conform ASTM E112), iar prin creșterea duratei de menținere la 1 oră mărimea de grăunte se finisează, având valori peste 80 $\mu$ m (clasa 4 conform ASTM E112).



#### **6.1.4 Concluzii privind comportarea la coroziune a tablelor din aliaj de aluminiu tip 3003 brazat cu aliaje din seria 4xxx**

**Cercetările experimentale** au fost efectuate în vederea stabilirii unei corelații relevante între starea de livrare, potențialul de coroziune și structura metalografică la aliajele de aluminiu (seriile 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx). În aceste sens s-au observat:

- La aliajele din seria 2xxx s-a obținut cel mai mic  $X_{mean} = -618,8mV$ .
- La aliajul 3003 se observă o stabilitate din punct de vedere al potențialului de coroziune, probele analizate, atât cele din table, cât și cele provenite din plăci (indiferent dacă este vorba de fața frezată sau cea laminată) au aproximativ aceleași valori, probele fiind corespunzătoare conform ASTM G69.
- La aliajele din seria 5xxx ca și la 3003 valorile potențialului sunt apropiate, atât între fața frezată și cea laminată cât și între intervalele de măsurare 30 sau 60 de minute.
- La aliajele din seria 6xxx s-a obținut cel mai mare  $X_{mean} = -988,8mV$ . De asemenea la aceste aliaje se observă cele mai mari diferențe între aliaje cu aceleași stări de livrare dar și la aliajele cu stări de livrare diferite (atât pe fața laminată cât și pe fața frezată).
- La aliajele din seria 7xxx, se observă diferențe destul de mari între aliajele cu aceeași stare de livrare dar compoziție chimică diferită și între fața frezată și cea laminată. Doar la aliajul 7075 nu sunt diferențe notabile între fața frezată și cea laminată.

**Cercetări privind determinarea potențialelor de coroziune** a aliajului 3003 placat cu aliaje din seria 4000, în diferite stări ale suprafeței tablelor au evidențiat faptul că:

- Starea materialului influențează valoarea potențialelor de coroziune, astfel: cele mai mici valori se înregistrează pentru starea de livrare, apoi pentru starea curățat chimic și cele mai mari valori pentru starea postbrazare, pentru toate aliajele brazate) în această ordine ierarhică). Această comportare este similară pentru ambele valori ale duratei de menținere la brazare (respectiv 30 și 60 minute), cu mențiunea că la creșterea duratei de menținere la brazare are loc creșterea valorilor potențialelor de coroziune;
- Prin diferitele procedee de prelucrare a suprafeței aliajelor 3003 placat cu diferite aliaje din seria 4000, valorile potențialelor de coroziune se modifică cu aproximativ 20%, fiind situate în domeniul  $-777 eV \div +698 eV$ . Această modificare de potențial de coroziune nu scoate din clasa de rezistență la coroziune aceste aliaje, valoarea potențialului fiind relativ mică;
- Se poate face o ierarhizare a rezistenței la coroziune a aliajelor 3003 brazate cu aliaje din seria 4000, astfel: cel mai rezistent este aliajul 3003/4045, urmat de 3003/4004 și 3003/4343.

Cercetările privind determinarea potențialelor de coroziune a tablelor din aliaj 3003, de diferite grosimi, funcție de mărimea de găunte au permis formularea unor concluzii interesante:

- pe măsura creșterii grosimii tablei se observă o creștere a granulației, respectiv de la  $63\mu m$  (la grosime 0,3mm), până la  $200\mu m$  (la 2,5mm),
- pe măsura creșterii grosimii tablei, potențialele sunt uneori mai electronegative, valorile potențialelor de coroziune medii aflându-se în domeniul  $-721 (mV) \div -766 (mV)$ .

**Studiul de caz** efectuat pe un radiator de tractor, care a fost scos din uz după 6 ani de funcționare, a permis formularea următoarelor concluzii:

- au fost evidențiate atât dimensiunile zonei brazate ale aripioarelor, respectiv o lungime medie a aripioarelor de circa  $410\mu m$  și o lățime de circa  $65-70\mu m$ ,
- a fost identificat fenomenul de coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular, atât pe partea inferioară, cât și pe partea superioară a aripioarelor, cu evidențierea distrugerii parțiale a zonei brazate pe porțiuni cuprinse în domeniul  $50-100\mu m$ .

## 6.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE

- Realizarea unei analize complexe a caracteristicilor mecanice statistice pentru produsele din aliaj de aluminiu tip 3003 placat cu aliaj din seria 4xxx, în funcție de caracteristicile de fabricație, considerație cunoscându-se, pe de o parte multitudinea factorilor care pot influența comportarea mecanică a acestor produse, și, pe de altă parte, pentru a vedea reproductibilitatea rezultatelor de-a lungul diferitelor perioade de procesare ale acestor produse în cadrul ALRO Slatina;
- Determinarea unei ecuații de regresie pentru produsele placate, aliaj de baza 3003, starea O: respectiv:  $R_m = 90,81 + 9,15 \cdot Si + 6,37 \cdot Fe + 60,26 \cdot Cu + 5,48 \cdot Mn$ , cu o valoare a coeficientului de determinare de 0,90, ecuația de regresie valabilă pentru o compoziție chimică de:  $Si \in [0,07 \div 0,60\%]$ ,  $Fe \in [0,10 \div 0,70\%]$ ,  $Cu \in [0,05 \div 0,75 \%]$  și  $Mn \in [0,18 \div 1,5\%]$ ;
- Efectuarea unor experimentări în condiții de laborator pentru optimizarea tratamentelor termice aplicate produselor placate din aliaj de alumina tip 3003, prin care este permisă reducerea cheltuielilor de producție, fără periclitatea valorilor de caracteristici mecanice ale produselor tratate termice
- Efectuarea unei analize structurale complexe care au condus la identificarea modificărilor structurale ale produselor din aliaj de aluminiu tip 3003 (aflat în diferite stări), brazate cu diferite tipuri de aliaje de aluminiu din seria 4xxx, respectiv: determinarea mărimii de găunte înainte și după simularea procesului de brazare, determinarea distribuției fazelor, determinarea grosimii stratului de placare și identificarea zonei „brown band”, adică elemente structurale cantitative și calitative care definesc această zonă;
- Evidențierea comportării la coroziune a tablelor din aliaj de aluminiu tip 3003 brazat cu aliaje din seria 4xxx prin stabilirea unei corelații relevante între starea de livrare, potențialul de coroziune și structura metalografică la aliajele de aluminiu (seriile 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx);
- Determinarea comparativă a potențialelor de coroziune a aliajului de aluminiu tip 3003 placat cu aliaje din seria 4000, realizându-se o ierarhizare a stării de rezistență pe diferite grosimi, funcție de mărimea de găunte, astfel încât pe măsura creșterii grosimii tablei are loc creșterea granulației, respectiv de la  $63\mu m$  (la grosime 0,3mm), până la  $200\mu m$  (la 2,5mm), și, totodată pe măsura creșterii grosimii tablei, potențialele pot fi uneori mai electronegative, valorile potențialelor de coroziune medii aflându-se în domeniul  $-721$  (mV)  $\div$   $-766$  (mV).
- Realizarea unui studiu de caz pe un radiator de tractor, care a fost scos din uz după 6 ani de funcționare, evidențiindu-se atât dimensiunile zonei brazate ale aripioarelor, respectiv o lungime medie a aripioarelor de circa  $410\mu m$  și o lățime de circa  $65-70\mu m$ , cât și identificarea fenomenului de coroziune generală a tubulaturii cu aspect intergranular, atât pe partea inferioară, cât și pe partea superioară a aripioarelor, cu distrugerea parțial a zonei de brazare într-un domeniu  $50-100\mu m$ .

## 6.3 DIRECȚII ȘI PERSPECTIVE ALE CERCETĂRILOR VIITOARE

- În timpul cercetării din cadrul tezei de doctorat au fost identificate unele aspecte, noi sau actuale, care pot fi luate în considerare sau îmbunătățite.
- Aliajele de aluminiu constituie în continuare surse ale unor viitoare cercetări experimentale privind explorarea performanțelor lor în domeniul rezistenței la coroziune ale diferitelor componente structurale .
- Totodată se poate promova analiza de statistică complexă extinsă pe diferite perioade, sau diferite clase de aliaje de aluminiu, în vederea identificării reproductibilității rezultatelor industrial din cadrul companiei ALRO Slatina.

➤ Se poate propune, de asemenea, utilizarea tehnicilor specifice stereomicroscopiei în evaluarea stării suprafețelor fie de deformare plastică, fie de tratament termic interimar sau final efectuat pe produse placate din alte tipuri aliaje de aluminiu.

## LISTA DE LUCRARI PUBLICATE IN DOMENIUL TEZEI DE DOCTORAT

**Claudia Alina LAZAR (NATRA)**

### 1. ARTICOLE PUBLICATE - în reviste de specialitate de circulație internațională recunoscute cotate ISI sau indexate în baze de date internaționale specifice domeniului

- [1.1] Ghiban, B, **Natra, CA**, Popescu, G- **CORROSION POTENTIALS OF THE ALUMINUM ALLOYS** , UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN SERIES B-CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE , Volume: 79 , Issue: 4 , Pages: 39-244 , Published: 2017
- [1.2] Ghiban, B, Popescu, G, **Lazar, C**, Rosu, L;Constantin, I.,Olaru, M;Carlan, B.) - **Corrosion Behaviour in Human Stimulation Media of a High Entropy Titan-Based Alloy**, Volume: 374,Conference: EUROINVENT International Conference on Innovative Research (ICIR), Iasi, ROMANIA, 17-18 MAI, 2018
- [1.3] Ghiban, B, **Natra, C.** – **Brown band characteristics of aluminum cladding alloys**, Volume 572, Issue 1, 2 August 2019, Article number 0120342019 International Conference on Innovative Research, ICIR EUROINVENT 2019; Palace of Culture Iasi; Romania; 16 May 2019 through 17 May 2019; Code 150123
- [1.4] Ghiban, B., **Natra, C.**, Cernea, A., Raiciu, A.D., Odagiu, O., Balkan, I.-**Structural investigations concerning Al 3003/Al 4xxx clad materials**, UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science, Volume 81, Issue 4, 2019, Pages 281-290
- [1.5] **C. Lazar (Natra)**, D Istrate, O P Odagiu, A M Demian, A D Buzatu, B Ghiban- **Evaluation of mechanical characteristics of 3003 aluminum alloy plated sheets**, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, an open-access proceedings journal, with abstracting and indexing in ISI Web of Science (Conference Proceedings Citation Index), 2022 (lucrare recenzată și aprobată spre publicare).

### 2. Articole prezentate în cadrul unui eveniment științific

- [2.1]. B. GHIBAN, C. NATRA, - **Structural investigations of brown band of Aluminum 3003/Al 4xxx clad materials 11th International Conference on Materials Science and Engineering – BraMat 2019**, prezentare orală, I.P.O.11. 11th International Conference on Materials Science and Engineering – BraMat 2019
- [2.2]. B. Ghiban, C. NATRA -**Structural investigations concerning Al 3003/Al 4xxx clad materials**, poster, ROMAT 2018
- [2.3]. **C. Lazar (Natra)**, D Istrate, O P Odagiu, A M Demian, A D Buzatu, B Ghiban- **Evaluation of mechanical characteristics of 3003 aluminum alloy plated sheets**, ACME, 9-10 iunie 2022- Iași

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- G. Cole, A. Glove, R. Jeryan, G. Davies, *Steel World* 2 (1)(1997) 75–83.
- Morita, Aluminium alloys for automobile applications, in: Proc. of ICAA-6, Toyohashi, Japan, 5–10 July 1998, in: *Aluminium Alloys*, vol. 1, 1998, pp. 25–32.
- C.T.W. Lahaye, W.C. Emmens, J. Bottema, F. Schoepen, G. Verhoeven, Influence of substrate texture on forming and paint appearance of aluminium sheet material, in: *Conf. Proc. IBEC'97*, 1997, pp. 107–114.
- C.T.W. Lahaye, J. Soderlund, G. Koelewijn, Development of an aluminium bonnet for SAAB 9-3, in: *Conf. Proc. of 32<sup>nd</sup> ISATA*, SAE Technical Paper Series 99NM065, 1999.
- R.K. Bollingbroke, A. Gray, D. Lauzon, Optimisation of nocolok brazing conditions for higher strength brazing sheet, *VTM 3 Conf.*, Indianapolis, USA, SAE Paper 971861, 1997.
- N.D.A. Kooij, J. Sontgerath, A. Burger, K. Vieregge, A. Haszler, New high strength alloys for brazing with long life corrosion properties, *VTMS 3 Conf.*, Indianapolis, USA, SAE Paper 971862, 1997.
- T.J. Hurd, A. Burger, N.D.A. Kooij, K. Vieregge, A. Haszler, New alloy development in aluminium brazing sheet, in: *Proc. of ICAA-6*, Toyohashi, Japan, 1998, pp. 1979–1984.
- N.D.A. Kooij, T.J. Hurd, A. Burger, K. Vieregge, A. Haszler, High strength heat-treatable aluminium alloys for CAB brazing, *VTMS 4 Conf.*, London, UK, SAE Paper C543/014/99, 1999.
- El-Sayed, M.H.; Naka, M.: *Structure and Properties of Carbon Steel-Aluminium Dissimilar Joints*. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, vol. 10, no. 1.
- Agudo, L.; Jank, N.; Wagner, J.; Weber, S.; Schmaranzer, C.; Arenholz, E.; Bruckner, J.; Hacki, H.; Pyzalla, A.: *Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Steel-Aluminium Joints Produced by Metal Arc Joining*. *Steel research int.*, 2008, vol. 79, no. 7.
- Ghiban, B., Natra, CA, Popescu, G- *CORROSION POTENTIALS OF THE ALUMINUM ALLOYS* , UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN SERIES B-CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE , Volume: 79 , Issue: 4 , Pages: 39-244 , Published: 2017
- Ghiban, B, Popescu, G, Lazar, C, Rosu, L;Constantin, I.,Olaru, M;Carlan, B.) - Corrosion Behaviour in Human Stimulation Media of a High Entropy Titan-Based Alloy, Volume: 374, Conference: EUROINVENT International Conference on Innovative Research (ICIR), Iasi, ROMANIA, 17-18 MAI, 2018
- Ghiban, B, Natra, C. - Brown band characteristics of aluminum cladding alloys, Volume 572, Issue 1, 2 August 2019, Article number 0120342019 International Conference on Innovative Research, ICIR EUROINVENT 2019; Palace of Culture Iasi; Romania; 16 May 2019 through 17 May 2019; Code 150123
- Ghiban, B., Natra, C., Cernea, A., Raiciu, A.D., Odagiu, O., Balkan, I.-Structural investigations concerning Al 3003/Al 4xxx clad materials, *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, Volume 81, Issue 4, 2019, Pages 281-290
- Bordo K. et al - Electrochemical profiling of multi-clad aluminium sheets used in automotive heat exchangers. *Corrosion Science*, 131: 28–37, 2018.
- Donatus U et al - Corrosion pathways in aluminium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27: 55–62, 2017.
- Ghiban B, Natra C - Brown band characteristics of aluminium cladding alloys. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 572:012034. 2019.
- Hirsch J - Aluminium in innovative light-weight car design. *Proc Innovative Development for Lightweight Vehicle Structures*. Wolfsburg, Germany: VW, 2009: 101.
- Kim HW et al - Mechanical Properties of Al/Al-Mg/Al Clad Sheets Fabricated by Roll Bonding Process. *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*. Pp. 1978-1983. 2010.
- Kucharikova L et al - Role of Chemical Composition in Corrosion of Aluminium Alloys. *Metals - Open Access Metallurgy Journal* . 8(8):581. 2018.

**STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ ȘI DE REZISTENȚĂ LA  
COROZIUNE A ALIAJELOR DE ALUMINIU BRAZATE PENTRU SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ ÎN INDUSTRIA  
AUTOMOBILELOR**

- Zhang X et al - Microstructure and Properties of Cladding Layers Prepared by Argon-Shielded Arc Cladding of CuZn40-WC Powders on Pure Aluminium Substrate. *Coatings*. 8(11):382. 2018.
- M.A. Pech-Canul, J.C. Guía-Tello , M.I. Pech-Canul , J.C. Aguilar , J.A. Gorocica-Díaz , R. Arana-Guillén , J. Puch-Bleis, Electrochemical behavior of tube-fin assembly for an aluminum automotive condenser with improved corrosion resistance, *Results in Physics* , Volume 7, 2017, Pages 1760-1777
- M. Melander , R. Woods, Corrosion Study of Brazed Aluminum Radiators Retrieved from Cars After Field Service, *CORROSION*, vol 66, nr. 1 2010, 0150005-1-14
- ASTM G85-09, “Standard Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing” (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009).
- ASTM B117-09, “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus” (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009).
- ASTM B368-09, “Standard Test Method for Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing (CASS Test)” (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009).
- Gray, C. Pargeter, “Waterside Corrosion Testing of Aluminum Heat Exchangers—Will There Ever Be A Globally Accepted Test?,” AFC-Holcroft Invitational Seminar (Wixom, MI: AFC-Holcroft, 2007).
- M. Melander, R. Woods, “A Corrosion Study of Field-Retrieved CAB-Brazed Automobile Condensers,” *Vehicle Thermal Management Systems (VTMS)-8 Conference Proc.*, paper no. C640/076/ 2007 (London, U.K.: Institution of Mechanical Engineers, 2007).
- M. Melander, “A Corrosion Study of Field-Retrieved Automobile Evaporators,” *5th Int. Congress on Aluminum Brazing* (Dusseldorf, Germany: Aluminum-Verlag, 2006).
- M.A. Pech-Canul, J.C. Guía-Tello, M.I. Pech-Canul, J.C. Aguilar, J.A. Gorocica-Díaz, R. Arana-Guillén, Puch-Bleis- Electrochemical behavior of tube-fin assembly for an aluminum automotive condenser with improved corrosion resistance, *Results in Physics* Volume 7, 2017, Pages 1760-1777
- Miller WS, Zhuang L, Bottema J, Witterbrood AJ, De Smet P, Haszler A, Vieregge A. Recent development in aluminum alloys for the automotive industry. *Mater Sci Eng A* 2000;280:37–49.
- Hirsch J. Recent development in aluminum for automotive applications. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2014;24:1995–2002.
- Tait RD, Rogers CJ, Cottone AJ, Henkes JP, Saperstein ZP. Corrosion resistance of the as brazed pf heat exchanger as achieved by alloy selection. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers [SAE]; 1991. SAE technical paper 910594.
- Yoon S, Kim H, Lee Ch. Fabrication of automotive heat exchanger using kinetic spraying process. *Surf Coat Technol* 2007;201:9524–32.
- Parundekar, G, Chavan, A. Corrosion life improvement of all aluminum micro channel heat exchangers (MCHX) in HVAC&R industry, Paper CSD-01, International Corrosion Conference and Expo CORCON2015. NACE International Gateway India Section; 2015.
- Sugiura S, Toyama T, Mutou S, Matsuura S, Yamaguchi H. Development of a Cooling Module Containing a Radiator and a Condenser. Part 2 Alloy Development. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers [SAE]; 2001. SAE Technical Paper 2001-01-1019.
- Mundt R, Koblenz H. Introduction to Brazing of aluminum alloys. European Aluminum Association; 1994. TALAT Lecture 4601.
- ASTM G85-09. Standard practice for modified salt spray (Fog) testing. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2009.
- Afshar FN, de Wit JHW, Terryn H, Mol JMC. The effect of brazing process on microstructure evolution and corrosion performance of a modified AA4XXX/ AA3XXX brazing sheet. *Corros Sci* 2012;58:242–50.
- Meijers S. Corrosion of aluminum brazing sheet [Ph.D. thesis]. Delf University of Technology; 2002. [19] Vander Voort GF. *ASM handbook volume 9: metallography and microstructures*. ASM International; 2004.
- Sekulic´ DP, Galenko PK, Krivilyov MD, Walker L, Gao F. Dendritic growth in AlSi alloys during brazing. Part 1: experimental evidence and kinetics. *Int J Heat Mass Transfer* 2005;48:2372–84.

- Zhao H, Woods R. Controlled atmosphere brazing of aluminum. In: Sekulic' DP, editor. Advances in brazing, science, technology and applications. Woodhead Publishing Ltd.; 2013.
- Lacaze J, Tierce S, Lafont M-C, Thebault Y, Mankowski G, Blanc C, Robidou H, Vaumousse D, Pébère N, Daloz D. Study of the microstructure resulting from brazed aluminum materials used in heat exchangers. Mater Sci Eng A 2005;413-414:317-21.
- Tierce S, Pébère N, Blanc C, Mankowski G, Robidou H, Vaumousse D, Lacaze J. Solidification and phase transformations in brazed aluminum alloys used in automotive heat exchangers. Int J Cast Met Res 2005;18:370-6.
- Davoodi A, Pan J, Leygraf C, Norgren S. The role of intermetallic particles in localized corrosion of an aluminum alloy studied by SKPFM and integrated AFM/SECM. J Electrochem Soc 2008;155:C211-8.
- Marshall GJ, Bolingbroke RK, Gray A. Microstructural control in an aluminum core alloy for brazing sheet applications. Metall Trans A 1993;24A:1935-42.
- Schäuble K. Silica passivation layer on aluminium brazing sheets [Doctoral dissertation]. University of Köln; 2010.
- Brett CMA. The application of electrochemical impedance techniques to aluminum corrosion in acidic chloride solutions. J Appl Electrochem 1990;20:1000-3.
- Lenderink HJW, Linden MVD, de Wit JHW. Corrosion of aluminum in acidic and neutral solutions. Electrochim Acta 1993;38:1989-92. [29] Metikoš-Hukovic' M, Babic' R. Impedance spectroscopic study of aluminum and Al-alloys in acid solution: inhibitory action of nitrogen containing compounds. J Appl Electrochem 1994;24:772-8.
- Garrigues L, Pebere N, Dabosi F. An investigation of the corrosion inhibition of pure aluminum in neutral and acidic chloride solutions. Electrochim Acta 1996;41:1209-15.
- Metikoš-Hukovic' M, Babic' R, Grubac' Z. The study of aluminum corrosion in acidic solution with nontoxic inhibitors. J Appl Electrochem 2002;32:35-41.
- Bessone J, Mayer C, Jüttner K, Lorenz WJ. AC-impedance measurements on aluminum barrier type oxide films. Electrochim Acta 1983;28:171-5. [33] Harrington DA, Conway BE. AC-impedance of faradaic reactions involving electrosorbed intermediates-I. Kinetic theory. Electrochim Acta 1987;32:1703-12.
- Harrington DA, Van den Driessche P. Stability and electrochemical impedance of mechanisms with a single adsorbed species. J Electroanal Chem 2001;501:222-34.
- Córdoba-Torres P, Mesquita TJ, Devos O, Tribollet B, Roche V, Nogueira RP. On the intrinsic coupling between constant-phase element parameters  $a$  and  $Q_{in}$  electrochemical impedance spectroscopy. Electrochim Acta 2012;72:172-8.
- Aoki IV, Bernard M-C, Cordoba de Torresi SI, Deslouis C, de Melo HG, Joiret S, Tribollet B. AC-impedance and Raman spectroscopy study of the electrochemical behavior of pure aluminum in citric acid. Electrochim Acta 2001;46:1871-8.
- Lee S, White HS. Dissolution of the native oxide film on polycrystalline and single-crystal aluminum in NaCl solutions. J Electrochem Soc 2004;151: B479-83.
- Shi Q, Liang F, Cheadle B. Electrochemical behaviors of quad-layer aluminum brazing sheet composite for automotive applications. Corrosion 2004;60:492-500.
- Afshar FN, Ambat R, Kwakernaak C, de Wit JHW, Mol JMC, Terryn H. Electrochemical depth profiling of multilayer metallic structures: an aluminum brazing sheet. Electrochim Acta 2012;77:285-93.
- Flatoy Jarl Erik Morsund, *Process- and Alloy Development of Recyclable Aluminium Alloys: Recovery and Recrystallization Behavior of a Selection of AlMn-model Alloys*, master thesis, 2011, Norwegian University of Science and Technology.