#### Raport științific final

(2022 - 2024)

Competiția:	Proiect experimental demonstrativ - PED 2021
Nr. contract:	593PED / 01.07.2022
Cod proiect:	PN-III-P2-2.1-PED-2021-0723
Domeniul de cercetare:	4.3 - Materiale avansate
Titlul :	Model demonstrativ de tehnologie de procesare termomecanică a aliajul inoxidabil super-duplex UNS S32750 / F53 / 1.4410
Acronim:	SDSS-ThermProTech
Dată începere proiect:	01/07/2022
Dată finalizare proiect:	30/06/2024
Durata (luni):	24
Buget total:	598.795,00
Sursa 1 Bugetul de stat	598.795,00
Sursa 2 Alte surse atrase (cofinanțare):	0,00
Pagina web proiect:	http://www.mdef.pub.ro/research/SDSS-ThermProTech/index.html
Instituția coordonatoare:	UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCURESTI
Director de proiect:	Vasile Dănuț COJOCARU

# 1. Prezentare generală a realizării obiectivelor proiectului, cu punerea în evidență a rezultatelor și gradul de realizare a obiectivelor. Prezentarea trebuie să includă explicații care să justifice diferențele (dacă există) dintre activitățile preconizate și cele realizate.

Obiectivul general al proiectului se referă la obținerea / realizarea unei tehnologii de procesare termomecanică pentru aliajul UNS S32750 / F53 / 1.4410. Pentru atingerea obiectivului general al proiectului a fost necesară îndeplinirea următoarelor obiective științifice și tehnice:

#### A. Obiective ştiințifice:

#### I. Studiul evoluției fazice pentru aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 / Grad de realizare: 100%

#### Rezultate obținute:

Pentru a stabili condițiile optime pentru procesarea și utilizarea corectă a oțelurilor inoxidabile de tip superduplex (*SDSS - Super Duplex Stainless Steel*), astfel încât să fie evitate defectele sau distrugerile de orice fel, este foarte importantă cunoașterea proprietăților mecanice ale acestora (ex. rezistența mecanică, tenacitatea, rezistența la oboseală, tendința de fisurare, etc.), precum și legătura dintre acestea și structura/microstructura asociată. Cercetările efectuate până în prezent au pus în evidență o serie de aspecte care relevă dependența dintre microstructură și proprietățile mecanice, acestea vizând în primul rând efectul procesării termomecanice asupra precipitării de faze secundare și, implicit, asupra caracteristicilor mecanice asociate.

Compoziția chimică și ruta de procesare termomecanică aplicată oțelurilor inoxidabile de tip SDSS trebuie să fie alese astfel încât, în urma procesării, să se obțină fracții volumice de ferită (faza  $\delta$ ) și austenită (faza  $\gamma$ ) în proporții aproximativ egale. În afară de ferită și austenită, în timpul procesării termomecanice la temperaturi ridicate (de până la 1000°C – 1100°C), în microstructura aliajelor de tip SDSS se pot forma o serie de faze secundare, prin precipitare în volumul de ferită. Astfel, au fost observate următoarele faze:  $\sigma$ ,  $\gamma_2$  (austenita secundară),  $\chi$ , faza R, faza  $\pi$ , nitruri (Cr<sub>2</sub>N, CrN), carburi metalice (M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>), etc.

În vederea investigării evoluției fazice la încălzire, în cazul aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, s-au procesat termic un număr de 17 probe, având configurația  $\emptyset$  20 x 3 mm ( $\emptyset$  x h), investigându-se intervalul

de temperatură 900°C – 1300°C, în pași de 25°C, conform datelor prezentate în tabelul A.I.1. Toate probele au fost investigate avansat cu ajutorul analizelor XRD și SEM-EBSD.

Proba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura de încălzire, T [°C]	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100	1125	1150	1175	1200	1225	1250	1275	1300
Durata de mentinere. t [min]		30															
Mediu de răcire		răcire în apă (water quenching – WQ)															

Tabel A.I.1. Parametrii termici utilizați pentru punerea în evidență a evoluției fazice la încălzire a aliajului UNS S32750

Analiza XRD a arătat că faza  $\sigma$  este caracterizată de un sistem cristalin de tip T, la temperatura de 900°C având parametrii de rețea a = 8,82(2)Å și c = 4,59(5)Å, precum și o fracție masică semnificativă (19,62% - XRD; 21,71% - SEM-EBSD) (tabelul A.I.2). De asemenea, analiza XRD a relevat că faza  $\sigma$  este prezentă în microstructură până la temperatura de 1025°C, la temperaturi superioare aceasta fiind nedetectabilă în spectrograma XRD (figura A.I.1).





Comparativ cu starea inițială (AR), analiza SEM-EBSD a arătat că, în urma încălzirii la 900°C, cu o durată de menținere de 30min, se înregistrează o creștere semnificativă a fracției masice de fază  $\gamma$ , de la aprox. 44,94% la 69,80%, concomitent cu o scădere semnificativă a fracției masice de fază  $\delta$ , de la aprox. 55,06% la 8,49%, fapt care confirmă că precipitarea fazei  $\sigma$  are loc, în principal, după o reacție de precipitare eutectoidă, de forma:  $\delta \rightarrow \sigma + \gamma_2$ , unde:  $\gamma_2$  – austenita secundară. Această observație este susținută și de faptul că, în același timp cu precipitarea fazei  $\sigma$ , care atinge o dimensiune medie de grăunte de aprox. 4,3µm, se înregistrează o scădere semnificativă a dimensiunii medii a grăunților de fază  $\delta$ , de la aprox. 13,4µm la 4,9µm (tabelul A.I.2).

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
Parametrii caracteristici	i	Faza $\delta$ (ferita)	Faza $\gamma$ (austenita)	Faza $\sigma$
Fracția masică [wt%] - XR	8,12	72,32	19,62	
Fracția masică [wt%] – SEM-	8,49	69,80	21,71	
	a [Å]	2,88(1)	3,61(5)	8,82(2)
Parametrui de rețea cristalină	c [Å]	-	-	4,59(5)
Microdeformația la nivel de rețea cri	0,03(9)	0,03(6)	0,08(2)	
Dimensiunea medie de grăunt	4,9	14,8	4,3	

Tabel A.I.2. Parametrii microstructurali XRD și SEM-EBSD pentru aliajul UNS S32750 tratat la 900°C-30min-WQ

În figura A.I.2 se prezintă evoluția la încălzire, în domeniul 900°C (figura A.I.2a) – 1025°C (figura A.I.2f), a microstructurii aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53. Se observă că la temperatura de 900°C este prezentă faza secundară  $\sigma$ , fapt care confirmă observațiile XRD (figura A.I.1), fracția masică a acesteia descrescând cu creșterea temperaturii (observație confirmată de ambele analize XRD și SEM-EBSD). Faza secundară  $\sigma$  este detectată în microstructură până la temperatura de 1025°C (figura A.I.2f).

Evoluția la încălzire în domeniul de temperatură cuprins între 1025°C – 1300°C este prezentată în figura A.I.3. Analizele XRD și SEM-EBSD arată că, în acest domeniu de încălzire are loc o creștere continuă a fracției masice de fază  $\delta$ , concomitent cu scăderea fracției masice de fază  $\gamma$ , din cauza transformării de fază  $\delta \rightarrow \gamma$ . De asemenea, se observă că pentru ambele faze ( $\delta$ și  $\gamma$ ) se înregistrează o creștere a dimensiunii medii de grăunte, cea mai pronunțată creștere fiind observată în cazul fazei  $\delta$ .



În interpretarea datelor obținute, trebuie să se țină cont de următoarele considerente generale legate de comportamentul mecanic:

- proprietățile mecanice sunt determinate de constituția fazică raportul masic al fazelor constituente (phase mixture law); se cunoaște că, în cazul aliajelor de tip SDSS, faza δ (ferita) este "răspunzătoare" de proprietățile de rezistența ale aliajului, în timp ce faza γ (austenita) este "răspunzătoare" de proprietățile de ductilitate ale aliajului; pentru o combinație adecvată de proprietăți de rezistență/plasticitate este de preferat existența unei microstructuri în care raportul fracțiilor masice de faze δ / γ să fie aprox. egal;
- comportamentul mecanic este determinat de dimensiunea medie a grăunților fazelor constituente; se cunoaște că, atât proprietățile de rezistență, cât și proprietățile de ductilitate sunt invers proporționale cu dimensiunea de grăunte (*Hall-Petch law*); din aceste considerente este de preferat existența unei microstructuri în care raportul dimensiunilor medii de grăunte ale fazelor δ / γ să fie aprox. egal.

**Concluzii.** Având în vedere cele mai sus menționate, rezultă că intervalul de temperatură în care trebuie investigată deformabilitatea aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 este reprezentat de domeniul: 1050°C – 1300°C.

#### II. Studiul capacității de deformare a aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410 / Grad de realizare: 100%

#### Rezultate obținute:

#### Determinarea plasticității aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53

Prin plasticitate se poate înțelege capacitatea materialelor metalice de a se deforma plastic, adică de a-și schimba forma inițială sub acțiunea unui câmp exterior de solicitare, fără a-și distruge integritatea (fără apariția de defecte de integritate, cum ar fi: microfisuri, fisuri, crăpături, etc). Printre principalii factori care influențează valoarea plasticității materialelor metalice fac parte: structura fazică și condițiile de procesare termomecanică (temperatura de deformare, viteza de deformație și schema de tensiune aplicată).

Având în vedere că procesele de deformare plastică sunt foarte diferite, din punct de vedere al schemei mecanice de deformare și al condițiilor în care diferiți factori influențează plasticitatea materialelor metalice supuse deformării, până în momentul de față nu s-a reușit să se găsească o metodă universal valabilă de determinare, și ca atare, nu există nicio mărime care să dea o valoare absolută și reală pentru plasticitate. Din acest motiv, plasticitatea se estimează folosind mai multe metode indirecte, mai mult sau mai puțin caracteristice condițiilor concrete ale proceselor de deformare plastică, cum ar fi: refularea, încercarea la tracțiune, încercarea la torsiune etc. Valorile astfel obținute pot fi folosite numai pentru compararea comportării la deformare a unor materiale metalice față de altele.

Metoda refulării este cea mai folosită metodă experimentală pentru determinarea indicilor de plasticitate (gradului admisibil de deformare), deoarece prezintă următoarele avantaje: simplitate în efectuarea operațiilor, schema stării de tensiune și viteza de deformare sunt practic aceleași ca cele obținute în cazurile reale de deformare plastică prin forjare/matrițare (forjarea și matrițarea fiind cele mai utilizate metode de deformare plastică aplicate la scară industrială în producerea de piese), se poate realiza la viteze de deformare impuse de cele care se practică în tehnologiile reale și, totodată, permite nu numai găsirea intervalului optim al temperaturilor de deformare plastică, ci și determinarea valorilor absolute ale indicilor de plasticitate (cel al gradului admisibil de deformare).

Programul experimental de determinare a indicilor de plasticitate (a gradului admisibil de deformare) a presupus realizarea de experimente de refulare la sonetă (ciocanul cu cădere liberă), cu patru energii de lovire constante. Experimentele de refulare s-au efectuat cu o masă căzătoare de 117kg și patru înălțimi diferite de cădere: 0,5, 1,0, 1,5 și 2,0m.

Determinarea indicilor de plasticitate (gradul admisibil de deformare) a presupus realizarea de experimente de refulare la sonetă, la temperaturi de deformare cuprinse în intervalul 1050°C - 1300°C, în pași de 50°C, cu o masă căzătoare de 117kg și înălțimile de cădere de 0,5, 1,0, 1,5 și 2,0m (tabelul A.II.1). Epruvetele din aliajul UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 au avut dimensiunile inițiale de  $\emptyset$ 20 x 30 mm (raportul h/d = 1,5) (tabelul A.II.1). Toate epruvetele folosite au avut suprafața laterală fin prelucrată și fără defecte. După controlul inițial, epruvetele s-au încălzit la temperaturile de încercare și au fost supuse refulării la sonetă.

Masa parții căzătoare, m [kg]	117						
Înălțimea de cădere, H [m]	0,50	1,00	1,50	2,00			
Randamentul ciocanului, η [%]	~ 95	~ 89	~ 86	~ 83			
Energia de lovire, E* [J, Nm]	545,19	1.021,52	1.480,62	1.905,30			

 Tabel A.II.1. Parametrii experimentali folosiți pentru determinarea indicilor de plasticitate în cazul aliajului UNS S32750

 Masa narții căzătoare m Ikal

Rezultatele experimentale măsurate și calculate, obținute în urma încercărilor de refulare a epruvetelor confecționate din aliajul UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, pentru temperaturile de deformare de 1050°C, 1100°C, 1150°C, 1200°C, 1250°C și 1300°C sunt prezentate centralizat în tabelul A.II.2.

Proba	Temperatura de refulare, T [°C]	Energia de lovire, E* [J, Nm]	Gradul de deformare, ε[%]	Rezistența la deformare, $\sigma'_c$ [N/mm², MPa]	Lucrul mecanic specific, A* [Nm/mm³; J/mm³]
Proba 1	1050	545,2	16,52	321,97	0,35
Proba 2		1.021,5	28,77	339,17	0,38
Proba 3		1.480,6	39,67	346,72	0,40
Proba 4		1.905,3	48,06	357,09	0,42

**Tabel A.II.2.** Rezultatele experimentale obținute la temperatura de deformare de 1050°C

Proba 5		545,2	18,73	283,03	0,31
Proba 6	1100	1.021,5	33,10	291,89	0,33
Proba 7	1100	1.480,6	44,41	304,72	0,35
Proba 8		1.905,3	53,94	308,87	0,37
Proba 9		545,2	22,18	237,74	0,26
Proba 10	1150	1.021,5	38,30	248,77	0,28
Proba 11	1150	1.480,6	50,74	259,54	0,31
Proba 12		1.905,3	59,28	271,41	0,34
Proba 13		545,2	26,16	200,14	0,22
Proba 14	1200	1.021,5	44,31	210,79	0,24
Proba 15	1200	1.480,6	55,79	229,54	0,28
Proba 16		1.905,3	64,83	236,28	0,31
Proba 17		545,2	31,23	165,82	0,19
Proba 18	1250	1.021,5	50,27	181,18	0,22
Proba 19	1250	1.480,6	61,16	201,42	0,26
Proba 20		1.905,3	69,54	208,13	0,29
Proba 21		545,2	38,01	133,94	0,15
Proba 22	1200	1.021,5	58,49	173,37	0,20
Proba 23	1500	1.480,6	67,02	178,31	0,23
Proba 24		1.905,3	73,84	182,71	0,27

Gradul de deformare plastică prin refulare se alege în așa fel încât valoarea acestuia să fie apropiată de valoarea gradului de deformare admisibil, adică de valoarea limită până la care materialul supus deformării nu își distruge integritatea. Depășirea gradului admisibil de deformare, la refularea, poate fi sesizată prin apariția pe suprafața laterală a epruvetelor a unor microfisuri/fisuri/crăpături fine sau grosolane. În cazul tuturor probelor analizate (Proba 1 – Proba 24) nu au fost observate microfisuri/fisuri/crăpături fine sau grosolane, fapt ce indică faptul că, în domeniul de temperatură investigat, indicele de plasticitate (gradul de deformare admisibil) încă nu este atins, aliajul UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 putând suporta grade de deformare chiar mai mari.

**Concluzii.** Având în vedere cele mai sus menționate, rezultă că, în intervalul de temperatură analizat, se pot efectua operații de deformare plastică cu grade mari de deformare (până la 70%), fără tratamente termice intermediare, pe o gamă variată de echipamente / metode de deformare.

#### Determinarea rezistenței la deformare plastică a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53

Cunoașterea rezistenței la deformare plastică, în funcție de natura materialului metalic și de condițiile de procesare termomecanică, constituie una din principalele probleme de care trebuie ținut cont atât la alegerea utilajului pe care se va executa deformarea plastică cât și a intervalului temperaturilor de încălzire în vederea deformării. La rândul său, rezistența la deformare plastică se determină fie prin încercări la tracțiune, fie prin încercări la compresiune sau refulare. Deoarece forța exterioară se transmite materialului metalic printr-o tensiune care acționează în aceeași direcție și același sens, uneori prin deformare plastică se înțelege tensiunea necesară pentru ca materialele metalice să treacă din stare elastică în stare plastică.

Analiza rezultatelor arată că în toate cazurile (tabelul A.II.2), pentru aceeași energie de lovire / viteză de deformație, atât rezistența la deformare cât și lucrul mecanic specific necesar pentru deformarea aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 scad cu creșterea temperaturii de deformare, rata de descreștere variind cu creșterea energie de lovire / vitezei de deformație aplicate. Acest fenomen face ca procesele de deformare cu viteze de deformație mici (ca de exemplu: laminarea) să fie mai eficiente energetic față de procesele de deformare cu viteze mari de deformație (ca de exemplu: forjarea).

Ţinând seama de constituția fazică a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, acesta prezentând un amestec de faze δ și γ, precum și de faptul că la temperaturi mai mari de 1200°C se înregistrează atât o fracție masică  $\delta$  / γ mai mare de 1.5, cât și un raport dintre dimensiunea medie de grăunte  $\delta$  / γ mai mare de 2.0, rezultă că domeniul de temperatură cuprins între 1050°C și 1200°C este optim pentru realizarea procesului de deformare plastică. De asemenea, trebuie să se țină cont și de faptul că la temperaturi mari (> 1250°C), oțelurile aliate cu Cr au o susceptibilitate mare la creșterea granulației, cu consecințe negative asupra proprietăților mecanice finale. **Concluzii.** Având în vedere cele menționate mai sus, rezultă că intervalul de temperatură optim pentru realizarea procesului de deformare este situat în domeniul 1050°C – 1200°C, iar din punct de vedere energetic sunt preferate procesele / metodele de deformare plastică cu viteze de deformație mici (de ex. laminarea).

#### **B.** Obiective tehnice:

I. Proiectarea componentei tehnologice de deformare plastică la cald / Grad de realizare: 100%

#### Rezultate obținute:

Proiectarea componentei tehnologice de deformare plastică la cald s-a efectuat având în vedere următoarele constrângeri (figura B.I.1):

- realizarea deformării plastice la cald într-un interval optim de temperatură, care să asigure existența unei microstructuri interne fără faze secundare nedorite (în concordanță cu observațiile efectuate în cadrul Studiului evoluției fazice la încălzire în cazul aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53); s-a ales următorul interval al temperaturii de deformare plastică la cald: 1050°C – 1200°C;
- aplicarea unui grad total de deformare apropiat de capacitatea maximă de deformare a aliajului UNS S32750 (în concordanță cu observațiile efectuate în cadrul Determinării plasticității aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53); s-a ales următorul interval al gradului total de deformare plastică aplicat: 40% – 70%;
- aplicarea unei metode/proces de deformare plastică care să asigure un consum optim de energie (în concordanță cu observațiile efectuate în cadrul Determinării rezistenței la deformare plastică a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53); s-a ales aplicarea metodei de deformare plastică prin laminare;
- obținerea unui produs deformat plastic la cald cu o microstructură internă adecvată (raportul fracției masice de faze δ / γ între 0.80 (≅45/55) și 1.20 (≅55/44); distribuție strânsă a dimensiunii de grăunte pentru fazele δ / γ; raportul dimensiunii medii de grăunte δ / γ mai mic de 1.5; fără defecte microstructurale: precipitate, incluziuni, goluri, microfisuri/fisuri, etc).



*Fig. B.I.1.* Schema de proiectare a etapelor ciclului de procesare prin deformare plastică la cald aplicată aliajului UNS S32750.

În vederea executării operațiilor de deformare plastică la cald, s-a adoptat o schemă de reduceri cu grade de deformare parțiale (pe trecere) și totale crescătoare ( $\varepsilon_{trecere}$  între 13 și 25%;  $\varepsilon_{total}$  între 20 și 70%), alcătuită din șase etape parțiale de deformare și reîncălzire la temperatura de deformare după fiecare etapă parțială de deformare (figura B.I.2).



Fig. B.I.2. Schema etapelor ciclului de procesare prin deformare plastică la cald aplicată aliajului UNS S32750.

#### **II.** Experimentarea componentei tehnologice de deformare plastică la cald / **Grad de realizare: 100%**

#### Rezultate obținute:

Ținându-se cont de cerințele privind deformarea plastică la cald, programul experimental aferent investigării/experimentării componentei tehnologice de deformare plastică la cald aplicat aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 este prezentat în figura B.II.1.



Fig. B.II.1. Schema etapelor ciclului de procesare prin deformare plastică la cald aplicată aliajului UNS S32750.

În figura B.II.2 se prezintă evoluția microstructurii aliajului UNS S32750 în timpul etapelor ciclului de procesare prin deformare plastică la cald. Analiza microstructurală arată, în toate cazurile, o morfologie caracteristică grăunților intens deformați, aliniați după direcția de laminare. De asemenea, se observă fragmentarea intensă a acestora, în special în cazul fazei  $\delta$ .



**Fig. B.II.2.** Evoluția microstructurii aliajului UNS S32750 în timpul etapelor ciclului de procesare prin deformare plastică la cald: deformat plastic cu un grad total de reducere de  $\varepsilon_{tot} = 40\% (1050^\circ C - a; 1100^\circ C - b; 1150^\circ C - c; 1200^\circ C - d); \varepsilon_{tot} = 60\%$  $(1050^\circ C - e; 1100^\circ C - f; 1150^\circ C - g;$  $1200^\circ C - h); \varepsilon_{tot} = 70\% (1050^\circ C - i;$  $1100^\circ C - j; 1150^\circ C - k; 1200^\circ C - l).$ 

Analiza probelor deformate cu un grad total de deformare de 40% arată că, pe măsură ce temperatura de deformare crește, se înregistrează o creștere continuă a dimensiunii de grăunte aferente fazelor  $\delta$ și  $\gamma$  (figura B.II.2a – B.II.2d; tabelul B.II.1), de la 19,4µm la 37,6µm în cazul fazei  $\delta$  și, respectiv, de la 12,6µm la 32,1µm în cazul fazei  $\gamma$ . Această creștere a dimensiunii de grăunte arată că la această temperatură atât procesele de creștere difuzivă a grăunților, cât și de recristalizare dinamică sunt active și au o intensitate seminificativă. Un comportament similar se observă și în cazul probelor deformate cu un grad total de deformare de 60% și de 70% (figura B.II.2e – B.II.2h; B.II.2i – B.II.2l; tabelul B.II.1). De remarcat că, în cazul probelor deformate cu un grad total de deformare de 60% se înregistrează cele mai mari valori pentru dimensiunea medie de grăunte a fazelor  $\delta$  și  $\gamma$ , atingând valorile de 41,4µm în cazul fazei  $\delta$  și, respectiv, de 31,3µm în cazul fazei  $\gamma$  pentru temperatura de deformare de 1200°C (figura B.II.2e – B.II.2h; tabelul B.II.1). La grade de deformare mai mari de 60%, se observă o scădere a dimensiunii de grăunte pentru ambele faze  $\delta$  și  $\gamma$ , cel mai probabil

din cauza influenției crescute a proceselor de recristalizare dinamică a grăunților, cât și a transformării de fază  $\gamma \rightarrow \delta$ .

		/		5 1		,		, ,				
	Dimensiunea medie de grăunte, μm (SEM-EBSD)											
Faza	Grad tot	al de defe	ormare: ɛ	Stot = <b>40%</b>	Grad tot	al de defe	ormare: ɛ	Stot = 60%	Grad tot	al de defe	ormare: ɛ	<sub>tot</sub> = 70%
Fuzu	Tempe	nperatura de deformare, T [°] Temperatura de deformare, T [°]					Temperatura de deformare, T [°]					
	1050°C	1100°C	1150°C	1200°C	1050°C	1100°C	1150°C	1200°C	1050°C	1100°C	1150°C	1200°C
Faza $\delta$	19,4	23,7	25,7	37,6	18,7	23,4	28,5	41,4	15,1	18,4	23,9	34,1
Faza γ	12,6	20,3	24,9	32,1	11,8	17,1	24,1	31,3	13,9	15,1	16,6	20,3

În figura B.II.3 se prezintă evoluția dezorientării cristalografice a aliajului UNS S32750 în timpul etapelor ciclului de procesare prin deformare plastică la cald. Analiza arată că, la nivelul ambelor faze  $\delta$  și  $\gamma$  se înregistrează valori comparabile ale dezorientării maxime, ceea se înseamnă că ambele faze sunt puternic deformate. Se observă o creștere în intensitate a dezorientării maxime odată cu creșterea gradului total de deformare aplicat, atingându-se valoarea maximă a dezorientării de aprox. 25° în cazul probelor deformate cu un grad total de 70%. În cazul probelor deformate la temperaturi > 1150°C, se observă prezența grăunților de fază  $\delta$  recristalizați dinamic, în cazul cărora se înregistrează o dezorientare cristalografică minimă (< 2°). De asemenea, se observă că procesul de recristalizare dinamică a fazei  $\delta$  crește în intensitate odată cu creșterea gradului total de deformare aplicat (figura B.II.3d, B.II.3l).



Fig. B.II.3. Evoluția dezorientării cristalografice a aliajului UNS S32750 în timpul etapelor ciclului de procesare prin deformare plastică la cald: grad total de reducere de  $\varepsilon_{tot}$  =  $40\% (1050^{\circ}C - a; 1100^{\circ}C - b;$  $1150^{\circ}C - c; 1200^{\circ}C - d); \varepsilon_{tot} = 60\%$  $(1050^{\circ}C - e; 1100^{\circ}C - f; 1150^{\circ}C - g;$  $1200^{\circ}C - h); \varepsilon_{tot} = 70\% (1050^{\circ}C - i;$  $1100^{\circ}C - j; 1150^{\circ}C - k; 1200^{\circ}C - l).$ 

Analiza rezultatelor obținute arată următoarele:

- dacă se dorește obținerea unei microstructuri finale cu o dimensiune de grăunte de fază δ > 40µm, atunci deformarea plastică trebuie să fie efectuată la temperaturi > 1150°C (datorită intensității ridicate a procesului de creștere a dimensiunii de grăunte ca urmare a recristalizării dinamice);
- dacă se dorește obținerea unei microstructuri finale cu o dimensiune de grăunte de fază  $\delta$  < 30µm, atunci deformarea plastică trebuie să fie efectuată la temperaturi < 1150°C (pentru a limita intensitatea procesului de creștere a dimensiunii de grăunte ca urmare a recristalizării dinamice);
- la temperaturi > 1150°C se înregistrează o scădere accentuată a dimensiunii de grăunte de fază γ (din cauza intensității ridicate a transformării de fază γ → δ);
- aliajul UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 suportă grade totale de deformare plastică ridicate, de până la 70% sau chiar mai mari.

**Concluzii.** Ținându-se cont de cerințele impuse în proiectarea componentei tehnologice de deformare plastică la cald a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, precum și de rezultatele microstructurale obținute în cadrul cercetărilor experimentale, varianta optimă de tehnologie de deformare plastică, în urma căreia să rezulte un

material cu o microstructură bifazică ( $\delta$ și  $\gamma$ ), omogenă și fără defecte microstructurale, având o dimensiune de grăunte de fază  $\delta$ între (20 – 30)µm și, respectiv, de fază  $\gamma$ între (15 - 25)µm, cuprinde următoarele (figura B.II.4):

- temperatura de început de deformare plastică: ~1150°C;
- temperatura de sfârșit de deformare plastică: ~1050°C;
- gradul total de deformare aplicat: până la 70% (sau chiar mai mare);
- reîncălziri după fiecare etapă de deformare parțială.



Fig. B.II.4. Schema finală de procesare prin deformare plastică la cald aplicată aliajului UNS S32750.

### III. Proiectarea componentei tehnologice de tratament termic final / **Grad de realizare: 100%**

#### Rezultate obținute:

Proiectarea componentei tehnologice de tratament termic final s-a efectuat având în vedere următoarele constrângeri (figura B.III.1):

- realizarea tratamentului termic final într-un interval optim de temperatură, care să asigure existența unei microstructuri interne fără faze secundare nedorite (în concordanță cu observațiile efectuate în cadrul Studiului evoluției fazice la încălzire în cazul aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53); s-a ales următorul interval al temperaturii de tratament termic final: 1080°C – 1180°C;
- realizarea tratamentului termic final într-un interval optim de menținere la temperatura de tratament, care să asigure existența unei microstructuri interne cu grăunți cu dimensiune medie micrometrică, mai mică de 35µm pentru ambele faze, δ (ferită) / γ (austenită), într-o dispersie strânsă de dimensiune și care să fie caracterizați de un nivel al câmpului rezidual tensiune / deformație minim; s-a ales următorul interval al duratei de menținere la temperatura de tratament termic final: 10min 30min;
- obținerea unui produs tratat termic final caracterizat de o microstructură internă adecvată (raportul fracției masice de faze δ / γ între 53/47 [%] și 58/42 [%]; distribuție strânsă a dimensiunii de grăunte pentru fazele δ / γ, dimensiune medie maximă de grăunte < 35 μm, raportul dimensiunii medii de grăunte δ / γ mai mic de 1.5; fără defecte microstructurale: precipitate de faze secundare, carburi, nitruri, etc.);</li>
- obţinerea unui produs tratat termic final care să posede caracteristici mecanice adecvate<sup>1</sup> (limita maximă de rezistență, σ<sub>UTS</sub> > (730 750) [MPa], limita de curgere, σ<sub>0.2</sub> > (530 550) [MPa], alungirea la rupere, ε > 25 [%], reziliența, KCV > 100 [J]).



*Fig. B.III.1.* Schema de proiectare a ciclului de tratament termic final aplicat aliajului UNS S32750 deformat plastic la cald.

#### *IV.* Experimentarea componentei tehnologice de de tratament termic final / **Grad de realizare: 100%** *Rezultate obținute:*

Ținându-se cont de cerințele privind tratamentul termic final (cerințe prezentate la *Proiectarea componentei tehnologice de tratament termic final*), programul experimental aferent investigării/experimentării

<sup>1</sup> <u>https://www.stainalloy.com/uns-s32750-super-duplex/</u>

https://www.langleyalloys.com/en/products/alloy-32750/

https://www.materials.sandvik/en/materials-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/sandvik-saf-2507/ https://www.sverdrupsteel.com/products/alloy-1-4410-super-duplex-uns-s32750-f53-2507

componentei tehnologice de tratament termic final aplicat aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 deformat plastic la cald este prezentat în figura B.IV.1.



Fig. B.IV.1. Schema etapelor ciclului de tratament termic final aplicată aliajului UNS S32750 deformat plastic la cald.

În vederea determinării caracteristicilor microstructurale pentru probele din aliaj UNS S32750 procesate termomecanic prin tratament termic final, au fost efectuate câte 3 măsurători SEM-EBSD, pe câmpuri de analiză alese aleatoriu, care au fost analizate statistic pentru a determina valoarea medie și, respectiv, dispersia acestora. De asemenea, și în cazul determinării caracteristicilor mecanice au fost efectuate câte 3 teste independente, care au fost analizate statistic pentru a determina valoarea medie și, respectiv, dispersia acestora.

Analiza microstructurală arată că, în toate cazurile, fazele constituente (ferita -  $\delta$  și austenita -  $\gamma$ ) sunt complet recristalizate, prezentând grăunți cu dimensiune micrometrică și dispersie uniformă, dar care păstrează alinierea în lungul direcției de laminare (ca urmare a deformării prealabile intense, grad total de deformare aplicat  $\varepsilon$  = 70%). Evoluția caracteristicilor microstructurale pentru aliajul UNS S32750 tratat la: T – t – WQ (T: 1080°C – 1180°C; t: 10min – 30min) este prezentată în tabelul B.IV.1, în timp ce evoluția caracteristicilor mecanice este prezentată în tabelul B.IV.2.

	Caracteristici microstructurale (SEM-EBSD)										
Faza	Durata de	e tratament,	t = 10min	Durata de	e tratament,	t = 20min	Durata de	e tratament,	t = 30min		
1 424	Fracție	Dimensiune	Dezorientare	Fracție	Dimensiune	Dezorientare	Fracție	Dimensiune	Dezorientare		
	masică, %	grăunte, μm	maximă, °	masică, %	grăunte, μm	maximă, °	masică, %	grăunte, μm	maximă, °		
Temperatura de tratament termic final, T = 1080°C (ST 1)											
ST 1.1					ST 1.2		ST 1.3				
Faza $\delta$	52,9±0,9	25,7±0,7	0 0 10 0	53,6 <del>±</del> 0,4	27,3±0,3	0 0 1 0 2	54,6±0,8	28,1±0,6	0 0 ± 0 F		
Faza γ	47,1±0,9	11,6±0,7	9,8 <b>1</b> 0,2	46,5 <del>±</del> 0,4	14,9±1,1	8,9±0,3	45,4±0,8	17,1 <del>±</del> 0,8	8,3±0,5		
Temperatura de tratament termic final, T = 1100°C (ST 2)											
		ST 2.1			ST 2.2			ST 2.3			
Faza δ	53,3±0,5	26,5±0,4	0 0+0 0	53,9 <del>±</del> 0,8	27,7 <del>±</del> 0,7	0 010 F	54,9±0,6	28,9 <del>±</del> 0,2	7,3±0,4		
Faza γ	46,7±0,5	16,1±0,7	8,9±0,9	46,1 <del>±</del> 0,8	16,9±1,3	8,0±0,5	45,1±0,6	17,9 <del>±</del> 0,6			
Temperatura de tratament termic final, T = 1120°C (ST 3)											
		ST 3.1			ST 3.2			ST 3.3			
Faza δ	54,8 <u>±</u> 0,6	27,9 <u>±</u> 0,7	0 5 40 7	56,7 <u>±</u> 0,4	28,4 <u>±</u> 0,4	76406	58,1 <u>±</u> 0,2	29,5 <u>±</u> 0,4	70/07		
Faza γ	45,2±0,6	17,6±1,1	0,5±0,7	43,3±0,4	17,9±1,3	7,010,0	41,9±0,2	18,2±0,4	7,0±0,7		
Tempera	atura de tra	tament term	ic final, T = 1	140°C (ST 4	)						
		ST 4.1			ST 4.2			ST 4.3			
Faza δ	55,6±1,5	30,1±0,6	0 CTU 7	57,4 <del>±</del> 0,2	31,1±0,7	7 1±0 2	58,5±0,2	32,2 <del>±</del> 0,8	7 1±0 0		
Faza γ	44,4±1,5	18,2±1,0	8,0±0,7	42,6±0,20	18,7±0,8	7,1±0,3	41,5±0,2	18,8±1,1	7,1±0,8		
Tempera	atura de tra	tament term	ic final, T = 1	160°C (ST 5	)						
		ST 5.1			ST 5.2			ST 5.3			
Faza $\delta$	56,9±1,2	31,5±1,1	7 0+0 5	57,8±1,3	32,2 <del>±</del> 0,6		58,7±0,8	33,9±0,8	6 2±0 4		
Faza γ	43,1±1,2	19,6±0,8	7,0±0,5	42,2±1,3	18,4±0,8	0,5±0,9	41,3±0,8	17,9±1,3	0,3±0,4		

**Tabel B.IV.1.** Evoluția caracteristicilor microstructurale pentru aliajul UNS S32750 tratat la: T - t - WQ.

Temperatura de tratament termic final, T = 1180°C (ST 6)									
	ST 6.1			ST 6.2			ST 6.3		
Faza $\delta$	59,4 <u>±</u> 0,4	34,3±1,0	7 010 C	60,7±0,3	36,2±0,7	6 640 7	62,5±1,4	38,6±1,1	Г <u>Э</u> +0 Г
Faza γ	40,6±0,4	21,8±0,8	7,8±0,3	39,3±0,30	20,1±1,0	0,0±0,7	37,5±1,4	18,7±0,6	5,3±0,5

Proba / Stare	Limita maximă de	Limita de curgere, $\sigma_{0.2}$ Alungire la rupere, $\epsilon$		Reziliența,
structurală	rezistență, outs [MPa]	[MPa]	[%]	KCV [J]
Cerințe minime	> (730 – 750)	> (530 – 550)	> 25	> 100
ST 1.1	767,05± 6,07	553,03± 0,51	48,23±1,51	134,23±0,40
ST 1.2	767,67± 2,93	554,52± 6,63	47,17±2,14	136,42±0,71
ST 1.3	773,89± 5,43	555,54± 5,13	46,47± 2,84	136,85± 1,43
ST 2.1	774,13± 2,14	558,76± 4,31	46,13±1,96	137,14± 1,06
ST 2.2	775,63± 6,08	558,39± 5,66	45,73±1,96	140,00± 0,26
ST 2.3	777,11± 3,44	560,16± 6,94	43,62±1,46	141,26± 1,83
ST 3.1	775,69±6,17	562,22±7,45	45,66±3,59	147,89±2,31
ST 3.2	779,89±3,34	562,98±9,74	44,35±1,85	145,76±0,40
ST 3.3	781,36±4,61	559,97±6,33	43,63±1,77	144,93±3,85
ST 4.1	783,87± 5,23	560,64± 4,95	44,17± 1,98	132,52± 1,94
ST 4.2	785,86± 2,19	573,74± 6,73	42,95±0,48	133,92± 2,83
ST 4.3	789,52± 5,59	572,88± 3,59	42,25± 3,07	133,28± 0,29
ST 5.1	782,14± 2,86	564,70± 3,66	43,38± 2,50	124,88± 2,69
ST 5.2	787,04± 3,55	574,71± 2,76	42,66± 1,41	127,20± 3,10
ST 5.3	793,23± 2,81	576,15± 6,65	42,27± 1,85	133,55± 4,05
ST 6.1	791,40± 4,74	578,00± 2,60	41,21±2,69	125,53±1,47
ST 6.2	800,22±2,43	580,22±5,64	40,36±3,77	126,39±1,81
ST 6.3	803,62± 7,21	585,39± 3,01	39,11±0,74	120,82±0,29

*Tabelul B.IV.2.* Caracteristicile mecanice obținute pentru aliajul UNS S32750 tratat la: T - t - WQ.

Analiza rezultatelor obținute arată următoarele:

- odată cu creșterea temperaturii (de la 1080°C la 1180°C) și a duratei de menținere la temperatura tratamentului termic final (de la 10min la 30min), se observă o creștere continuă a fracției masice de ferită (δ), însoțită de o descreștere proporțională a fracției masice de austenită (γ);
- odată cu creșterea temperaturii și duratei de menținere la temperatura tratamentului termic final se observă o creștere continuă a dimensiunii medii a grăunților de ferită (δ). În ceea ce privește dimensiunea medie de grăunte a fazei de austenită (γ), aceasta crește odată cu creșterea temperaturii și duratei de menținere până la temperatura de aprox. 1120°C 1140°C, după care, la creșterea temperaturii, aceasta scade odată cu creșterea duratei de menținere la temperatura tratamentului termic final;
- odată cu creșterea temperaturii (de la 1080°C la 1180°C) și a duratei de menținere la temperatura tratamentului termic final (de la 10min la 30min), se observă o creștere a limitei maxime de rezistență și a limitei de curgere și, respectiv, o descreșterea a alungirii la rupere;
- reziliența maximă se obține pentru temperatura de tratament termic final de 1120°C (ST 3).

**Concluzii.** Ținându-se cont de cerințele impuse în proiectarea componentei tehnologice de tratament termic final a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, precum și de rezultatele microstructurale și mecanice obținute în cadrul cercetărilor experimentale, varianta optimă de tehnologie de tratament termic final cuprinde următoarele (figura B.IV.2): temperatura de tratament termic final: ~1120°C (ST 3) și durata de menținere la temperatura de tratament termic final: ~(10min – 30min).



Fig. B.IV.2. Schema finală a ciclului de tratament termic final aplicat aliajului UNS S32750 deformat plastic la cald.

### *V.* Demonstrarea și validarea componentelor tehnologiei de procesare termomecanică: deformarea plastică la cald / *Grad de realizare: 100%*

#### Rezultate obținute:

Demonstrarea și validarea componentelor tehnologiei de procesare termomecanică: deformarea plastică la cald – s-au realizat prin analiza repetabilității și reproductibilității parametrilor de procesare termomecanică aplicați aliajului UNS S32750 și, respectiv, a parametrilor microstructurali obținuți (*fracție masică faze componente* și *analiză câmp rezidual tensiune / deformație – dezorientare cristalografică maximă*). Pentru aceasta, s-a plecat de la 10 probe de aliaj UNS S32750, în aceeași stare structurală inițială (*AR - as-received*), care au fost deformate plastic la cald conform schemei de procesare stabilite în cadrul *Activității 1.3: Experimentarea componentei tehnologice de deformare plastică la cald (conform Plan de realizare proiect*) și anume: temperatura de deformare: T = 1100°C; gradul total de deformare aplicat:  $\varepsilon$  = 70%.

Caracterizarea microstructurală prin difracție de raze X a aliajului UNS S32750, aflat în stare deformată plastic la cald (*HR* - *hot-rolled*) (figura B.V.1), a relevat faptul că microstructura este alcătuită din ferită ( $\delta$ ) și austenită ( $\gamma$ ). De asemenea, analiza XRD a evidențiat că, faza  $\delta$  este caracterizată de un sistem cristalin de tip CVC, având parametrul de rețea a = 2,88(6)Å și un nivel al microdeformație (la nivel de rețea cristalină), de  $\varepsilon$  = 0,11(2)%, în timp ce, faza  $\gamma$  este caracterizată de un sistem cristalin de tip CFC, având parametrul de rețea a = 3,61(5)Å și un nivel al microdeformație de  $\varepsilon$  = 0,34(2)% (tabelul B.V.1). Nu au fost detectate alte faze secundare.



Fig. B.V.1. Spectrul XRD caracteristic pentru aliajul UNS S32750 deformată plastic la cad (HR).

Tabel B.V.1. Parametrii microstructurali XRD caracteristici pentru aliajul UNS S32750 deformată plastic la cad (HR).

Parametrii caracteristici	Faza $\delta$ (ferita)	Faza γ(austenita)	Faza $\sigma$
Parametrul de rețea cristalină, a [Å]	2,88(6)	3,61(9)	-
Microdeformația la nivel de rețea cristalină, ε [%]	0,11(2)	0,34(2)	-

Analiza microstructurală avansată a aliajului UNS S32750 în stare deformată plastic la cald (*HR* – *hot-rolled*) arată că austenita ( $\gamma$ ) prezintă o morfologie sub formă de insule alungite în lungul direcției de laminare, în masa de ferită ( $\delta$ ) (figura B.V.2). De asemenea, analiza SEM-EBSD a arătat că, fracția masică de fază  $\delta$ , rezultată în urma deformării plastice la cald, este situată la aprox. 53,5 ± 0,8 %, iar fracția masică de fază  $\gamma$ , la aprox. 46,5 ± 0,8 % (tabelul B.V.2). Analiza SEM-EBSD a evidențiat prezența unui câmp rezidual de tensiune/deformație la nivelul fazelor constituente, care a produs o dezorientare cristalografică maximă de aprox. 24,1 ± 1,6 °, în principal la nivelul fazei  $\delta$ , cauzat de gradul mare de deformare plastică aplicat ( $\approx$  70%) (figura B.V.2, tabelul B.V.2). O observație importantă este reprezentată de prezența grăunților de ferită ( $\delta$ ) recristalizați dinamic (DRX) în timpul deformării plastice la cald, fapt ce arată că la acestă temperatură de deformare aliajul UNS S32750 posedă o capacitate de acomodare a deformație i ridicată, ceea ce face ca procesul de deformare să poată fi efectuat cu grade și mai mari de deformare (> 70%), fără distrugerea integrității structurale a aliajului UNS S32750.



Fig. B.V.2. Imagini microstructurale SEM-EBSD pentru aliajul UNS S32750 deformat plastic la cald (HR) (pattern quality; phase map; misorientation map).

Tabel B.V.2. Parametrii microstructurali SEM-EBSD caracteristici pentru aliajul UNS S32750 deformată plastic la cad (HR).				
Parametrii caracteristici Faza $\delta$ (ferita) Faza $\gamma$ (austenita) Faza $\sigma$				
Fracția masică [wt%]	53,5 ±0,8	46,5 ±0,8	-	
Dimensiunea medie de grăunte [ $\mu$ m]	-	-	-	
Dezorientare maximă [°]	24,1 ± 1,6		-	

**Concluzii.** Ținându-se cont de cerințele impuse în proiectarea componentei tehnologice de deformare plastică la cald a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, precum și de rezultatele microstructurale obținute în cadrul cercetărilor experimentale, în urma căreia să rezulte un material cu o microstructură bifazică ( $\delta$ și  $\gamma$ ), omogenă și fără defecte microstructurale - cuprinde următoarele (figura B.V.3):

- temperatura de deformare plastică: ~1100°C;
- gradul total de deformare aplicat: până la 70% (sau chiar mai mare);
- reîncălziri după fiecare etapă de deformare parțială.



Fig. B.V.3. Schema finală de procesare prin deformare plastică la cald aplicată aliajului UNS S32750.

Finisarea microstructurii aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, în vederea obținerii unei combinații optime de proprietăți mecanice (rezistență, plasticitate și reziliență), se realizează în urma etapei de tratament termic final.

### *VI.* Demonstrarea și validarea componentelor tehnologiei de procesare termomecanică: tratamentul termic final / *Grad de realizare: 100%*

#### Rezultate obținute:

Demonstrarea și validarea componentelor tehnologiei de procesare termomecanică: tratamentul termic final – s-au realizat prin analiza repetabilității și reproductibilității parametrilor de procesare termomecanică aplicați aliajului UNS S32750 și, respeciv, a parametrilor microstructurali (*fracție masică faze constituente, dimensiune medie grăunți faze constituente și analiză câmp rezidual tensiune / deformație – dezorientare cristalografică maximă*) și mecanici (*limită maximă de rezistență, limită de curgere, alungire la rupere și energie consumată la rupere/reziliență*) obținuți. Pentru aceasta, s-a plecat de la probe de aliaj UNS S32750 deformate plastic la cald în aceleași condiții de procesare termomecanică (temperatura de deformare: T = 1100°C și gradul total de deformare aplicat:  $\varepsilon$  = 70%), care au fost tratate termic final conform schemei de procesare stabilite în cadrul *Activității 2.3: Experimentarea componentei tehnologice de tratament termic final (conform Plan de realizare proiect)* și anume:

- temperatura de tratament: 1120°C (ST 3);
- durata de menținere : t = 10 min (ST 1); 20min (ST 2); 30min (ST 3);
- răcire: apă.

Pentru fiecare parametru microstructural analizat au fost efectuate 10 măsurători, pe câmpuri de analiză alese aleatoriu, care au fost analizate statistic pentru a determina valoarea medie și, respectiv, dispersia datelor măsurate.

Caracterizarea microstructurală prin difracție de raze X a aliajului UNS S32750, aflat în stare tratată termic final (*ST – solution treated*) (figura B.VI.1 și tabelul B.VI.1), a relevat faptul că indiferent de durata de menținere (de t = 10 min - ST 1; t = 20min - ST 2; t = 30min - ST 3) la temperatura de tratament (de T = 1120°C), microstructura este alcătuită exclusiv din ferită ( $\delta$ ) și austenită ( $\gamma$ ). De asemenea, analiza XRD a evidențiat că faza  $\delta$ , caracterizată de un sistem cristalin de tip CVC, este caracterizată de parametrul de rețea cu valoarea medie de aprox. a = 2,88Å și un nivel al microdeformație de  $\varepsilon$  = 0,02%, în timp ce, faza  $\gamma$ , caracterizată de un sistem cristalin de tip CFC, este caracterizată de parametrul de rețea cu valoarea medie de aprox. a = 3,61Å și un nivel al microdeformație de  $\varepsilon$  = 0,02%.



*Fig. B.VI.1.* Spectre XRD caracteristice pentru aliajul UNS S32750 tratat termic final (ST).

Tabel B.VI.1. Parametrii microstructurali XRD caracteristici pentru aliajul UNS S32750 tratat termic final (ST).

Parametrii caracteristici	Faza $\delta$ (ferita)	Faza $\gamma$ (austenita)	Faza $\sigma$		
Temperatura de tratament termic final, T = 1120°C / Durata de tratament, t = 10min (ST 1)					
Parametrul de rețea cristalină, a [Å]	2,88(1)	3,61(2)	-		
Microdeformația la nivel de rețea cristalină, ε [%]	0,02(1)	0,02(3)	-		
Temperatura de tratament termic final, T = 1120°C / Durata de tratament, t = 20min (ST 2)					
Parametrul de rețea cristalină, a [Å]	2,88(5)	3,61(7)	-		
Microdeformația la nivel de rețea cristalină, ε [%]	0,02(6)	0,02(7)	-		
Temperatura de tratament termic final, T = 1120°C / Durata de tratament, t = 30min (ST 3)					
Parametrul de rețea cristalină, a [Å]	2,88(3)	3,61(4)	-		
Microdeformația la nivel de rețea cristalină, ε [%]	0,02(6)	0,02(6)	-		

Analiza microstructurală avansată SEM-EBSD a aliajului UNS S32750 (figura B.VI.2), în stare tratată termic final la temperatura de 1120°C cu durata de menținere de 10min și răcire în apă (1120°C-10min-WQ - *ST 1*), arată că austenita (faza  $\gamma$ ) prezintă o morfologie sub formă de insule alungite în lungul direcției de laminare, în masa de ferită (faza  $\delta$ ). Analiza SEM-EBSD (tabelul B.VI.2) a arătat că, fracția masică de fază  $\delta$ , rezultată în urma tratamentului termic final cu durata de 10min (ST 1), este situată la aprox. 54,3 ± 1,1 %, iar fracția masică de fază  $\gamma$ , la aprox. 45,7 ± 1,1 %. Analiza dimensiunii medii de grăunte (tabelul B.VI.2) a arătat că, pentru faza  $\delta$ , rezultă o dimensiune medie de aprox. 28,3 ± 0,9 µm, iar în cazul fazei  $\gamma$ , de aprox. 17,1 ± 1,1 µm. De asemenea, analiza SEM-EBSD a evidențiat prezența unui câmp rezidual de tensiune/deformație la nivelul fazelor constituente, care a produs o dezorientare cristalografică maximă de aprox. 7,8 ± 0,7 °, în principal la nivelul fazei  $\delta$  (tabelul B.VI.2).



Fig. B.VI.2. Imagini microstructurale SEM-EBSD caracteristice pentru aliajul UNS S32750 în stare tratată termic final la 1120°C-10min-WQ (ST 1) (pattern quality; phase map; misorientation map).

Analiza microstructurală avansată a aliajului UNS S32750 (figura B.VI.3), în stare tratată termic final la temperatura de 1120°C cu durata de menținere de 20min și răcire în apă (1120°C-20min-WQ - *ST 2*), arată că, fracția masică de fază  $\delta$ , rezultată în urma tratamentului termic final cu durata de 20min (ST 2), este situată la aprox. 56,2 ± 0,9 %, iar fracția masică de fază  $\gamma$ , la aprox. 43,8 ± 0,9 % (tabelul B.VI.3). Analiza dimensiunii medii de grăunte (tabelul B.VI.3) a arătat că, pentru faza  $\delta$ , rezultă o dimensiune medie de aprox. 28,9 ± 1,4 µm, iar în cazul fazei  $\gamma$ , de aprox. 18,1 ± 1,5 µm. De asemenea, analiza SEM-EBSD a evidențiat prezența unui câmp rezidual de tensiune/deformație la nivelul fazelor constituente, care a produs o dezorientare cristalografică maximă de aprox. 7,1 ± 0,5 °, în principal la nivelul fazei  $\delta$  (tabelul B.VI.3).

Tabel B.VI.2. Evolutia caracteristicilor	microstructurale pentru aliaiu	l UNS S32750 tratat la: 11	20°C-10min-WO (ST 1).

[ mag	Temperatura de tratament termic final, T = 1120°C / Durata de tratament, t = 10min (ST 1)			
Faza	Fracție masică, %	Dimensiune medie de grăunte, µm	Dezorientare maximă, °	
Faza $\delta$ (ferită)	54,3±1,1	28,3±0,9	7 8 40 7	
Faza γ(austenită)	45,7±1,1	17,1±1,1	7,8±0,7	



Fig. B.VI.3. Imagini microstructurale SEM-EBSD caracteristice pentru aliajul UNS S32750 în stare tratată termic final la 1120°C-20min-WQ (ST 2) (pattern quality; phase map; misorientation map).

Tabel B.VI.3. Evoluția caracteristicilor microstructurale pentru aliajul UNS S32750 tratat la: 1120°C-20min-WQ (ST 2).

[	Temperatura de tratament termic final, T = 1120°C / Durata de tratament, t = 20min (ST 2)			
Faza	Fracție masică, %	Dimensiune medie de grăunte, µm	Dezorientare maximă, °	
Faza $\delta$ (ferită)	56,2±0,9	28,9±1,4	71405	
Faza γ(austenită)	43,8±0,9	18,1±1,5	7,1±0,5	

Analiza microstructurală avansată a aliajului UNS S32750 (figura B.VI.4), în stare tratată termic final la temperatura de 1120°C cu durata de menținere de 30min și răcire în apă (1120°C-30min-WQ - *ST 3*), arată că, fracția masică de fază  $\delta$ , rezultată în urma tratamentului termic final cu durata de 30min (ST 3), este situată la aprox. 58,5 ± 1,2 % și, respectiv, la aprox. 41,5 ± 1,2 %, în cazul fazei  $\gamma$  (tabelul B.VI.4). Analiza dimensiunii medii de grăunte (tabelul B.VI.4), a arătat că, pentru fază  $\delta$ , rezultă o dimensiune medie de aprox. 31,1 ± 1,4 µm și, respectiv, de aprox. 19,2 ± 1,3 µm, în cazul fazei  $\gamma$ . De asemenea, analiza SEM-EBSD a evidențiat prezența unui câmp rezidual de tensiune/deformație la nivelul fazelor constituente, care a produs o dezorientare cristalografică maximă de aprox. 7,2 ± 0,5 °, în principal la nivelul fazei  $\delta$  (tabelul B.VI.4).



Fig. B.VI.4. Imagini microstructurale SEM-EBSD caracteristice pentru aliajul UNS S32750 în stare tratată termic final la 1120°C-30min-WQ (ST 3) (pattern quality; phase map; misorientation map).

 Tabel B.VI.4.
 Evoluția caracteristicilor microstructurale pentru aliajul UNS S32750 tratat la: 1120°C-30min-WQ (ST 3).

[mage]	Temperatura de tratament termic final, T = 1120°C / Durata de tratament, t = 30min (ST 3)			
Faza	Fracție masică, %	Dimensiune medie de grăunte, µm Dezorientare mo		
Faza $\delta$ (ferită)	58,5±1,2	<i>31,1±1,4</i>	7.240 5	
Faza γ(austenită)	41,5 <i>±</i> 1,2	19,2 <i>±</i> 1,3	7,2±0,5	

Pentru determinarea caracteristicilor / proprietăților mecanice au fost efectuate 10 testări de tracțiune și, respectiv, de rezilență, pe fiecare stare microstructurală analizată. Datele obținute au fost analizate statistic pentru a determina valoarea medie și, respectiv, dispersia datelor măsurate.



Fig. B.VI.5. Curbe tensiune – deformație tipice pentru aliajul UNS S32750 în stare tratată termic final la 1120°C și durate de menținere de 10min (ST 1), 20min (ST 2) și 30min (ST 3).

Analiza caracteristicilor / proprietăților mecanice statice obținute în urma testelor de tracțiune (figura B.VI.5 și tabelul B.VI.5), pentru aliajul UNS S32750 în stare tratată termic final la temperatura de 1120°C cu durata de menținere de 10min (ST 1), 20min (ST 2) și 30min (ST 3), arată că, odată cu creșterea duratei de menținere, se obține o creștere ușoară atât a limitei maxime de rezistență, cât și a limitei de curgere, în cazul limitei maxime de rezistență, cât și a limitei de 10min (ST 1), la aprox.

783,5  $\pm$  3,3 MPa pentru durata de menținere de 30min (ST 3), iar în cazul limitei de curgere, de la aprox. 564,2  $\pm$  4,1 MPa pentru durata de menținere de 10min (ST 1), la aprox. 566,9  $\pm$  6,1 MPa pentru durata de menținere de 30min (ST 3). În cazul alungirii la rupere se observă o ușoară scădere a acesteia, de la aprox. 44,8  $\pm$  2,1 % pentru durata de menținere de 10min (ST 1), la aprox. 41,3  $\pm$  2,4 % pentru durata de menținere de 30min (ST 3). Se observă că, în toate cazurile, se obțin valori ale proprietăților mecanice superioare celor minime impuse pentru aliajul investigat.

Stare structurală	Limita maximă de rezistență, σ <sub>UTS</sub> [MPa]	Limita de curgere, σ <sub>0.2</sub> [MPa]	Alungire la rupere, ε [%]	Reziliența, KCV [J]
Cerințe minime	> (730 – 750)	> (530 – 550)	> 25	> 100
ST 1	771,8 ± 4,3	564,2 ± 4,1	44,8 ± 2,1	148,1 ± 1,7
ST 2	778,1 ± 3,1	565,1 ± 6,7	43,4 ± 2,6	145,1 ± 1,3
ST 3	783,5 ± 3,3	566,9±6,1	41,3 ± 2,4	141,6 ± 2,5

 Tabelul B.VI.5. Caracteristicile mecanice obținute în urma tratamentului termic final efectuat la 1120°C (ST).

Analiza caracteristicilor / proprietăților mecanice dinamice obținute în urma testelor de reziliență (tabelul B.VI.5), pentru aliajul UNS S32750 în stare tratată termic final la temperatura de 1120°C cu durata de menținere de 10min (ST 1), 20min (ST 2) și 30min (ST 3), arată o descreștere ușoară a energiei consumate la rupere / rezilienței, de la aprox. 148,1  $\pm$  1,7 J pentru durata de menținere de 10min (ST 1), la aprox. 141,6  $\pm$  2,5 J pentru durata de menținere de 30min (ST 3). Se observă că, în toate cazurile, se obțin valori ale proprietăților mecanice superioare celor impuse pentru aliajul investigat.

Se observă că dacă se dorește obținerea de caracteristici mecanice de rezistență (limită maximă de rezistență și limită de curgere) ridicate, atunci este recomandat ca tratamentul termic să fie efectuat la durate de menținere mai mari (de max. 30min), în timp ce dacă se dorește obținerea de ductilitate și reziliență ridicate, atunci este recomandat ca tratamentul termic să fie efectuat la durate de menținere mai mici (de max. 15min).

**Concluzii.** Ținându-se cont de cerințele impuse în proiectarea componentei tehnologice de tratament termic final a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53, precum și de rezultatele microstructurale și mecanice obținute în cadrul cercetărilor experimentale, în urma căreia să rezulte un material cu o microstructură bifazică ( $\delta$  și  $\gamma$ ), omogenă, fără defecte microstructurale și care să posede caracteristici mecanice optime (rezistență mecanică, plasticitate și reziliență ridicate) - cuprinde următoarele (figura B.VI.6):

- temperatura de tratament termic final: ~1120°C;
- durata de menținere la temperatura de tratament termic final: ~(10min 30min);
- răcire in apă.



Fig. B.VI.6. Schema finală a ciclului de tratament termic final aplicat aliajului UNS S32750 deformat plastic la cald.

*C. Alte obiective* secundare ale proiectului (în legătură cu cerințele programului PED):

*I.* Creșterea capacității partenerilor/membrilor consorțiului de a genera noi cunoștințe privind obținerea de noi produse și tehnologii / *Grad de realizare: 100*%

Ca urmare a derulării proiectului 593PED/2022 și a experienței acumulate de echipa de cercetare a a coordonatorului, s-a depus spre evaluare proiectul cu titlul "Secondary phase precipitation mechanisms in super-duplex stainless-steel alloys and their influence on the mechanical behaviour", Cod depunere: PN-IV-P1-PCE-2023-1530, program PNCDI IV - Program 5.1 - Idei, Instrument de finanțare: Proiecte de Cercetare Exploratorie (PCE), competiția 2023.

**II.** Creșterea capacității partenerilor/membrilor consorțiului de a transfera noi soluții privind transferul de cunoștințe/produse/tehnologii către mediul industrial / **Grad de realizare: 100%** 

Ca urmare a derulării proiectului 593PED/2022 și a experienței echipei de cercetare a coordonatorului, s-a depus în parteneriat cu SC Forja ROTEC SA spre evaluare proiectul cu titlul "Transfer de tehnologie pentru

optimizarea procesării termomecanice a unor superaliaje pe bază de nichel destinate aplicațiilor industriale", Cod depunere: PN-IV-P7-7.1-PTE-2024-0364, program PNCDI IV - Program 5.7 - Parteneriate pentru competitivitate, Instrument de finanțare: Transfer la operatorul economic (PTE), competiția 2024.

#### 2. Prezentarea și argumentarea nivelului de maturitate tehnologică (TRL) la finalul proiectului.

Ca urmare a implementării proiectului, la finalizarea acestuia, toate componentele modelului demonstrativ al tehnologiei de procesare termomecanică a aliajului UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 au fost validate în condiții de laborator (TLR 4). Pentru acesta, au fost derulate programe experimentale dedicate, care au urmărit analiza deviației, repetabilității și reproductibilității proprietăților / caracteristicilor obținute. Astfel, analiza proprietăților microstructurale și mecanice a arătat că în funcție de parametrii de procesare termomecanică (*în special în funcție de parametrii tratamentului termic final*) se obțin următoarele caracteristici / proprieți (tabelul B.VI.2 la B.VI.5 și tabelul B.VI.5):

- microstructură bifazică ( $\delta$  și  $\gamma$ ), omogenă, fără defecte microstructurale;
- fracția masică de fază δ între (54,3 58,5)%, respectiv, de fază γ între (45,7 41,5)% și o dispersie a datelor măsurate de max. ± 1,2%;
- dimensiunea de grăunte de fază  $\delta$  < 35µm, respectiv, de fază  $\gamma$  între (15 20)µm și o dispersie a datelor măsurate de max. ± 1,5 µm;
- limita maximă de rezistență ~ (770 780)MPa și o dispersie a datelor măsurate de max. ± 4,3 MPa;
- limita de curgere ~ (560 570)MPa și o dispersie a datelor măsurate de max. ± 6,7 MPa;
- alungirea la rupere ~ (42 45)% și o dispersie a datelor măsurate de max. ± 2,6 %;
- reziliența ~ (141 148)J și o dispersie a datelor măsurate de max. ± 2,5 J.

Toate acestea dovedesc că modelul demonstrativ al tehnologiei de procesare termomecanică este valid.

## 3. Gradul de atingere a rezultatelor estimate (prezentarea produsului/tehnologiei sau a serviciului rezultat al proiectului).

Centralizarea rezultatelor (prevăzute în *Planul de realizare* al proiectului) obținute se prezintă în cele ce urmează:

Studii:

- Studiu deformabilitate aliaj UNS S32750 / F53 / 1.4410;
- Studiu caracteristici microstructurale aliaj procesat prin deformare plastica la cald;
- > Studiu caracteristici microstructurale si mecanice aliaj procesat prin tratament termic final;
- Studiu de validare a componentelor tehnologiei de procesare termomecanica: deformarea plastică la cald;
- Studiu de validare a componentelor tehnologiei de procesare termomecanica: tratamentul termic final;

#### Tehnologii:

- > Tehnologie de laborator pentru procesarea termomecanică: deformare plastică la cald;
- > Tehnologie de laborator pentru procesarea termomecanică: tratament termic final.

În urma implementării proiectului, la finalizarea acestuia, toate rezultatele estimate (prevăzute în Planul de realizare al proiectului) au fost atinse. Componentele modelului demonstrativ al tehnologiei de procesare termomecanică a aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410 sunt următoarele:

- 1. Deformarea plastică prin laminare la cald, a aliajul UNS S32750 / F53 / 1.4410, cu un grad total de deformare de 70%, într-un număr de 6 treceri și re-încălziri după fiecare trecere;
- 2. Tratamentul termic final (de călire de punere în soluție) cu parametrii: temperatura T = 1120°C; timp de menținere t = (10-30)min; mediu de răcire: apă.

#### 4. Impactul rezultatelor obținute, cu sublinierea celui mai semnificativ rezultat obținut.

Ca urmare a implementării proiectului, s-a realizat modelul demonstrativ al tehnologiei de procesare termomecanică a aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410, care a arătat că acest aliaj poate fi obținut și procesat

corespunzător, astfel încât, să asigure obținerea unor proprietăți adecvate, din punct de vedere microstructural și mecanic, optime pentru realizarea de piese mecanice / structurale care funcționează în medii agresive (specifice industriilor pero-chimice, instalațiilor de desalinizare, turbine, etc).

Modelul demonstrativ al tehnologiei de procesare termomecanică a aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410 a arătat că pentru acest aliaj se poate obține o microstructură bifazică ( $\delta$  și  $\gamma$ ), omogenă, fără defecte microstructurale, cu o fracția masică de fază  $\delta$  între (54,3 – 58,5)%, respectiv, de fază  $\gamma$  între (45,7 – 41,5)%, prezentănd o dimensiunea de grăunte de fază  $\delta < 35 \mu$ m, respectiv, de fază  $\gamma$  între (15 - 20) $\mu$ m și fără prezența de alte faze secundare și compuși (cum ar fi:  $\chi$ ,  $\sigma$ , G, R, etc) care pot diminua drastic atât proprietățile de rezistență la coroziune cât și cele de rezistență mecanică. De asemenea, modelul demonstrativ al tehnologiei de procesare termomecanică a aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410 a arătat că pentru acest aliaj se obține o limita maximă de rezistență cuprinsă între (770 - 780)MPa, o limita de curgere între (560 - 570)MPa, o alungirea la rupere între (42 - 45)% și o reziliența între (141 - 148)J, caracteristic superioare celor impuse pentru acest material.

#### 5. Detalii privind exploatarea și diseminarea rezultatelor proiectului.

În urma derulării proiectului 592PED/2022 s-a realizat următoarea exploatare și diseminare a rezultatelor: - Prezentarea rezultatelor științifice la conferință internațională:

- N. Şerban, E.M. Cojocaru, I. Cinca, D. Şerban, V.D. Cojocaru. *σ-phase precipitation influence on microstructural and mechanical properties of UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy*; NuMat2022: The Nuclear Materials Conference, 24 28.10.2022, Ghent, Belgia;
- V.D. Cojocaru, N. Şerban, N. Zărnescu-Ivan, I. Balkan, E.M. Cojocaru. *Deformability study of UNS* S32750 / EN 1.4410 / F53 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy; ROMAT 2022: 9th International Conference on Materials Science and Technologies, 24 – 25.11.2022, București, România;
- E.M. Cojocaru, D. Raducanu, N. Serban, N. Zarnescu-Ivan, V.D. Cojocaru. *Microstructural and mechanical characterization of isochronal solution treated UNS S32750 / F53 / 1.4410 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy*; European Conference on Heat Treatment ECHT 2023, 29 31.05.2023, Genova, Italia;
- V.D. Cojocaru, M.L. Angelescu, N. Serban, N. Zarnescu-Ivan, E.M. Cojocaru. Effect of solution treatment duration on the microstructure and mechanical properties of a hot-rolled UNS S32750 / F53 / 1.4410 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy; METEC & 6thESTAD European Steel Technology and Application Days, 10 – 16.06.2023, Dusseldorf, Germania;
- E.M. Cojocaru, D. Raducanu, N. Serban, N. Zarnescu-Ivan, V.D. Cojocaru. Effect of solution treatment duration on the microstructure and mechanical properties of UNS S32750 / F53 / 1.4410 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy; 17th European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes - FEMS EUROMAT 2023, 03 – 07.09.2023, Frankfurt am Main, Germania;
- V.D. Cojocaru, N. Serban, N. Zarnescu-Ivan, E.M. Cojocaru. Effect of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of UNS S32750 / F53 / 1.4410 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy; 4th Mediterranean Conference on Heat Treatment and Surface Engineering - MCHTSE 2024, 17 – 19.04.2024, Lecce, Italia;
- V.D. Cojocaru, N. Serban, N. Zarnescu-Ivan, E.M. Cojocaru. Influence of solution treatment temperature on the microstructure and mechanical properties of UNS S32750 / F53 / 1.4410 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy; 33rd International Conference on Metallurgy and Materials -METAL 2024, 22 – 24.05.2023, Brno, Cehia;
- Prezentarea rezultatelor științifice la workshop-uri naționale:
  - V.D. Cojocaru. Specific phenomena during tm processing of UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 SDSS (Super Duplex Stainless Steel) alloy; Tendințe Noi în Procesarea Materialelor Metalice – Ediția a IV-a, 16 -18.05.2023, Bucureşti, România
  - V.D. Cojocaru. Effect of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of UNS S32750 / F53 / 1.4410 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy; Tendințe Noi în Procesarea Materialelor Metalice – Ediția a V-a, 14.06.2024, Bucureşti, România;
- Submisie articole științifice spre publicare în reviste cotate/indexate ISI:

- E.M. Cojocaru, D. Răducanu, N. Şerban, V.D. Cojocaru. Deformation behaviour at high temperature of UNS S32750 / EN 1.4410 / F53 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy; în evaluare la METALS AND MATERIALS INTERNATIONAL (FI 2023 – 3,3) (submis inițial la MATERIALS);
- V.D. Cojocaru, N. Serban, N. Ivan-Zarnescu, E.M. Cojocaru. Effects of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of UNS S32750 / F53 / 1.4410 SDSS (Super Duplex Stainless Steel) alloy; în evaluare la JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY-JMR&T (FI 2023 – 6,3) (submis inițial la MATERIALS)
- 3. V.D. Cojocaru, N. Ivan-Zarnescu, N. Serban, E.M. Cojocaru. *Influence of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of UNS S32750 / F53 / 1.4410 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy*; în evaluare la JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY-JMR&T (FI 2023 6,3).

- Elaborare pagină WEB proiect: http://www.mdef.pub.ro/research/STM-ProTech/index.html

#### 6. Prezentarea livrabilelor/indicatorilor obținuți la finalul proiectului comparativ cu cei propuși.

Nr. crt.	Livrabile/indicatori planificați	Nr.	Livrabile/indicatori realizați	Nr.
1.	<b>Studiu:</b> Studiu deformabilitate aliaj UNS S32750 / F53 / 1.4410	1	<b>Studiu:</b> Studiu deformabilitate aliaj UNS S32750 / F53 / 1.4410	1
2.	<b>Produs:</b> Studiu caracteristici microstructurale aliaj procesat prin deformare plastica la cald	1	<b>Produs:</b> Studiu caracteristici microstructurale aliaj procesat prin deformare plastica la cald	1
3.	<b>Studiu:</b> Studiu caracteristici microstructurale si mecanice aliaj procesat prin tratament termic final	1	<b>Studiu:</b> Studiu caracteristici microstructurale si mecanice aliaj procesat prin tratament termic final	1
4.	<b>Studiu:</b> Studiu de validare a componentelor tehnologiei de procesare termomecanica: deformarea plastica la cald	1	<b>Studiu:</b> Studiu de validare a componentelor tehnologiei de procesare termomecanica: deformarea plastica la cald	1
5.	<b>Studiu:</b> Studiu de validare a componentelor tehnologiei de procesare termomecanica: tratamentul termic final	1	<b>Studiu:</b> Studiu de validare a componentelor tehnologiei de procesare termomecanica: tratamentul termic final	1
6.	<b>Tehnologie:</b> Tehnologie de laborator pentru procesarea termomecanică: deformare plastică la cald	1	<b>Tehnologie:</b> Tehnologie de laborator pentru procesarea termomecanică: deformare plastică la cald	1
7.	<b>Tehnologie:</b> Tehnologie de laborator pentru procesarea termomecanică: tratament termic final	1	<b>Tehnologie:</b> Tehnologie de laborator pentru procesarea termomecanică: tratament termic final	1
8.	Diseminare: Elaborare pagina WEB	1	Diseminare: Elaborare pagina WEB	1
9.	<b>Diseminare:</b> Participare la conferință internațională	2	Diseminare: Participare la conferință internațională	7
10.	Diseminare: Submisie articol pentru publicare	3	Diseminare: Submisie articol pentru publicare	3

În cele ce urmează se prezintă centralizat livrabilele / indicatorii planificați și, respectiv, cei realizati:

Director project, Vasile Dănuț COJOCARU Data: 30.06.2024

#### Prezentarea succintă a rezultatelor obținute în cadrul proiectului - diseminare.

Ca urmare a implementării proiectului, s-a realizat modelul demonstrativ al tehnologiei de procesare termomecanică a aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410, care a arătat că acest aliaj poate fi procesat termomecanic în două etape (figura 1) și anume, o primă etapă de deformare plastică la cald (necesară pentru a asigura obținerea formei geometrice a piesei / produsului), urmată de o a doua etapă de tratament termic (necesară pentru obținerea caracteristicilor microstructurale și mecanice finale pentru piesa / produsul final).

Analiza proprietăților microstructurale și mecanice a arătat că în funcție de parametrii de procesare termomecanică se obțin următoarele caracteristici microstructurale și proprietăți mecanice (figura 2):

- microstructură bifazică ( $\delta$  și  $\gamma$ ), omogenă, fără defecte microstructurale;
- fracția masică de fază  $\delta$  între (54,3 58,5)%, respectiv, de fază  $\gamma$  între (45,7 41,5)%;
- dimensiunea de grăunte de fază  $\delta$  < 35µm, respectiv, de fază  $\gamma$  între (15 20)µm;
- limita maximă de rezistență ~ (770 780)MPa;
- limita de curgere ~ (560 570)MPa;
- alungirea la rupere  $\sim$  (42 45)%;
- reziliența ~ (141 148)J.



Figura 1. Schema etapelor de procesare termomecanică aplicate aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410.



Figura 2. Schema evoluției microstructurii și a proprietăților mecanice în funcție de etapele de procesare termomecanică aplicate aliajului UNS S32750 / F53 / 1.4410.

Director project, Vasile Dănut COJOCARU

/ph