



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI  
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI  
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE  
AMPOSDRU



Fondul Social European  
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale  
2007-2013



OEPSDRU



UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
din BUCUREȘTI

## UNIVERSITATEA POLITEHNICA din BUCUREȘTI



UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
din BUCUREȘTI

# REZUMAT TEZA DE DOCTORAT

**CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND STABILIREA TEHNOLOGIEI  
OPTIME DE EXECUȚIE A SEMIFABRICATELOR FORJATE CU DESTINAȚIE  
SPECIALĂ**

**EXPERIMENTAL RESEARCH FOR ESTABLISHMENT OF THE OPTIMUM  
TECHNOLOGY FOR THE EXECUTION OF FORGED SEMI-PRODUCTS WITH  
SPECIAL DESTINATION**

**Autor: Drd. Ing. Elena-Valentina CALOIAN**

**Conducător de doctorat: Prof. Dr. Ing. Nicolae CONSTANTIN**

**BUCUREȘTI  
2021**

## CUPRINS

CUVÂNT ÎNAINTE .....	4
PARTEA I-a	
ANALIZA DOCUMENTARĂ PRIVIND STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRII PRIN DEFORMARE PLASTICĂ PRIN FORJARE A SEMIFABRICATELOR DIN OȚEL .....	4
1 CAPITOLUL 1	
ELEMENTE PRIVIND REGIMUL TERMIC AL PROCESULUI DE DEFORMARE AL METALELOR ȘI AL ALIAJELOR METALICE .....	4
1.1. Noțiuni generale privind regimul termic al procesului de deformare .....	4
1.2. Stabilirea vitezei de încălzire .....	5
1.3. Stabilirea duratei de încălzire .....	5
2 CAPITOLUL 2	
ELEMENTE PRIVIND PROCESUL DE FORJARE MECANICĂ LIBERĂ AL SEMIFABRICATELOR .....	6
2.1. Introducere .....	6
2.2. Materiale tehnice utilizate la forjare, Standarde în vigoare. Tipuri de semifabricate .....	7
2.3. Prelucrarea semifabricatelor forjate .....	7
2.4. Elemente de calcul privind procesul de deformare a semifabricatelor .....	7
PARTEA a II-a	
CERCETĂRI EXPERIMENTALE PROPRII PRIVIND TEHNOLOGIA DE EXECUȚIE A SEMIFABRICATELOR FORJATE DIN MATERIAL <b>12CrMo9-10</b> .....	8
3 CAPITOLUL 3	
CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND TEHNOLOGIA DE EXECUȚIE A SEMIFABRICATELOR FORJATE DIN MATERIAL <b>12CrMo9-10</b> .....	8
3.1. Descrierea cercetărilor experimentale .....	8
3.2. Caracterizarea semifabricatelor forjate din materialul <b>12CrMo9-10</b> .....	8
3.3. Descrierea geometrică și etapele forjării lingoului din materialul <b>12CrMo9-10</b> .....	8
4 CAPITOLUL 4	
DESCRIEREA TRATAMENTELOR TERMICE PENTRU SEMIFABRICATUL FORJAT <b>12CrMo9-10</b> .....	16
4.1. Descrierea tratamentelor termice .....	16
4.2. Influența temperaturii de încălzire și a ratei de răcire după forjarea liberă asupra microstructurii și proprietăților mecanice ale oțelului <b>42CrMo4</b> EN-10250 .....	18
4.3. Efectul încălzirii și răcirii diferențiate asupra microstructurii și caracteristicilor mecanice .....	21
4.4. Cercetări experimentale privind procedura de elaborare a semifabricatelor forjate standardizate în utilizarea la sisteme subacvatice-material <b>25CrMo4</b> .....	23
5 CAPITOLUL 5	
DESCRIEREA ÎNCERCĂRILOR MECANICE LA TRACȚIUNE PENTRU SEMIFABRICATUL FORJAT <b>12CrMo9-10</b> .....	27
5.1. Descrierea încercărilor mecanice la șoc – reziliența – pentru semifabricatul .....	27

forjat <b>12CrMo9-10</b> .....	
5.2. Descrierea încercărilor mecanice – duritate – pentru semifabricatul forjat <b>12CrMo9-10</b> .....	27
5.3. Descrierea determinării dimensiunii grăuntelui austenitic pentru semifabricatul forjat <b>12CrMo9-10</b> .....	28
5.4. Descrierea analizei metalografice - determinări structurale - pentru semifabricatul forjat <b>12CrMo9-10</b> .....	29
5.5. Descrierea analizei incluziunilor metalice pentru semifabricatul forjat <b>12CrMo9-10</b> .....	29
5.6. Descrierea echipamentelor utilizate .....	30
6. CAPITOLUL 6	
CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE .....	31
6.1 Concluzii finale rezumative .....	31
6.2 Contributii personale, originale .....	32
6.3 Direcții viitoare de dezvoltare a cercetărilor din teza de doctorat .....	33
Diseminarea rezultatelor din teza de doctorat .....	34
BIBLIOGRAFIE .....	35

Keyword: incercari mecanice, graunte austenitic, deformare, echipamente metalurgice

## PARTEA I-a

### ANALIZA DOCUMENTARĂ PRIVIND STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRII PRIN DEFORMARE PLASTICĂ PRIN FORJARE A SEMIFABRICATELOR DIN OȚEL

## CAPITOLUL 1

### ELEMENTE PRIVIND REGIMUL TERMIC AL PROCESULUI DE DEFORMARE AL METALELOR ȘI AL ALIAJELOR METALICE

#### 1.1. Noțiuni generale privind regimul termic al procesului de deformare

Pentru ca materialele să poată fi ușor prelucrate prin deformare ele trebuie să aibă o rezistență mică la deformare și o deformabilitate mare. La majoritatea materialelor aceste condiții pot fi realizate prin încălzire. La temperaturile la care are loc deformarea la cald rezistența la deformare este mai mică de [10...12] ori în comparație cu rezistența aceluiași material în stare rece. Deformarea la rece asigură calitate a suprafeței piesei și precizie dimensională mai bune decât deformarea la cald. Deformarea la rece se poate aplica numai la materialele cu rezistența mai redusă la deformare și deformabilitate ridicată la temperatura ambiantă și pentru obținerea pieselor de dimensiuni mici.

Scăderea deformabilității la temperaturi ridicate este dată de începutul creșterii excesive a grăunților și a începerii procesului de topire la limitele intercrystaline. Aceste fenomene se produc cu atât mai intens cu cât temperatura de încălzire se apropie de temperatura de topire a materialului respectiv. Temperatura critică la care aceste fenomene încep să se producă intens se găsește cu [15-300]<sup>o</sup>C sub linia solidus (diagram de faze Fe-C, figura 1.1.) [2].

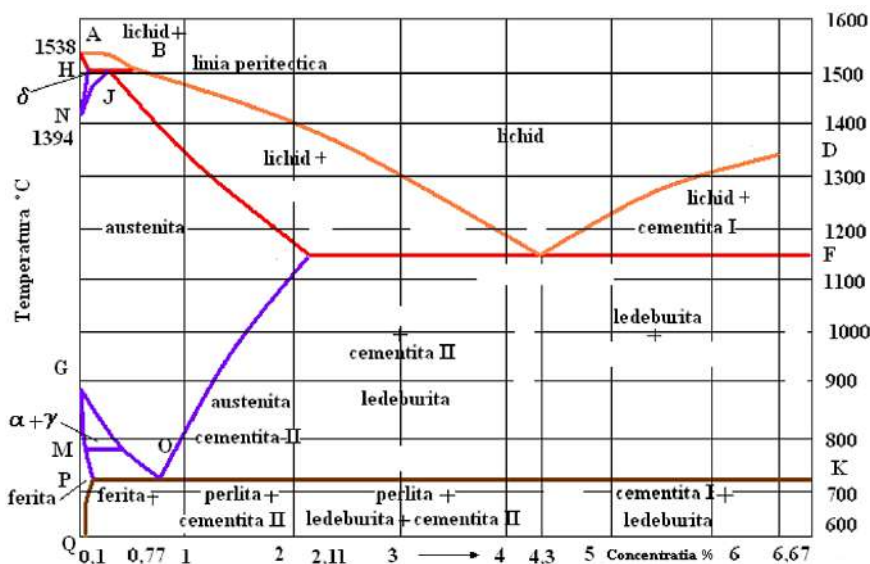


Figura 1.1 Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C [1].

**-Durata de menținere.** Cantitatea de oxid crește cu mărirea duratei de menținere a semifabricatului în cuptor la temperatura dată. Legătura între cantitatea de oxid

formată și durata de menținere la temperatura dată (în intervalul [600...1200]°C) se poate exprima prin relația:

$$q = c\sqrt{\pi e} \frac{9000}{T} \quad (1.1)$$

### 1.2 Stabilirea vitezei de încălzire

Prin viteză de încălzire se înțelege creșterea temperaturii semifabricatului în unitatea de timp. Se deosebesc trei viteze de încălzire: • viteza de încălzire tehnic posibilă, care depinde de instalația de încălzire; • viteza de încălzire admisibilă, care poate fi atinsă la un semifabricat dat; • viteza de încălzire reală, care se realizează în timpul încălzirii.

Tensiunile termice cresc proporțional cu viteza de încălzire, cu coeficientul de dilatare, cu dimensiunile piesei și cu modulul de elasticitate al materialului încălzit. O posibilă relație de legătură între acești parametrii este prezentată mai jos:

$$\sigma_{\max} = \frac{\alpha_0 E \Delta t}{1(1-\nu)} \quad (1.2)$$

### 1.3. Stabilirea duratei de încălzire

Calculul timpului de încălzire, relația 1.3., se face pornindu-se de la ecuația schimbului de căldură dintre semifabricat și mediul de încălzire:

$$\tau = \frac{M_s c}{A_s} \ln \frac{t_c - t_{si}}{t_c - t_{sf}} \quad (1.3)$$

## CAPITOLUL 2

### ELEMENTE PRIVIND PROCESUL DE FORJARE MECANICĂ LIBERĂ AL SEMIFABRICATELOR

#### 2.1 Introducere

Prin deformare plastică se înțelege modificarea formelor în întreg volumul sau numai după anumite direcții ale materialului supus procesului de prelucrare. Capacitatea unui material de a fi prelucrat prin forjare se măsoară cu ajutorul forjabilității, care înglobează două noțiuni: rezistența la deformare și deformabilitatea. Forjabilitatea este cu atât mai ridicată cu cât rezistența la deformare este mai redusă și deformabilitatea mai ridicată. Deformarea plastică a materialelor se bazează pe proprietățile de plasticitate și este concepută ca o însușire a acestora de a se deforma ireversibil, în condițiile păstrării integrității corpului deformat, a continuității substanței [15],[17],[23].

#### 2.2. Materiale tehnice utilizate la forjare, Standarde în vigoare. Tipuri de semifabricate

Materialele metalice forjabile sunt acele materiale care pot fi deformate plastic prin unul din procesele de forjare. Printre principalele materiale se enumeră aliajele feroase și neferoase. Aliajele feroase se pot grupa la rândul lor în oțeluri carbon și oțeluri aliate, iar cele neferoase în metale și aliaje grele și ușoare, tabelul 2.1.

**Tabelul 2.1.** Standarde în funcție de destinația tipului de oțel, semifabricate din oțel.

Nr crt	Denumire sortiment	Standard
1	Oțeluri carbon forjabile	SREN10250-1,3,4:2002
3	Oțeluri refractare	SREN10095:2002
6	Semifabricat de tip blum,sleb	SREN10079:1996
8	Semifabricat de tip țagle	SRAS2991-80,87

Alte elemente însoțitoare cum ar fi *cromul, nichelul, wolframul, molibdenul*, influențează și ele ca elemente de aliere deformabilitatea oțelului, însă într-o măsură redusă față de elementele enumerate anterior. Dintre metalele și aliajele neferoase ușoare se enumeră aluminiul și aliajele sale pe bază de Si, Cu, Mg, Zn și Mn, precum și aliajele pe bază de magneziu, care conțin Mn, Al, Sn sau Zn [22]. Temperaturile de forjare ale oțelurilor aliate sunt influențate de compoziția chimică a acestora. Astfel domeniul temperaturilor necesare pentru diverse tipuri de material metalice în scopul procedurii de deformare prin forjare sunt prezentate în tabelul 2.2.

**Tabelul 2.2.** Domeniul temperaturilor necesare pentru diverse tipuri de material metalice în scopul procedurii de deformare prin forjare.

Nr crt	Aliajul, material metalic	Temperatura de forjare	
		Valoarea	U.M.
1	Aliaje de aluminiu	400-550	°C
2	Aliaje de magneziu	250-350	°C
3	Aliaje de cupru	600-900	°C
4	Aliaje de titan	700-950	°C

### 2.3. Prelucrarea semifabricatelor forjate

În categoria mașinilor de forjare se încadrează acelea la care se realizează deformarea materialelor prin lovire (ciocane, prese cu șurub) precum și cele care deformează pisele prin presare (prese hidraulice, prese mecanice). Pentru forjarea liberă se utilizează cel mai frecvent ciocanele autocompresoare, ciocanele abur-aer și presele hidraulice. Schemele cinematice simplificate ale acestor tipuri de mașini sunt prezentate în figura 2.1. [2],[29],[31]. Mașinile care se folosesc la forjarea liberă, dezvoltă prin lovire sau presare lentă o energie care se transformă în lucru mecanic de deformare. Bilanțul energetic al mașinilor de forjat în cazul general se scrie cu ajutorul relației 2.1:

$$E = E_{dp} + E_e + E_f + E_a + E_p + E_n \quad (2.1)$$



**Figura 2.1.** Echipamente tehnologice pentru procesul mecanic de forjare a semifabricatelor metalice

### 2.4. Elemente de calcul privind procesul de deformare a semifabricatelor

Pentru calculul presiunii medii de deformare, a forței de refulare și a lucrului mecanic, literatura de specialitate prezintă mai multe relații în funcție de forma transversală a corpului, de dimensiunile corpului și de modul de variație a tensiunii de frecare și a presiunii pe suprafața de contact dintre corp și scule, tabelul 2.3.

**Tabelul 2.3. Relațiile de calcul pentru procesul de deformare al semifabricatelor.**

Nr crt	Cazul	Relatia de calcul
1	semifabricatul cu secțiune transversală dreptunghiulară și lungime infinită	$F = 2k \left( 1 + \frac{1}{2} \mu \frac{b}{h} \right) bl$
		$p = \frac{F}{b} = 2k \frac{h}{\mu b} \left( e^{\frac{\mu b}{h}} - 1 \right)$
2	semifabricatul cu secțiune transversală pătrată	$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{a^2} = 2k \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{a}{h} \right)$
3	semifabricatul cu secțiune transversală dreptunghiulară	$F = 2k \left( 1 + \mu \frac{3b - a}{6b} \frac{a}{h} \right) ab$
		$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{ab} = 2k \left( 1 + \mu \frac{3b - a}{6b} \frac{a}{h} \right)$
4	semifabricatul cu secțiune transversală circulară	$F = 2k \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h} \right) \frac{\pi d^2}{4}$
		$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi d^2 / 4} = 2k \left( 1 + \frac{1}{3} \mu \frac{d}{h} \right)$

**PARTEA a II-a**  
**CERCETĂRI EXPERIMENTALE PROPRII PRIVIND**  
**TEHNOLOGIA DE EXECUȚIE A SEMIFABRICATELOR FORJATE DIN**  
**MATERIAL 12CrMo9-10**

**CAPITOLUL 3**  
**CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND TEHNOLOGIA DE EXECUȚIE A**  
**SEMIFABRICATELOR FORJATE DIN MATERIAL 12CrMo9-10**

**3.1. Descrierea cercetărilor experimentale**

Pentru a putea stabili un nivel de calitate corespunzător privind prelucrarea mecanică a semifabricatului forjat **12CrMo9-10**, se utilizează, în cadrul acestui capitol. Standardul prezintă specificații pentru piesele forjate (flanșe, armături) privind tratamentele termice, încercările mecanice, dimensiunea grăuntelui austenitic, analiza metalografică, indentificarea incluziunilor nemetalice și determinarea compoziției chimice pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10**, tabelul 3.1.

**Tabelul 3.1.** Obiectivele operațiilor specifice pieselor forjate conform standardului **EN-10222**

Nr crt	Denumire specificatiei		Obiectivul analizat
1	Tratamentul termic	primar	Parametrii tratamentului de normalizare
		secundar	Parametrii tratamentului de călire și de revenire
2	Incercarile mecanice		Valorile caracteristicilor mecanice
3	Structura austenitică		Indicele de mărime a grăunților
4	Analiza metalografică		Constituenți structurali, segregății
5	Incluziunile nemetalice		Analiza zonelor decaburate
6	Analiza chimică		Stabilirea limitelor admise a fiecărui element chimic

**3.2. Caracterizarea semifabricatelor forjate din materialul 12CrMo9-10**

Semifabricatul forjat **12CrMo9-10** prezintă compoziția chimică a acestuia, tabel 3.2.

**Tabelul 3.2.** Compoziția chimică a materialului semifabricat **12CrMo9-10**

Denumire element chimic	Valoare [%]	Denumire element chimic	Valoare [%]
C	0,11-0,15	Cr	2,0-2,50
Mn	0,30-0,60	Mo	0,87-1,13
P	Max 0,010	Al	Max 0,055
S		Cu	Max 0,035
Si	Max 0,50	Ni	Max 0,50

**3.3. Descrierea geometrică și etapele forjării lingoului de aprovizionare din materialul 12CrMo9-10**

În cadrul acestui capitol sunt prezentate elementele geometrice ale semifabricatului care urmează a fi prelucrat prin procedeul de forjare. Semifabricatul este unul tronconic cu măsurile geometrice prezentate în figura 3.1.



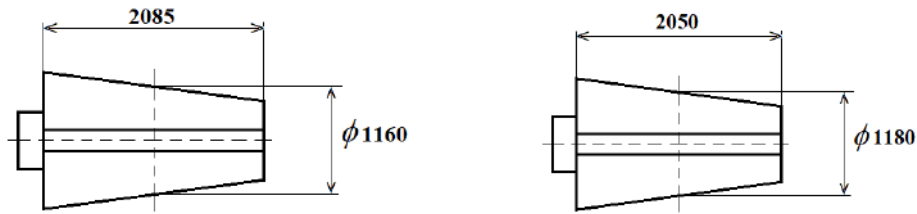


Figura 3.1. Dimensiunile lingoului aprovizionat.

### Etapele procesului de forjare

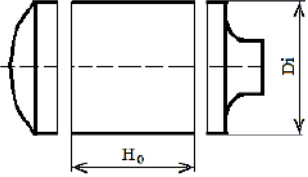
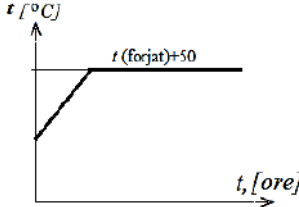
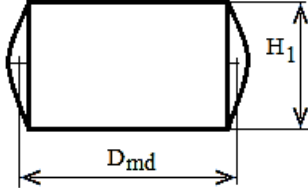
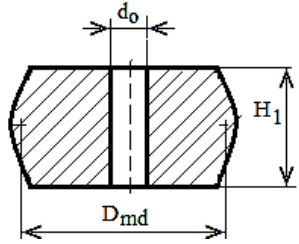
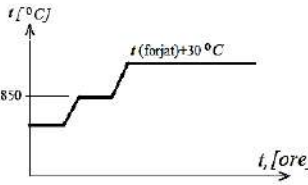
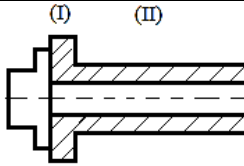
Etapele necesare procesului de forjare sunt prezentate în cele ce urmează, fiecare operație fiind însoțită de schema de operației.

1. Forjare lingou  $D=1160$  mm în pătrat  $750 \times 750 \times 1$  (gradul de deformare minim 1,9:1).
2. Debitarea piciorului lingoului și a semifabricatului
3. Refularea semifabricatului (pornind de la dimensiunile  $750 \times 750 \times 2119$  la  $\phi 1175 \times 1100$ );
4. Gâtuirea semifabricatului la dimensiunea de forjare,  $\phi 1230 \pm 12 \times \phi 260 \pm 12 \times 1050 \pm 12$ ;
5. Zetuirea semifabricatului pentru o treaptă de dimensiune  $\phi 950 \times \phi 260 \times 1816$ ;

Totodată este prezentat filmul tehnologic al procesului de forjare, în tabelul de mai jos, astfel:

Tabelul 3.3. Schema tehnologică pentru materialului semifabricat **12CrMo9-10**

Nr	Denumirea fazei	Schița (diagrama) fazei	Utilaje și scule folosite	Indicații tehnologice
1	Încălzirea lingoului		Cuptor de încălzire cu vatră	Așezarea lingoului pe suport
2	Fomarea cepului de prindere		Nicovala, suprafața plană sau profilată Dispozitiv de rotire Pod rulant	$d_c$ =funcție de mărimea lingoului și posibilităților de prindere a manipulato-rului
3	Biletarea lingoului		Nicovala, suprafața plană sau profilată; Manipulator de forjare	Coroiaj
4	Reîncălzirea		Cuptor cu vatră mobilă	Asezarea lingoului pe suportii montați pe vatra cuptorului
5	Forjarea semifabrica-tului la diametrul corespunzător		Nicovala Manipulator de forjare	Adâncimea de pătrundere la presare a celor două nicovale de min 150mm

6	Debitarea lingoului și semifabricatului		Nicovală Manipulator de forjare Topor pentru debitare	Debitarea se face pe patru părți
7	Reîncălzire		Cuptor cu vatră	În timpul reîncălzirii se rotește semifabricatul în cuptor pentru o încălzire uniformă
8	Refularea semifabricatului		Nicovală Masă manipulator	Masa piesei finite va fi de 84-85% din greutatea calupului înainte de refulare
9	Găurirea semifabricatului refulat		Nicovală Masă Ștanță Dorn con pentru găurit	Condiția de îndeplinit pentru întindere pe dorn
10	Reîncălzirea semifabricatului încălzit		Cuptor cu vatră	-
11	Forjarea prin întindere dorn + zetuire treaptă		Nicovală superioară Nicovală inferioară Dorn Manipulator de forjare	Se forjează pe zona I, apoi se zetuiește pentru a se obține zona II
13	Marcarea	-	-	-
14	TT primar	-	-	-

Stailirea echipamentelor de forjare:

- Presă hidraulică 3500 tf cu manipulator de 35 tf;
- Presă hidraulică 1600 tf cu manipulator de 15 tf;

Stabilirea temperaturii de lucru:

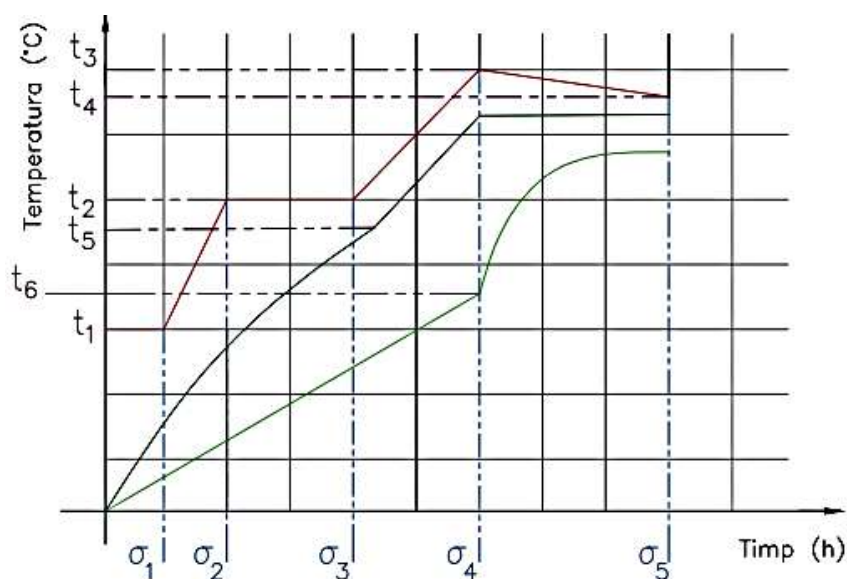
- Ciclul I: 1110 ÷ 1150 °C (temperatură final de forjare >850 °C);
- Ciclul II: 1110 ÷ 1150 °C (temperatură final de forjare >850 °C);
- Ciclul III: 1110 ÷ 1150 °C (temperatură final de forjare >850 °C)



**Figura 3.2.** Cuptor de încălzire a lingoului semifabricatul forjat **12CrMo9-10**.

3. Incălzirea (semifabricate din **12CrMo9-10**) în vederea forjării și răcirea semifabricatului  
Operația de încălzire a semifabricatului din **12CrMo9-10** în vederea forjării libere trebuie să aibă ca scop: mărirea plasticității materialului, micșorarea rezistenței la deformare.  
Durata optimă  $\sigma$  în ore a încălzirii semifabricatului din **12CrMo9-10**. se determină cu relația:  
$$\sigma = K\alpha \times D\sqrt{D} \text{ [h]}$$

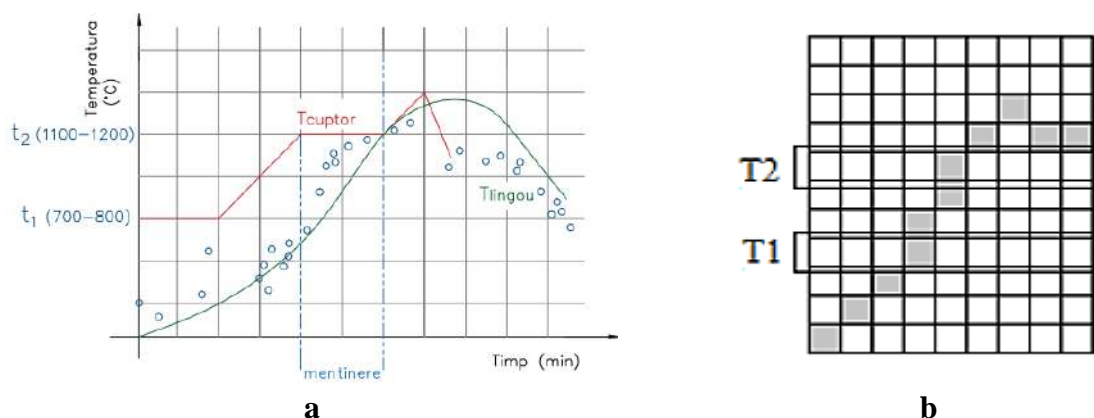
În figura de mai jos este prezentată schema regimului de încălzire a lingoului din **12CrMo9-10** introdus în cuptor cald ( $500\pm 700^\circ\text{C}$ ), figura 3.2. Se remarcă că există două perioade de menținere la temperatură constantă cu duratele  $\sigma_3$  și  $\sigma_5$  în vederea omogenizării temperaturii pe secțiunea lingoului (egalizarea temperaturilor în centru și la suprafața lingoului). Regimurile termice se prescriu în funcție de natura și dimensiunile materialului, figura 3.3.



**Figura 3.3.** Curba tratamentului termic aplicat semifabricatului metalic

**Tabelul 3.4.** Durata de încălzire a lingourilor calde până la temperatura de forjare în cuptoare cu flacără

Masa lingoului (tone)	Diametrul lingoului (în secțiune transversală (OC))	Temperatura cuptorului (la încărcare)	Durata (h)			
			Încălzire până la temperatura de forjare	Durata minimă de menținere la temperatura de forjare	Durata maximă de menținere la temperatura de forjare	Durata totală minimă
18-25,5	1092-1170	1100 °C	5,5	5,0	26	10,5



**Figura 3.4.** Legea de variație a temperaturii cu durată de menținere a semifabricatului  
 a - reprezentarea grafică a procesului de încălzire a lingourilor de pornire  
 în vederea forjării **12CrMo9-10**

b - grafic evoluție temperatură de forjare în cuptor cu vatră

În figura 3.4. se poate observa egalizarea temperaturii între cuptor și lingou la intervalele T1 și T2 conform graficului anexat în figura b. Încălzirea diferă în funcție de mai mulți parametri: tipul cuptorului, capacitatea și sistemul de încălzire, tipul lingoului folosit, dimensiuni, material (oțel) folosit, etc. Lingoul folosit la acest experiment este din **12CrMo9-10** tip hexagonal, dimensiunile fiind prezentate în figura nr.3.8. Lingoul este tip Breitenfeld cu oțel **12CrMo9-10** oțel calmat dezoxidat care s-a solidificat fără degajare de CO datorită conținutului scăzut de oxigen. Un factor important la calitatea semifabricatului forjat obținut este și calitatea materialului oțelului supus procesului de forjare.

Lingourile din **12CrMo9-10** sunt achiziționate având o structură ca cea prezentată în figura 3.8.:

**Zona 1** – zonă cu grăunți echiaxiali;

**Zona 2** – zonă de transcristalizare, cu grăunți alungiți în direcția fluxului termic, perpendiculară pe suprafața lingoului (formarea acestor zone se observă în figura nr. 3.8. de mai sus unde cristalele sub formă dendritică tind să crească în direcție perpendiculară pe suprafața lingoului, iar din lichidul interdendritic se formează din nou cristale echiaxiale ca în zona 3);

**Zona 3** – o zonă de trecere, cu grăunți axiali formați în lichidul interdendritic din spațiul Z2 și Z3.

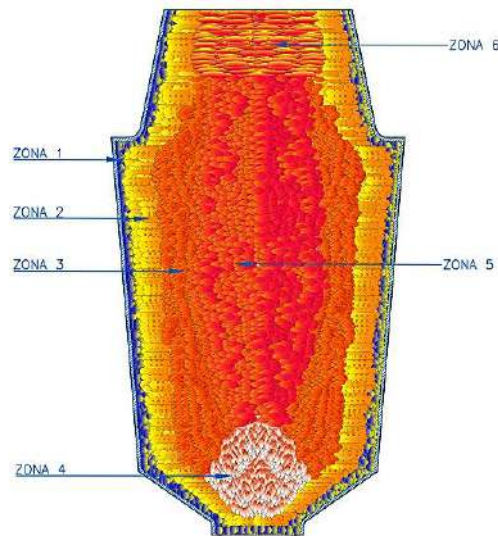
**Zona 4** – este piciorul lingoului formată din cristalele dendritice ale zonei 3 care nu au reușit să se fixeze în aceasta și fiind mai dense coboară pe verticală spre piciorul lingoului.

**Zona 5** – zona centrală care conține cele mai multe impurități și care se formează printr-o cristalizare spontană cu forme de grăunți echiaxiali, dar de dimensiuni mai mari.

**Zona 6** - este zona în care se formează retasura datorită fenomenului de contracție în timpul solidificării lingoului.

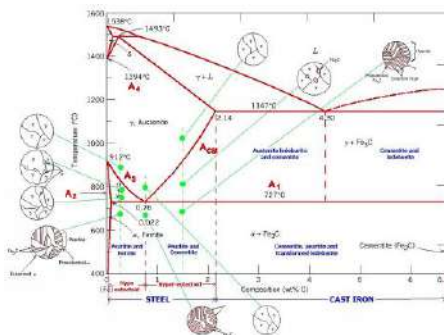
Ca o caracteristică generală lingoul, figura 3.5., se poate compune din:

- 1) **Maselotă** – (partea superioară) forma tronconică reprezentând 10- 29% din masa totală a lingoului. Aici se colectează impuritățile și se menține oțelul în stare lichidă, alimentând umplerea golurilor datorită contracției masei în curs de solidificare. Prezența ei este necesară pentru evitarea apariției retasurilor primare sau secundare în corpul lingoului.
- 2) **Corpul lingoului** – este cea mai importantă parte a lingoului din care se execută piesele forjate.

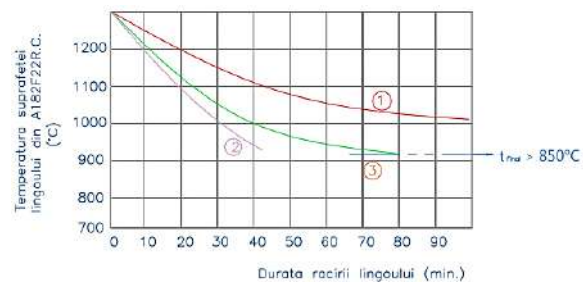


**Figura 3.5.** Secțiune printr-un semifabricat turnat cu evidențierea zonele termice specifice ale grăunților metalici structurali

În figura 3.6. este prezentată schematic diagrama Fe-C cu precizarea temperaturilor de forjare a oțelului **12CrMo9-10**. Schematic se observă linia de început de forjare ( $T_{max}$ ) undeva la peste  $1200^{\circ}\text{C}$  și linia de început de forjare ( $T_{min}$ ) undeva aproximativ  $900^{\circ}\text{C}$ . Drept constituent în intervalul hașurat avem cristale de austenită (soluție solidă de C în Fe  $\delta$ ). Diagrama este marcată atât în funcție de conținutul de carbon cât și în funcție de conținutul de scara marcare nr.2 (axa Ox), figura 3.7. În figura 3.6. sunt prezentate pe două zone intervalele de temperatură pentru forjare (zona 1- pornind deasupra liniei A3 și terminându-se undeva sub  $1250\text{-}1300^{\circ}\text{C}$ ) și concentrația în C a oțelului folosit în experiment **12CrMo9-10** = 0,11-0,15% (zona hașurată 2 pe plan vertical).



**Figura 3.6.** Diagrama Fe-C pentru **12CrMo9-10** în intervalul temperaturilor de forjare pentru **12CrMo9-10** (zona hașurată intersecție).



**Figura 3.7.** Dependența temperaturii suprafeței cu durata de răcire a lingoului metalic

La încălzirea materialelor metalice are loc fenomenul de dilatare (creșterea dimensiunilor piesei). Pentru calculul pieselor în stare caldă se utilizează coeficientul de dilatare care reprezintă raportul dintre creșterea dimensiunilor la temperatura dată și dimensiunea inițială. Valoarea medie a coeficienților de dilatare lineară a oțelului **12CrMo9-10** este aproximativ 0,000145%:

$$L = L_0(1 + \lambda t)$$

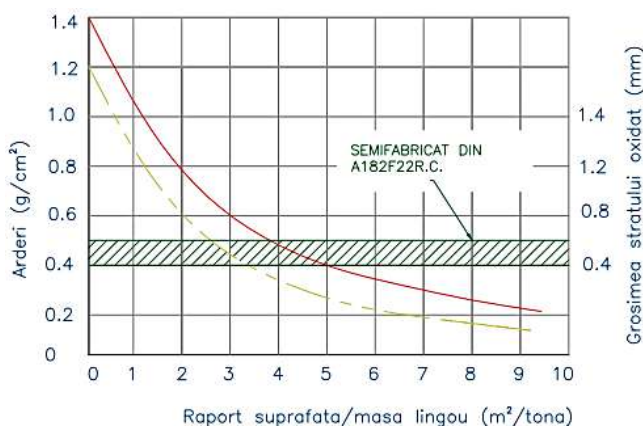


În cazul nostru, după a doua reîncălzire în vederea forjării piesa are următoarele dimensiuni  $\varnothing 950 \times \varnothing 260 \times 1816$ . Încălzirea se va face la  $1110-1150^\circ\text{C}$ .

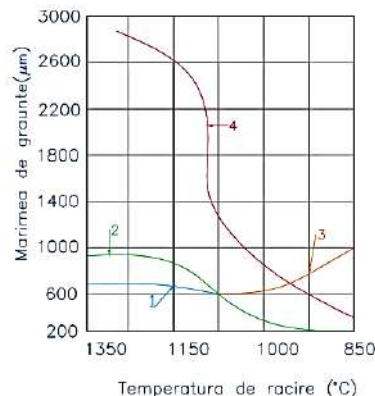
Dilatarea termică a semifabricatului va fi  $L=1816(1+0,000145 \cdot 1150^\circ\text{C})=1844$  mm adică lungimea piesei a crescut cu aproximativ 20 mm.

În timpul încălzirii au loc fenomene de oxidare și decarburare precum și creșterea granulației în structură, toate fiind influențate de temperatură și durata de încălzire. Astfel pentru piese mijlocii adâncimea stratului decarburat variază între 0,4 – 0,6 mm în cazul încălzirii semifabricatului nostru din **12CrMo9-10** în cuptor cu flacără.

Influența raportului dintre suprafața și masa piesei care exprimă compactitatea formei piesei (ilustrată în figura 3.8.).



**Figura 3.8.** Dependenta arderilor superficiale și grosimea stratului oxidat în funcție de raportul dintre suprafața și masa semifabricatului



**Figura 3.9.** Dependenta dintre dimensiunile graunților metalici și temperatura pentru diferite situații de caz, curbele 1,2,3 și 4.

Grosimea stratului oxidat (gso) se poate calcula și cu ajutorul:

$$g_{so} = \frac{mgo}{\rho \cdot \rho_{fe}} \text{ [cm]},$$

Influența temperaturii de forjare și a condițiilor de răcire asupra mărimii de grăunți a fost ilustrată pentru semifabricatul din **12CrMo9-10** în figura 3.9.

Influența mărimii de grăunțe de ferită la oțelul **12CrMo9-10** cu 0,11-0,15%C la diverse temperaturi în funcție de condițiile de răcire: 1, – forjat și răcit lent; 2– forjat și răcit rapid; 3- forjat și recopt la  $900^\circ\text{C}$ ; 4- încălzit și răcit, fără forjare

În figura de mai sus putem observa diferențele de temperatură la încălzirea semifabricatului **12CrMo9-10** Încălzirea cuptorului cu vatră cu gaz pentru normalizare se face până la  $600^\circ\text{C}$  apoi se introduce semifabricatul forjat.

Piesa atinge temperatură critică în dreptul termocuplului T2 mai repede ca urmare a secțiunii mai mici rezultate în urma forjării. Cam la diferențe de 95 mm raportate la o diferență de aproximativ 20 minute, termocuplul T1 atinge și el temperatură critică (ca urmare a secțiunii mai mari). Durata totală de menținere prezentată în figura de mai sus este de aproximativ 60 minute. Răcirea se face în aer.

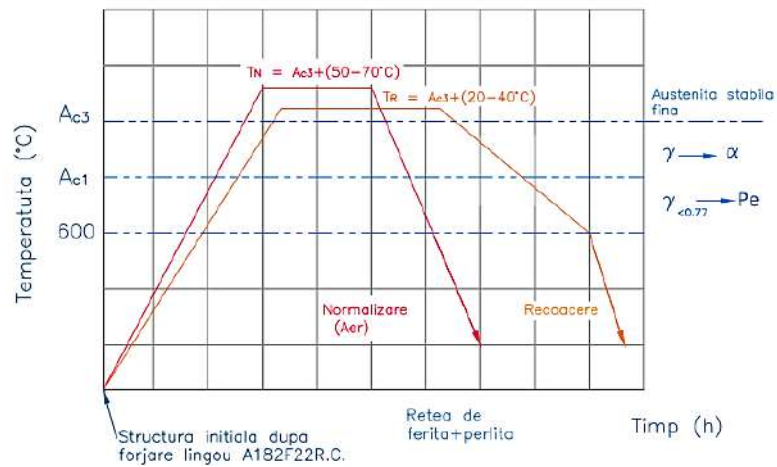
Ca urmare a tratamentului de normalizare se pot asigura:

- proprietăți mecanice de plasticitate și tenacitate superioare celor după forjare, ca urmare a granulației mai fine și distribuția uniformă a constituenților metalografici (ferită și perlită)

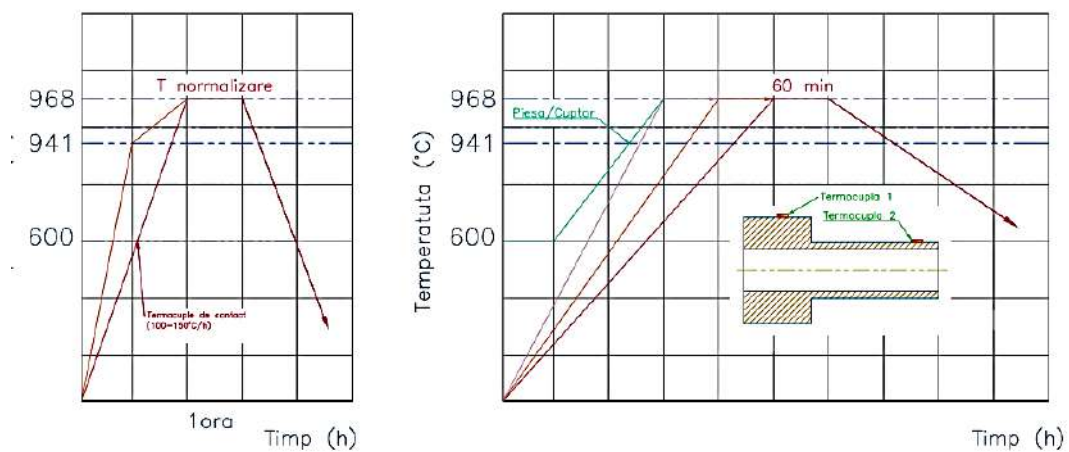
- eliminarea tensiunilor din piesă apărute ca urmare a procesului de forjare.

- asigură o prelucrabilitate mult mai bună semifabricatului **12CrMo9-10** pentru operația de eboșare;

- poate constitui și tratament termic final în cazul altor oțluri care nu impun caracteristici mecanice ridicate, implicit aplicarea unui tratament termic secundar.



**Figura 3.10.** Ciclul de recoacere și normalizare aplicat semifabricatului 12CrMo9-10



**Figura 3.11.** Parametrii TT normalizare pentru semifabricatul 12CrMo9-10 și diagrama cuptor/termocuple de contact..

**CAPITOLUL 4.**  
**DESCRIEREA TRATAMENTELOR TERMICE**  
**PENTRU SEMIFABRICATUL FORJAT 12CrMo9-10**

**4.1. Descrierea tratamentelor termice**

În scopul obținerii calității semifabricatului forjat **12CrMo9-10**, au fost realizate tratamentele termice de normalizare, călire și revenire.

Călirea reprezintă tratamentul termic realizat prin încălzirea oțelului deasupra punctului critic urmat de răcirea bruscă cu scopul de a obține proprietățile fizico – chimice dorite: duritate mare sau rezistență la abraziune

Tratamentul termic de revenire aplicat produselor călite și care constă în încălziri și mențineri la temperaturi stabilite sub linia de transformare, încât să se realizeze stări structurale și de tensiuni apropiate de starea de echilibru având ca scop eliminarea sau reducerea tensiunilor și a fragilității, îmbunătățirea tenacității și reducerea durității. Parametrii tratamentelor termice realizate în cadrul acestei teze sunt prezentate în tabelul 4.1. Pentru ca timpii de menținere să fie mai mici, se montează termocuplul de contact pe piesă, tabelul 4.1.

**Tabelul 4.1.** Parametrii tratamentelor termice realizate pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10**

Denumire tratament	Temperatura tratamentului, [°C]	Durata de menținere a semifabricatului forjat utilizând termocuplul de contact, [min]	Mediul de răcire
Normalizare	960	60	aer
Călire	940	120	apa
Revenire	655	180	Aer

Călirea este tratamentul termic aplicat semifabricatului din **12CrMo9-10** cu transformare polimorfă cu sau fără variația solubilității în scopul obținerii unei structuri impuse (martensită) de caracteristici mecanice.

Operația de călire comportă 3 etape succesive prezentate în figura 4.1.

- a) încălzirea produsului la temperatura de călire în domeniul austenitei;
- b) menținerea pentru omogenizare a austenitei și a temperaturii pe secțiune;
- c) răcirea prin inversarea într-un mediu suficient de energetic pentru realizarea transformării martensitice;
- d) viteza de încălzire ( $v_{inc}$ ) care poate fi considerată medie pe un interval de temperatură astfel variația ei este prezentată în figura 4.2.

$$v_{inc} = \frac{\Delta T}{t_{inc}} = \frac{T_{TT} - T_{ambient}}{t_{inc}} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.1.)$$

Menținerea reprezintă a doua operație de bază caracterizată în afară de parametrul  $T_{TT}$  și de durata de menținere  $t_m$ . Calculul duratei totale de încălzire  $t_T$  este:

$$t_T = t_{inc} + t_m \quad (4.2.)$$

Durata de egalizare depinde de conductivitatea termică ( $\lambda$ ) a materialului metalic și de dimensiunile piesei (diametrul  $D$ ,  $d$ ,  $L$ ), iar durata de transformare depinde de tipul tratamentului termic, în cazul nostru parametrul:

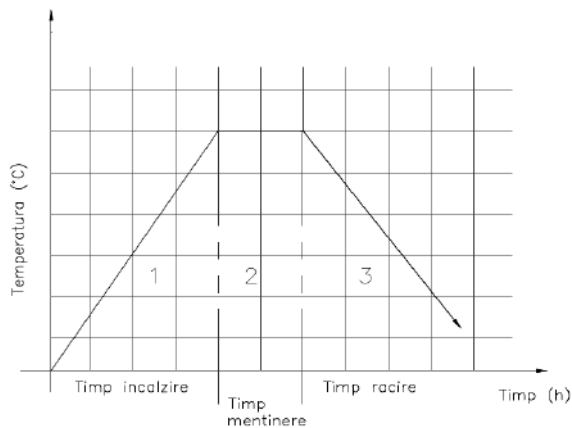


$$t_{ir} = \frac{1}{3} \dots \frac{1}{2} t_{eg} \quad (4.3)$$

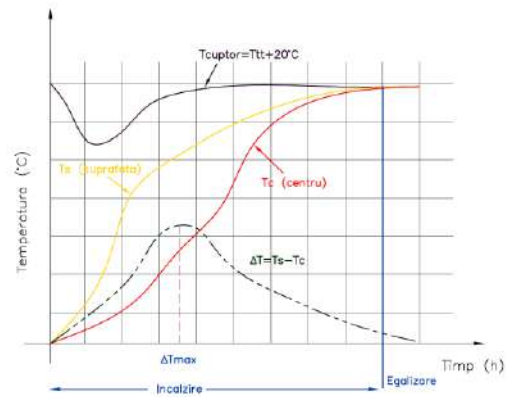
$$t_{(inc+eg)} = k \cdot D_{\min} \quad (4.4)$$

Răcirea este a treia operație a tratamentului termic și asigură rezultatul final al acestuia, prin viteza de răcire aplicată  $v_{rac}$ , aceasta fiind al 2-lea parametru important după  $T_{TT}$ . În acest sens ca mediu de răcire se folosește apa.

$$v_{rac} = \frac{T_{TT} - T_{mediu-răcire}}{t_{rac}} \quad (^\circ\text{C/s}) \quad (4.5)$$

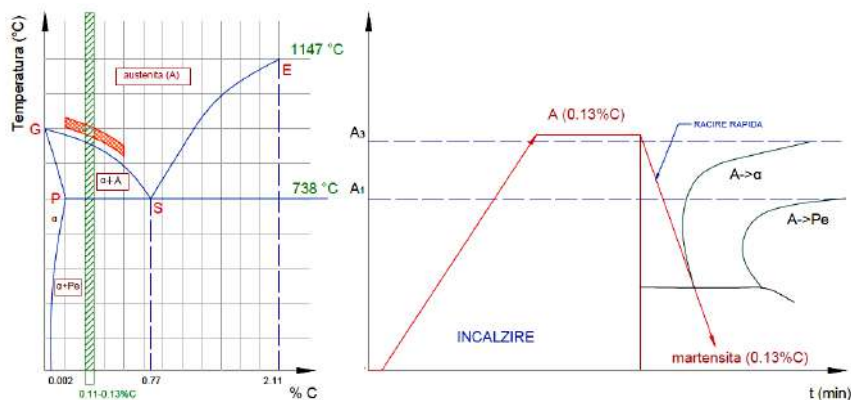


**Figura 4.1.** Ciclu elementar și operațiile de bază ale tratamentului termic secundar. (1-încălzire; 2-menținere; 3-răcire).



**Figura 4.2.** Regimurile de încălzire pentru semifabricatul analizat - **12CrMo9-10**

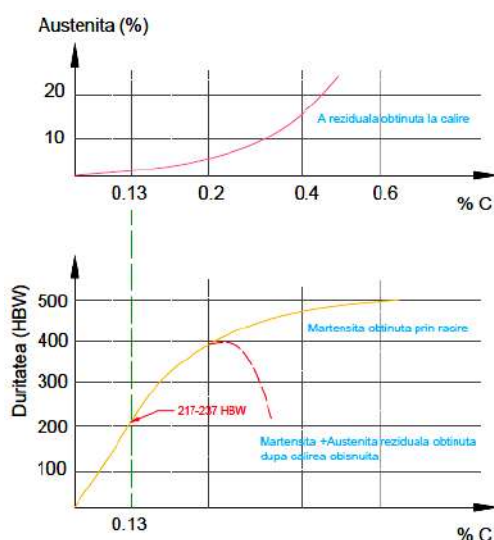
Sucesiunea operațiilor la încălzirea martensitică pentru produsul **12CrMo9-10** (0,11-0,15%C) aflat inițial într-o stare de echilibru structural este prezentat în figura 4.3. Pornind de la o structură de normalizare, uniform structural dar neomogenă chimic, încălzirea urmărește obținerea unei structuri monofazice chimic - austenita. Aceasta se obține prin depășirea punctelor de transformare  $A_{c1}$  și  $A_{c3}$ . Răcirea continuă ce urmează după încălzire și menținere, este raportată la diagrama termocinetică de transformare a austenitei pentru oțelul **12CrMo9-10** pentru obținerea caracteristicilor mecanice și a martensitei viteza de răcire trebuie să evite formarea prin germinare și creșterea din austenită a feritei proeutectoide și a perlitei (proces schematic prezentat în figura 4.3).



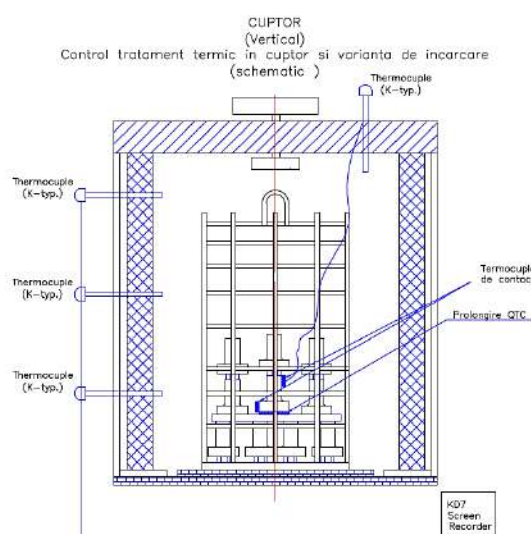
**Figura 4.3.** Domeniul de încălzire și ciclul de operații la călirea piesei din **12CrMo9-10**

Martensita aliajelor Fe-C are o structură apropiată de structura fierului (CVC), este o soluție solidă  $\alpha$  suprasaturată în carbon și are aceeași compoziție chimică ca austenita din care provine. Prezența unui exces de carbon (reținut datorită condițiilor de răcire) în fierul  $\alpha$  determină o modificare a rețelei. Martensita formată în acest oțel este relativ dură și fragilă. Această duritate este cauzată de tensiunile interne ce apar datorită prezenței carbonului în exces și de faptul că aceste tensiuni nu se pot relaxa la nivelul scăzut al temperaturii la care acestea se produc. Variația durității martensitei cu conținutul de carbon 0.11-0.13 % este prezentată în figura 4.4. Se poate observa clar că mărimea cristalelor de martensită depinde de compoziția chimică, mărimea și starea structurală a austenitei din care provine.

În figura 4.4. se poate observa că duritatea structurii de călire formată din martensita și austenită scade odată cu creșterea cantității de carbon datorată creșterii cantității de austenită reziduală. La călire se urmărește obținerea unei martensite fine, uniforme, fără apariția unor deformări excesive și a fisurilor.



**Figura 4.4.** Variația durității martensitei în funcție de conținutul de carbon al aliajelor fier-carbon și influența austenitei reziduale asupra durității după călire



**Figura 4.5.** Schema cuptorului tratamentului termic.

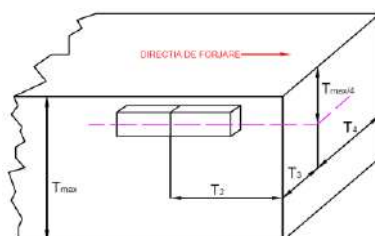
#### 4.2. Influența temperaturii de încălzire și a ratei de răcire după forjarea liberă asupra microstructurii și proprietăților mecanice ale oțelului 42CrMo4 EN-10250

Factorii care influențează comportamentul piesei sunt compoziția chimică și temperatura, astfel încât la o răcire mai accelerată, ca de exemplu în aer în cazul normalizării (RN), se observă o îmbunătățire a caracteristicilor mecanice (duritate și rezistență la tracțiune). Structura semifabricatului devine totuși mai omogenă, cu valori foarte bune de mărime a grăuntelui austenitic în cazul recoacerii de omogenizare, cu o răcire relativ mai lentă (RO). Ambele tipuri de tratamente RN sau RO în urma testelor de laborator au determinat valori de duritate și caracteristici mecanice conforme cu standardul EN-10250, fapt ce denotă obligatoriu aplicarea lor după operațiile de forjare liberă sau matrițare. Standardul care reglementează caracteristicile mecanice și compoziția chimică a oțelului 42CrMo4 EN-10250

Probele pentru încercările mecanice au fost prelevate după următoarele metode:

1. Piesele de dimensiuni mici, nu depășesc în secțiune 500 mm au fost prelevate longitudinal pe axa de forjare;
2. Probele se pot preleva pe întreaga suprafață (aria secțiunii de prelevare este mai mică de  $100 \text{ cm}^2$ ) plecând de la axa 0 de forjare a piesei la distanța de  $T/2$  față de extremități;
3. Pentru secțiuni mai mari de  $100 \text{ cm}^2$  diametrul probelor va fi maxim  $\text{Ø}25 \text{ mm}$ , sau metoda de prelevare, figura 4.7.
4. Numărul de probe pe sarja de elaborare/forjare depinde de forma pieselor forjate, tratamentele termice aplicate astfel pentru piese până în 15 tone se pot preleva 4-6 probe pentru încercări mecanice (dacă nu există alt acord cu beneficiarul).

Analiza variației de temperatură la încălzire și răcire poate influența caracteristicile mecanice și mărimea grăuntelui austenitic astfel la încălziri și răciri necorespunzătoare poate duce la mărirea grăuntelui austenitic, proporție neadecvată de ferită și perlită, fisuri în timpul utilizării piesei finite sau chiar din timpul prelucrărilor mecanice; **42CrMo4** este un oțel aliat cu crom și molibden și este utilizat pentru realizarea de axe, bolturi, roți dintate, arbori etc. Este prezent sub diferite denumiri în funcție de regiune și standard, cu mici variații ale compoziției chimice ca în tabelul 4.2. Domeniul de temperatură de forjare este cuprins între  $1150 - 1200^\circ \text{C}$ , iar forjarea sub  $850^\circ \text{C}$  este interzisă.



**Figura 4.6.** Modalitate de prelevare proba pentru forjare **42CrMo4** în stare +NT sau +QT  
(în acest caz  $T_2=T_3=T_4 \geq T_{\max}$  ; unde  $T_{\max}$  secțiunea maximă a piesei).

**Tabelul 4.2.** Denumirea pentru **42CrMo4** în funcție de regiunea de proveniență.

ZONA	USA	GERMANIA	MAREA BRITANIE	JAPONIA	CHINA	AUSTRALIA
STANDARD	ASTM A29	DIN17200	BS970	JIS G4105	GB/T 3077	AS 1444
GRAD	4140	42CrMo4	42CrMo4	SCM440	42CrMo	4140

Tratamentele termice primare pentru **42CrMo4** pot fi: recoacere după forjare cu încălzire la  $700-820^\circ \text{C}$  și răcire în cuptor; normalizare cu încălzire la  $820-900^\circ \text{C}$  și răcire în aer; sau normalizare + revenire (încălzire la  $550-650^\circ \text{C}$  menținere 1 ora/ 25mm secțiune și răcire în aer). Ca tratament termic secundar poate fi încadrat și normalizare + revenire sau călire + revenire (încălzire la  $820-900^\circ \text{C}$ , menținere 10 -15 min/25 mm secțiune și racire rapidă în apă, ulei sau polymer urmat de o revenire înaltă/medie sau joasă fiind necesar un control al durității în funcție de cerințele de duritate).

**Procedura experimentală** conform EN-10250 au fost prelevate mai multe probe 8 mm lungime și diametru 14 mm (modalitatea de marcare și prelevare este prezentată în **Figura 2**). Probele au fost utilizate în evaluarea compoziției chimice și determinarea mărimii grăuntelui austenitic în cazurile de reîncălzire și răcire lentă sau răcire rapidă (a fost utilizată metoda oxidării).



**Figura 4.7.** Prelevare probe incercari mecanice.  
*Poze capturată în timpul studiului de caz*

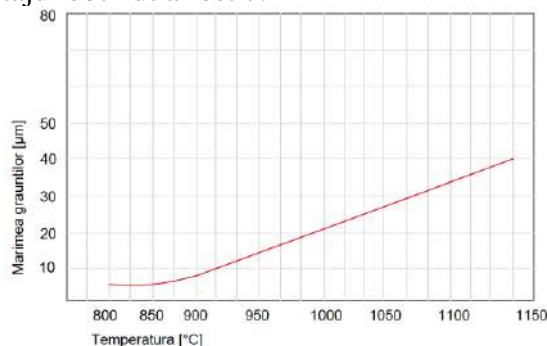
**Tabelul 4.3.** Compoziția chimică a probelor analizate

Marcaj	C %	Si %	Mn %	P%	S%	Cu %	Ni %	Cr %	Mo %	V %	Al %	Ti %
Probe 42CrMo4	0.44	0.31	0.96	0.009	0.002	0.16	0.16	1.04	0.17	0.03	0.025	0.003

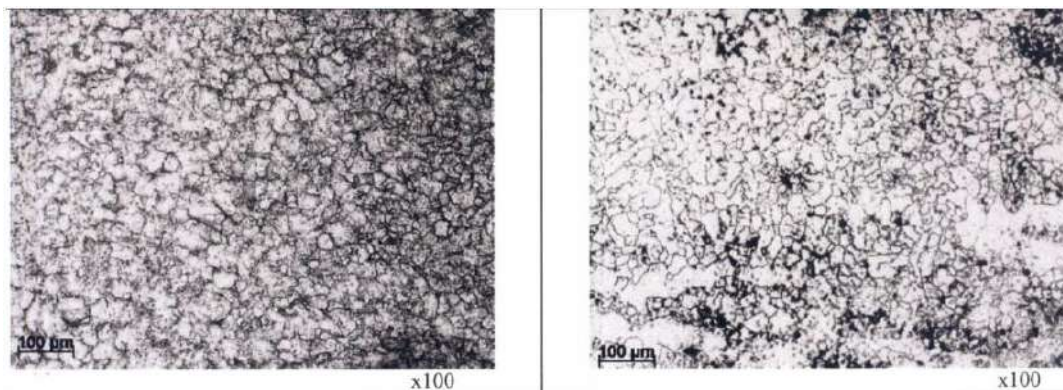
## Rezultate si discutii

### Efectul încălzirii și răcirii diferențiate asupra mărimii de graunte

Relația dintre temperatura de încălzire și mărimea de grăunte este dată în figura 4.8.. Se observă o creștere a mărimii de grăunte odată cu creșterea temperaturii (sau variației elementelor de aliere). Răcirea rapidă și neuniformă duce la apariția unei structuri relativ grosolane ca cea prezentată în figura 4.9. în acest caz mărimea de grăunte variază de la mărimea 0 la 5 conform SR EN ISO 643-2013. Mărimea de grăunte a fost determinată prin metoda oxidării, iar punctajul obținut a fost 7.



**Figura 4.8.** Variatia marimii graunelui cu temperatura (timp mentinere probe 120 s.)



**Figura 4.9.** Mărimea de grăunte ereditat prin metoda oxidării.  
*Poze capturată în timpul studiului de caz*



### 4.3. Efectul încălzirii și răcirii diferențiate asupra microstructurii și caracteristicilor mecanice

Analiza microscopică efectuată în prima secțiune brut forjată (prezentată în figura 4.11.) relevă existența unor incluziuni nemetalice izolate de tip sulfuri și oxizi de dimensiuni reduse. Figura 4.10 prezintă aspectul macroscopic pe secțiuni: a- pentru semifabricat forjat, b- semifabricat forjat repect. Se observă că în urma forjării granulația este relativ grosolană și neomogenă la bază comparativ cu varianta supusă tratamentului termic primar.

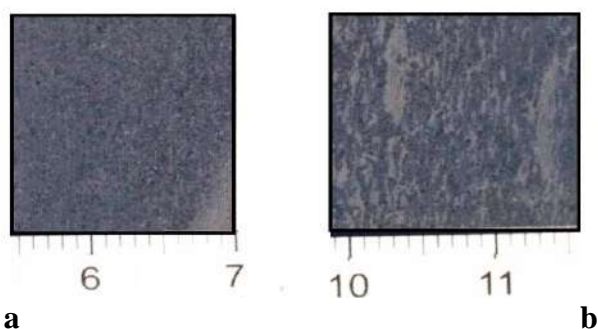


Figura 4.10. Aspectul macroscopic al secțiunii analizate.

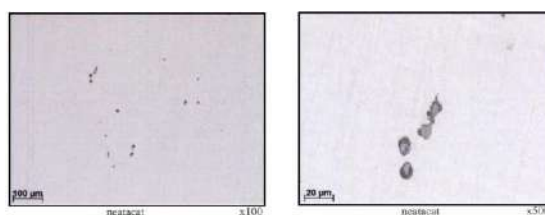


Figura 4.11. Incluziuni metalice izolate.

S-au realizat mai multe analize microscopice pe probele menționate punându-se în evidență următoarele concluzii:

- **Figura 4.12.** - microstructura este formată din perlită lamelară și globulizată, ferită în proporție redusă și bainită. În unele zone s-au evidențiat grăunți cu mărime de grăunte 1. Granulația este relativ neomogenă fiind cuprinsă între 1 și 5 conform SR EN ISO 643-2013;

- **Figura 4.13.** - microstructura este formată din perlită lamelară și globulizată, ferită în proporție redusă și bainită. Granulație ușor neomogenă fiind cuprinsă între 1 și 5 conform SE EN ISO 643-2013. Pe suprafața interioară a piesei forjate se observă o ușoară decarburare.

- **Figura 4.14.** - microstructura neomogenă formată din perlită lamelară și globulizată, ferită în proporții reduse și bainită. Structura este caracteristică unei structuri brute de forjare urmata de o răcire în aer. În unele zone cu segregatii s-au evidențiat grăunți mari (mărime de grăunte 0) alcătuiți din perlită și bainită. Granulație neomogenă fiind cuprinsă între 0-5 conform SR EN ISO 643-2013;

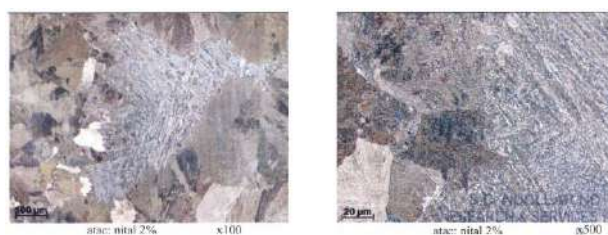
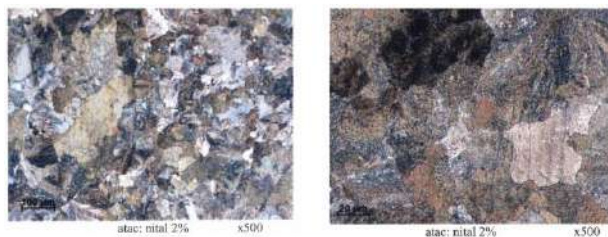
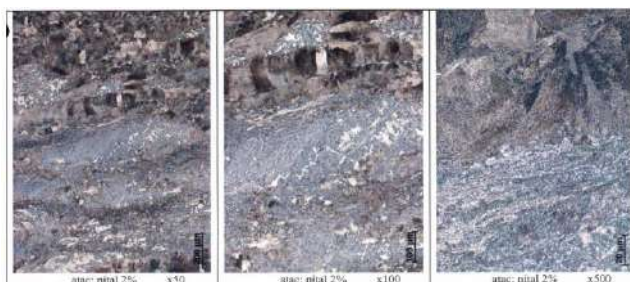


Figura 4.12. Microstructura probei analizate - proba Nr. 1.  
Poze capturate în timpul studiului de caz

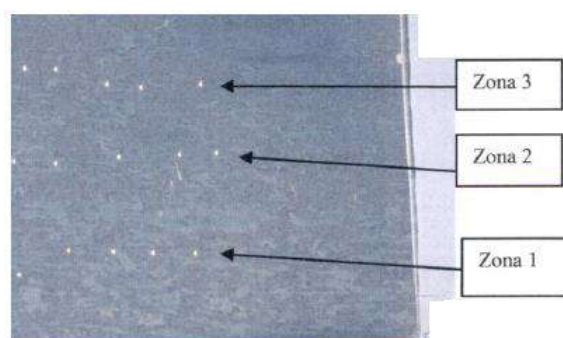


**Figura 4.13.** Microstructura probei analizate - proba Nr. 2.  
*Poze capturate în timpul studiului de caz*



**Figura 4.14.** Microstructura probei analizate - proba Nr. 3.  
*Poze capturate în timpul studiului de caz*

În **figura 4.15.** este prezentată locația de pe proba unde s-a realizat testul de duritate VICKERS conform SR EN ISO 6507-1 / 2006. Încercarea la duritate HV10 s-a realizat pe 3 linii de axa a probei iar valorile obținute sunt redată în tabelul 4.5..



**Figura 4.15.** Încercarea la duritate.  
*Poza capturate în timpul studiului de caz*

**Tabelul 4.4.** Valorile durității obținute pentru cele 3 zone.

Zona Incercata	REZULTATE OBTINUTE					Media HV10	Conversie conf. SR EN ISO 18265-2014 HRC
	1	2	3	4	5		
Zona 1	262	264	262	260	254	<b>260</b>	<b>24</b>
Zona 2	260	254	262	258	262	<b>259</b>	<b>24</b>
Zona 3	256	249	256	256	254	<b>254</b>	<b>23</b>

Pentru încercarea la tracțiune echipamentul folosit: Masină universală de încercări mecanice 20 ToF - 1033/91 după tratament termic primar conform SR EN ISO 6892-1/2010 \_ Metoda B. Rezultatele au fost transpuse în tabelul 4.5.

Inercarea la încovoiere prin șoc - echipament folosit Pendul Charpy - 423.38.75 conform SR EN ISO 148-1/2011, iar rezultatele sunt transpuse în tabelul 4.6.

**Tabelul 4.5.** Inercarea la tracțiune

Marcaj	Direcția de prelevare	Locul de prelevare	Tip epruvetă	R <sub>p0,2</sub> (PS) [MPa]	R <sub>m</sub> UTS [MPa]	A EL [%]	Z RA [%]
731 T	Long.	-	Ø10 mm	512	843	15.4	31.1
<b>Valori Impuse</b>				≥ 500	≥ 750	≥ 14	

**Tabelul 4.6.** Inercarea la incovoiere prin soc/ Charpy testing.

Marcaj	Direcția de prelevare	Locul de prelevare	Tip epruvetă	Procedura de testare		Media	Rezilienta [J/cm <sup>2</sup> ]	Fb [%]
				T [°C]	Energ E <sub>CVN</sub> [J]			
731 Kv1	Long.	-	Kv 10X10X55	25	12	10	-	-
731 Kv2	Long.	-	Kv 10X10X55	25	10		-	-
731 Kv3	Long.	-	Kv 10X10X55	25	8		-	-

În această lucrare am analizat efectul și importanța aplicării tratamentului termic secundar în urma obținerii de semifabricate brute forjate realizându-se o evaluare a macrostructurii și microstructurii astfel:

1. Variația mărimii grăuntelui austenitic depinde de concentrația elementelor de aliere și temperatură, în cazul nostru pentru reperul forjat la 1150 °C s-a găsit o structură grosolană formată din perlită lamelară, bainită și ferită în proporții reduse;

2. În urma aplicării Tratamentul Termic Recoacere apare o structură îmbunătățită favorabilă prelucrarilor mecanice, nu mai este predispusă la fisurări sau apariției incluziunilor intergranulare.

3. Modelarea caracteristicilor mecanice depinde de tipul celor 2 operații de forjare liberă și TT primar **42CrMo4** încadrându-se perfect în cerințele standardului în stare recoaptă.

#### **4.4, Cercetări experimentale privind procedura de elaborare a semifabricatelor forjate standardizate utilizate la sisteme subacvatic, (material 25CrMo4)**

Standardul care reglementează procesul de forjare al materialelor metalice cu destinație specială pentru sisteme subacvatic este DNV-GL-ST-F101.

Scopul aplicării acestui standard este de ghida cerințele conceptelor de dezvoltare și design, utilizarea competență a materialelor metalice și efectul coroziunii, acoperiri și protecție în exploatare, operații și încercări mecanice ale materialelor utilizate, asamblare prin sudare, control NDT.

Obiectivele principale ale DNV-GL-ST-F101 sunt: de a asigura dezvoltarea conceptului și operațiile necesare obținerii produsului finit într-un regim de siguranță publică și protecție a mediului înconjurător; [11],[16],[20] asigură o recunoaștere internațională în domeniul utilizării materialelor cu destinație specială prin definirea de minime cerințe pentru

realizarea produsului; oferă o transparență ridicată atât producătorilor cât și cumpărătorilor sau contractorilor finali.

Aplicațiile semifabricatelor forjate asigurate de DNV-GL-ST-F101 sunt multiple și diferă în funcție de industria în care operează produsul finit (industria petrolului, gaze naturale [11],[21],[22]etc.) materialul forjat folosit, caracteristicile, forma și dimensiunile semifabricatului forjat, caracteristicile mecanice necesare exploatații. În acest sens o importanță deosebită este acordată raportului dintre stres și gradul de deformare prezentat în figura 4.16.

Se poate observa dependența dintre caracteristicile mecanice: rezistența mecanică și alungire, curgerea și deformarea plastică a materialului.

Modalitatea de prelevare a probelor și direcția de prelevare conform DNV-GL-ST-F101 este prezentată în figura 4.17 (longitudinal și tangential la 1/2T și 1/4T tangential la epruvete rezistența mecanică; longitudinal și tangential la 1/2T și 1/4T cu 2 mm distanță de la suprafața pentru KV).

## 2. Metoda experimentală

Scopul urmărit prin elaborarea procedurii de obținere a semifabricatelor forjate și destinația specială este acela de a asigura o transparență ridicată în certificarea produsului finit și pe toată durata procesului de elaborare și pentru a asigura certificarea superioară de o terță parte la nivel de certificat 3.2.

Necesitatea implementării Procedurii de Elaborare (MPS) o reprezintă aderarea la certificari superioare 3.2 standardizate pe anumite domenii de exploatare a semifabricatelor forjate.

Pentru aplicarea cerințelor din DNV-GL-ST-F101 pentru partea experimentală s-a realizat forjarea unei piese de forma și dimensiunile prezentate în figura 3.18 (desen nr. A452392-18 Rev D).

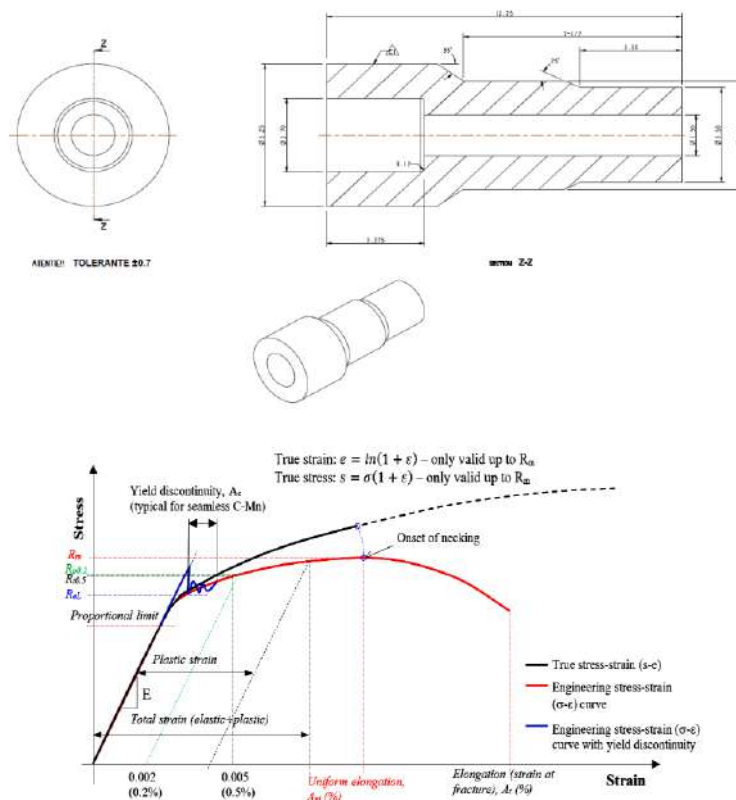
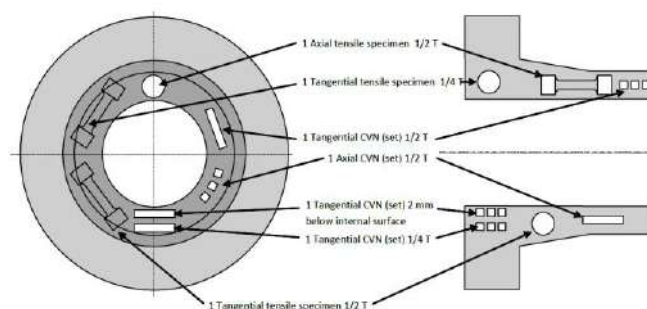


Figura 4.16. Dependența dintre caracteristicile mecanice conf. DNV-GL-ST-F101.





**Figura 4.17.** Modalitatea și direcția de prelevare a probelor conform DNV-GL-ST-F101.

Materialele de pornire (lingouri, bare laminate etc) sunt comandate în conformitate cu specificațiile standardelor de materiale. Materialul este topit și elaborat în cuptor electric urmat de dezoxidare (AOD) sau vacuum (VAR). Materialul de bază este 25CrMo4, (numarul de bucați și sacrificările pentru încercări mecanice sunt prezentate în tabelul 4.8).

Dimensiunile cuptorului 4m x 2m x 1.2m (LxWxH). toate cuptoarele sunt dotate cu termocuple de contact conectate la calculator cu grafice aferente de tratament termic. Sistemul de control este în concordanță cu DNVGL-RP-0034/API RP 6HT.

Toate piesele vor fi încărcate pe un singur rând cu aproximativ 50 mm între ele. Orientare cuptor: orizontal. Modalitatea de încărcare a cuptorului este în conformitate cu specificațiile DNV-GL iar proba de sacrificiu va fi plasată în centrul cuptorului. Parametrii de tratament termic sunt evidențiați în tabelul 4.10

Tratamentul termic va începe când toate termocuplele de contact vor atinge punctul de setare cu toleranța  $\pm 14^{\circ}\text{C}$  și de minim  $\pm 8^{\circ}\text{C}$ . In cuptorul de tratament termic există : sisteme de monitorizare a temperaturii, sisteme de ventilație (turbine), control al intervalului de timp și sistem de recirculare al lichidului de răcire.[13],[17].

Transferul pieselor de la cuptorul de tratament termic la tancul de răcire este efectuată în maxim 60 secunde.

Parametrii de tratament termic:

#### 1. Normalizare:

- temperatura de încărcare :  $< 750^{\circ}\text{C}$
- viteza de încălzire:  $100-200^{\circ}\text{C/ ora}$
- menținere la temperatura de austenitizare  $890^{\circ}\text{C min. 1 ora / termocuple de contact}$
- răcire în aer.

#### 2. Austenitizare

- temperatura de încărcare :  $< 750^{\circ}\text{C}$
- viteza de încălzire:  $100-200^{\circ}\text{C/ oră}$
- menținere la temperatura de austenitizare  $860^{\circ}\text{C min. 1 oră / termocuple de contact}$
- răcire în apă
- temperatura apei este de max.  $20^{\circ}\text{C}$
- temperatura de suprafață a pieselor la finalizare tratamentului aprox.  $50^{\circ}\text{C}$

#### 3. Revenire

- temperatura de încărcare :  $< 550^{\circ}\text{C}$
- viteza de încălzire:  $100-200^{\circ}\text{C/ ora}$
- menținere la temperatura de austenitizare  $685-690^{\circ}\text{C min. 2 ore / termocuple de contact}$
- răcire în aer.

Întreg ciclul de tratament termic conform API RP 6HT prin utilizarea termocuplelor de contact, la atingerea punctelor critice de tratament va fi de minim 60 minute și minim 120 min la tratamentul de revenire.

Un tratament aparte de simulare în anumite condiții uneori extreme de utilizare a piesei sau pentru a evidenția anumite caracteristici mecanice în cazul nostru SPWHT va fi:

- încălzire la 650 ° C menținere 2.5 ore minim și maxim 5 ore (la o temperatură de încălzire aprox. 150 ° C / oră).

În această lucrare am analizat condițiile și etapele pe care un semifabricat forjat trebuie să le îndeplinească pentru a fi acreditat cerințelor standardului DNV-GL-ST-F101. Atât tehnica de forjare cât și tipurile de tratament termic aplicate sunt importante pentru a se încadra în cerințele normei de evaluare și a oferi posibilitatea emiterii unui certificat 3.2 recunoscut internațional.

Principalele concluzii pot fi sintetizate astfel:

- Standardul DNV-GL-ST-F101 este important și folosit pe scară largă în domeniul metalurgiei, în special al semifabricatelor forjate din domeniul extracției, gazelor naturale, petrol, maritime etc.

- procedura de emiterie a unui certificat de material cu recunoaștere internațională DNV-GL tip 3.2 presupune îndeplinirea unor criterii esențiale atât în domeniul forjării cât și tratamentul termic;

- Forjarea materialelor presupune obținerea semifabricatelor forjate în mai multe etape succesive și cu un anumit grad de deformare acceptat;

- tratamentul termic aplicat se realizează în mai multe etape succesive, și este controlat cu termocuple de contact;

- proba obligatorie o sacrificare a unei piese forjate - ebosate și este plasată în centru sarjei de tratament termic. Sarjarea se va face pe un singur rând.

- toate caracteristicile mecanice inclusiv cele obținute în urma SPWHT sunt trecute pe certificatul de calitate al produsului finit.

**CAPITOLUL 5.**  
**DESCRIEREA INCERCĂRILOR MECANICE**  
**LA TRACȚIUNE PENTRU SEMIFABRICATUL FORJAT 12CrMo9-10**  
**5.1. Descrierea încercărilor mecanice la șoc – reziliența –**  
**pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10**

Dacă în timpul încercării epruvetă este deformată, dar nu ruptă, energia absorbită nu se reține. Incercarea la șoc a epruvetelor se poate face la temperatura camerei ( $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) sau la temperaturi scăzute (până la  $-60^{\circ}\text{C}$ ). Răcirea epruvetelor se face într-o cameră frigorifică. Mediu de răcire este format din alcool tehnic care trebuie să acopere epruvetele Charpy cu cel puțin 25 mm de lichid. Timpul de menținere la temperatură prescrisă este de minim 5 minute, iar temperatura poate varia în camera frigorifică cu  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Poziționarea epruvetei pe reazeme se va face cu cleștele etalon după ce acesta a fost răcit în prealabil alături de epruvete, pentru a avea aceeași temperatura cu epruveta. Valoarea energiei necesare ruperii este citită pe monitorul calculatorului de la ciocan și trecută pe comanda de lucru.

**5.2, Descrierea încercărilor mecanice – duritate – pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10**

Valorile obținute în urma măsurătorilor pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10** sunt prezentate în tabelul 5.1.

**Tabel 5.1.** Rezultatele obținute în urma încercărilor mecanice pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10**  
**Rezultatele obținute pe baza cercetărilor proprii.**

Produs/Product				Material	Sarja/Heat	Sarja TT/Heat treat lot	Specificație/Specification					
Semifabricat forjat				<b>12CrMo9-10</b>	91884	50133	A182/A182M					
Tip/Type/Dimensiune/Dimension QTC (mm)				Prelungire. 249x249x165								
<b>Caracteristici mecanice / Mechanical Characteristics</b>												
Testul de tracțiune / Tension Test				Testul de șoc / Charpy Test					Duritatea/Hardness			
Metoda (ultima editie) /Method( last edition):												
ASTM E8		ASTM E 21		-	-	ASTM E 23					ASTM E10	
Mod prelevare/ Specimens location	Orientarea epruvetei/ Specimens orientation	Dimensiune probă / Dimension Specimens (mm)				Dimensiune probă / Dimension specimens(mm)			Expansiunea laterală/ Lateral expansion			Temperatura/ Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
		Ø 12.5		Ø 10		10x10x55						
		x										22
		Temperatura/Temperature( $^{\circ}\text{C}$ ): 22				Temperatura/Temperature( $^{\circ}\text{C}$ ): -46						
		<b>Rp0.2</b> (MPa)	<b>Rm</b> (MPa)	<b>A</b> (%)	<b>Z</b> (%)	<b>KV</b> (J)	<b>KV</b> (J)	<b>KV</b> (J)	Mm	mm	mm	<b>HBW</b>
1/4T	L	577	697	24	76	240	240	240	-	-	-	217

### 5.3. Descrierea determinării dimensiunii grăuntelui austenitic pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10

În cadrul acestui studiu de caz se determină valoarea indicelui de mărime a grăuntelui austenitic. Determinarea indicelui de mărime a grăuntelui austenitic se va face de regulă pe o singură probă pe sarjă de elaborare, dacă specificația clientului nu prevede altfel.

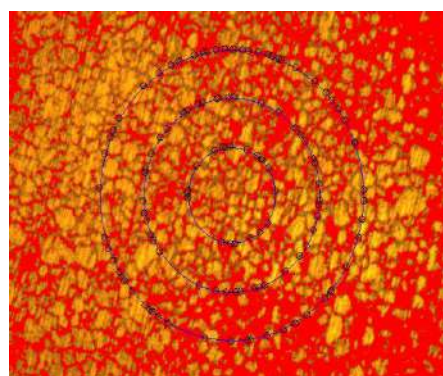
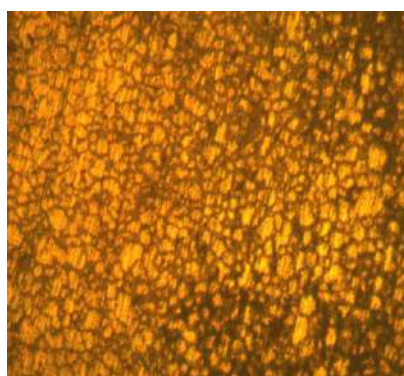
Indicele de mărime al grăuntelui austenitic se determină pe microscop folosindu-se o mărire de 100x. Determinarea indicelui de mărime al grăuntelui austenitic se va face prin metoda comparării cu imagini-tip. Dacă indicele de mărime se aproximează la jumătate de unitate, atunci el se rotunjește la număr întreg. Condițiile determinării dimensiunii grăunților sunt prezentați în tabelele 5.2. și 5.3.

**Tabelul 5.2.** Parametrii desfășurării condițiilor necesare determinării indicelui de mărime a grăuntelui austenitic pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10

Material analizat	A182 F22	
Metoda, standard	ASTM E112-2013	
Echipament	MICROSCOP JP-6A	
Obiectiv	x100	200x și 500x
Lot tratament	50133	
Sarja de elaborare	91884	

**Tabel 5.3.** Valoarea mărimii grăuntelui în funcție de numărul de interceptări  
*Rezultatele obținute pe baza cercetărilor proprii*

Nr.crt	Nr. de interceptări	Mărimea grăuntelui
1.	115	6
2.	141	7
3.	139	7
4.	120	6



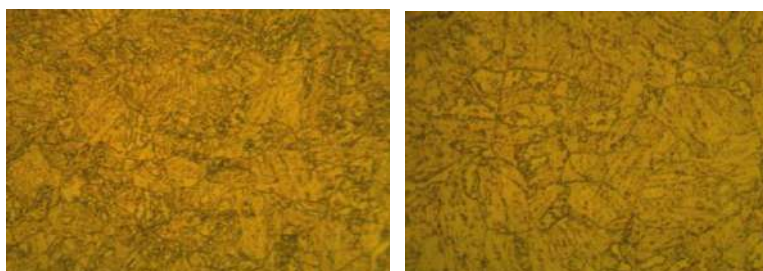
**Figura 5.1.** Aspectul microscopic al grăunților austenitici pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10  
*Poze capturate în timpul studiului de caz.*

În urma studiului de caz care cuprinde un număr de interceptări, rezultă că valoarea punctajului obținut este 6-7, adică media citirilor.

#### 5.4. Descrierea analizei metalografice - determinări structurale -pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10

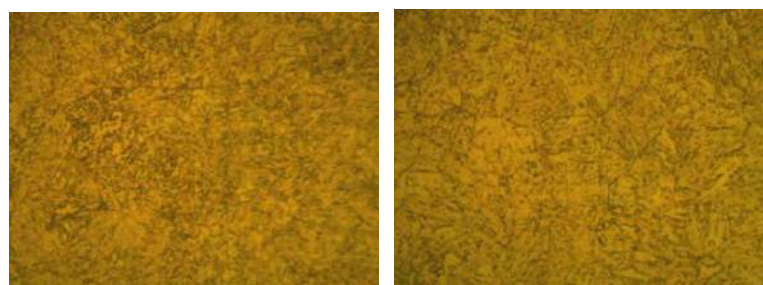
Determinarea microstructurii se face de regulă la o mărire de x100 sau x200 pentru a pune în evidență eventualele segregatii și la mărituri de x400 sau x500 pentru a pune în evidență constituenții structurali obținuți după operația de călire și revenire. Proba se prelevează după care se șlefuieste și se atacă cu soluție Nital 2.%.

Determinarea macrostructurii se face de regulă pe probe de cca 15 - 20 mm tăiate fie dintr-un laminat, forjat sau dintr-o piesă, figurile 5.2.; 5.3. Proba se rectifică, se degresează și apoi se atacă cu un reactiv. De regulă se utilizează un amestec de 85% acid clorhidric + 10% apă distilată. Durata atacului este de o oră. După 40 minute de la începerea atacului se poate pune 5% apă oxigenată. Suprafața se examinează la mărirea de x10 (examinare vizuală).



**Figura 5.2.** Microstructura pe direcție transversală în zona  $\frac{1}{2}$  T pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10:

*T\*-secțiunea de prelevare a probei  
Poze capturate în timpul studiului de caz.*



*Marime obiectiv 200x*

*Marime obiectiv 500x*

**Figura 5.3.** Microstructura pe direcție longitudinală în zona  $\frac{1}{2}$  T, semifabricatul forjat 12CrMo9-10:

*T\*-secțiunea de prelevare a probei  
Poze capturate în timpul studiului de caz.*

#### 5.5. Descrierea analizei incluziunilor metalice pentru semifabricatul forjat 12CrMo9-10

Determinarea incluziunilor nemetalice se face conform Metoda A, sau metoda D din ASTM E45. Numărul minim de probe care se pregătesc pentru evaluarea unei sarje de elaborare este minim 6, cu suprafața de 160 mm<sup>2</sup>.

În cazul determinării incluziunilor nemetalice conf. Metodei A, se raportează cel mai impur câmp al fiecărei probe, după ce se analizează fiecare câmp cu suprafața de 0.50 mm<sup>2</sup>, aferentă unui patrat cu latura de 0.71 mm.

Valorile obținute în urma măsurătorilor pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10** sunt prezentate în tabelul 5.4.

**Tabelul 5.4.** Stabilirea mediei aritmetice pentru incluziunile tip D pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10**  
*Rezultatele obținute pe baza cercetărilor proprii*

Material	Șarja	Nr. probe	Metoda	Tip incluziuni/ Inclusion type								
				A		B		C		D		
12CrMo9-10	91884	6	ASTM E45 Metoda D	Punctaj	s/t	g/h	s/t	g/h	s/t	g/h	s/t	g/h
					Număr de câmpuri							
				0.5	0	0	0	0	14	0	20	0
				1	0	0	0	0	3	0	0	0
				1.5	0	0	0	0	0	0	0	0
				2	0	0	0	0	0	0	0	0
Obs.: Media a 6 probe / Average of 6 specimens												

### 5.6. Descrierea echipamentelor utilizate

Pentru buna desfasurarea a condițiilor din cadrul studiilor experimentale, privind încercările experimentale pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10** au fost folosite următoarele aparate, echipamente, tabelul 5.5.

**Tabelul 5.5.** Lista echipamentelor, aparatelor utilizate pentru determinarea încercărilor experimentale pentru semifabricatul forjat **12CrMo9-10**

Nr crt	Denumire aparat	Serie echipament
1	Mașină pentru încercare la șoc	Charpy
		Cameră de temperatură scăzută
2	Mașină pentru încercarea la tracțiune	JBW-300
	Extensometru electronic axial pentru mașina de încercat la tracțiune	DWC-80
3	Spectrometrul	WDW-300
4	Microscop optic metalurgic	Epsilon 3542
5	Durimetru Brinell	QMatrix
		XJP-6A
		-

## Capitolul 6. Concluzii finale, contribuții originale și direcții viitoare de cercetare

### 6.1 Concluzii finale rezumative

În această teză de doctorat se prezintă etapele realizării unui semifabricat forjat și condițiile și tehnologiile impuse pe care semifabricatul forjat trebuie să le îndeplinească pentru a corespunde cerințelor standardului DNV-GL-ST-F101.

Atât tehnica de forjare cât și tipurile de tratament termic aplicate sunt importante pentru a se încadra în cerințele normei de evaluare și a oferi posibilitatea emiterii unui certificat de calitate recunoscut internațional.

Principalele concluzii pot fi sintetizate astfel:

1. Standardul DNV-GL-ST-F101 este important și folosit pe scară largă în domeniul metalurgiei, în special al semifabricatelor forjate din domeniul extracției, gazelor naturale, petrol, maritime etc. Procedura de emiterie a unui certificat de material cu recunoaștere internațională DNV-GL tip 3.2 presupune îndeplinirea unor criterii esențiale atât în domeniul forjării cât și tratamentului termic;

2. Forjarea materialelor presupune obținerea semifabricatelor forjate în mai multe etape succesive și cu o anumită deformare acceptată. S-a realizat o schemă tehnologică de forjare cu parametrii optimi pentru un semifabricat din 12CrMo9-10 astfel:

- oțelurile cu un conținut ridicat de elemente de aliere care le fac mai greu forjabile (în exemplul nostru 12CrMo9-10), [3] în urma încercărilor efectuate i se poate atașa o forjabilitate ridicată pentru un interval de menținere de 5-16 ore, lingou 18-25 tone (interval în care toți parametrii critici sunt favorabili în asigurarea unei bune tehnici de forjare: temperatura de forjare la 1092-1170 °C, temperatură final de forjare > 850 °C);
- în urma procesului de forjare s-a observat de asemenea ca rezistența la deformare scade cu creșterea temperaturii de deformare și scade cu micșorarea vitezei de deformare. [3] [12] [21]
- conform tehnologiei prezentate, datele experimentale obținute sunt confirmate grafic (intersecția pe diagrama Fe-C cu verticala aferentă unei compoziții chimice de 0.11-0.15 % C), relevând punctele critice stabilite în tehnologia de forjare;
- aplicarea acestei tehnologii de forjare pentru lingouri de 18-25 tone din 12CrMo9-10 a dus la reducerea consumurilor energetice (cu procesele ulterioare de reîncălzire), semifabricatul răcindu-se mai lent și ajungând mai greu la o temperatură sub 850 °C.

3. Tratamentul termic primar utilizat în tehnologia noastră de elaborare este normalizare la 941-968 °C, monitorizare cu termocuple de contact, menținere minim 1 oră după atingerea temperaturii de egalizare și răcire până la temperatura camerei în aer. Comportarea ulterioară a semifabricatului a fost una superioară ca urmare a prelucrabilității

prin aşchiere la operaţiile ulterioare, observându-se eliminarea parţială a tensiunilor din piesă după forjare şi proprietăţi mecanice de plasticitate / tenacitate superioare celor după forjare.

4. Ca tratament termic secundar pentru această tehnologie de elaborare s-a aplicat pentru materialul din 12CrMo9-10 o călire la 940 °C cu menţinere 120 minute şi răcire în apă, urmată de o revenire la 655 °C menţinere 180 minute şi răcire în aer având următoarele rezultate experimentale:  $R_m=697 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0.2}=577 \text{ N/mm}^2$ ,  $A=24\%$ ,  $Z=76\%$ ,  $KV(-46^\circ\text{C}) = 240 \text{ J}$ ,  $HBW=217$ . Ca şi îndeplinire a obiectivului tezei de doctorat (în stabilirea unei tehnologii superioare de elaborare a semifabricatelor din 12CrMo9-10), se poate recomanda utilizarea pe scara largă a parametrilor obţinuţi în diferite sectoare ale industriei metalurgice.

5. Pentru a pune în evidenţă necesitatea utilizării unor tehnologii noi, superioare în domeniul forjabilităţii materialelor s-a realizat o serie de teste suplimentare şi pe alte oţeluri din 42CrMo4 şi 25CrMo4 în scopul obţinerii unor caracteristici mecanice superioare în exploatare.
- Pentru materialul 42CrMo4 (oţel aliat cu Cr şi Mo) am utilizat aceeaşi parametrii ca şi la 12CrMo9-10 : temperatura de forjare 1150°C (temperatura de sfârşit de forjare peste 850 °C), lingou 25 tone cu aplicarea tratamentului termic primar de normalizare. Caracteristicile mecanice obţinute sunt:  $R_m=843 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0.2}=512 \text{ N/mm}^2$ ,  $A=15\%$ ,  $Z=31\%$ ,  $KV(+25^\circ\text{C}) = 210 \text{ J}$ ,  $HBW=255$ .
  - În urma aplicării tratamentului termic secundar apare o structură îmbunătăţită favorabilă prelucrarilor mecanice, nu mai este predispusă la fisurări sau apariţia incluziunilor intergranulare, mai dură însă puţin mai fragilă decât cea obţinută din 12CrMo9-10 (în urma aplicării aceleiaşi tehnologi din MPS).
  - Aceeaşi tehnologie a fost aplicată şi unui semifabricat din 25CrMo4: 1150°C ca temperatură de forjare iar în final, tratament termic secundar la 860°C cu menţinere după egalizare 60 minute şi răcire în apă urmată de o revenire la 550°C cu 120 minute menţinere şi răcire în aer.
  - Variaţia mărimii grăuntelui austenitic depinde de concentraţia elementelor de aliere şi temperatură, în cazul nostru pentru reperul forjat la 1150 °C din 42CrMo4 s-a găsit o structură grosolană formată din perlită lamelară, bainită şi ferită în proporţii reduse;

6. Modelarea caracteristicilor mecanice depinde de tipul operaţiilor din fluxul tehnologic: de forjare liberă, TT primar, TT secundar dar şi de compoziţia chimică, elementele de aliere ale oţelurilor folosite. Comparativ cu cele 2 tehnologii analizate semifabricatul din 42CrMo4 asigură o duritate mai mare comparativ cu cel din 12CrMo9-10 care prezintă o plasticitate mai ridicată.



## 6.2 Contributii personale, originale

Pentru îndeplinirea obiectivul angajat al tezei de doctorat, pe parcursul stagiului doctoral am efectuat activități de documentare științifică, experimente de laborator și experimente pe instalații pilot.

Cercetările întreprinse în cadrul tezei de doctorat au avut ca scop elaborarea unor specificații complexe referitoare la obținerea semifabricatelor forjate cu destinații speciale în conformitate cu standardele reglementate.

Tema tezei de doctorat a fost propusă și acceptată în scopul identificării principalelor etape în analiza calității semifabricatelor forjate cu destinație specială în acest sens analizându-se etapă cu etapă caracteristicile și respectarea standardelor pentru diferite materiale din 12CrMo9-10, 42CrMo4 și 25CrMo4.

Contribuțiile originale proprii aduse în cadrul tezei de doctorat sunt susținute de următoarele activități:

1. Am efectuat un studiu documentar în baza literaturii de specialitate privind stadiul actual al prelucrării prin deformare plastică la cald - forjare a semifabricatelor din oțel incluzând metodele și parametrii procesului de deformare plastică.

2. Am efectuat un studiu documentar privind elementele procesului de forjare mecanică liberă a semifabricatelor din oțel, operațiile de bază ale procesului de forjare dar și eliminarea imperfecțiunilor, defecte și tensiuni apărute în urma procesului.

3. Am efectuat cercetări proprii asupra procesului de deformare plastică prin forjare a diferitelor semifabricate din **12CrMo9-10, 42CrMo4 și 25CrMo4**.

4. În urma identificării, ca cerință specială din partea majorității agenților economici interni și externi, ca urmare a complexității etapelor de fabricație a semifabricatelor forjate, am realizat o procedură specială de elaborare (MPS) care să reunească toate etapele și toate caracteristicile impuse fiecărui tip de material.

Cercetările experimentale s-au axat pe mai multe tipuri de materiale în scopul elaborării MPS-urilor aferente ca parte a conceptului de asigurare a calității în acest sector de activitate.

5. Am analizat detaliat toate etapele anexate procedurii de elaborare pentru un semifabricat din 12CrMo9-10: deformare plastică la cald, forjare lingou din 12CrMo9-10., descrierea fazelor procesului de forjare, aplicarea tratamentului termic primar de normalizare, eboșarea semifabricatului analizat, aplicarea tratamentului termic secundar (călire+revenire), elaborarea schitei de sarjare în cuptor pentru tratament secundar.

6. Am elaborat un studiu de laborator în vederea analizei caracteristicilor mecanice pentru semifabricatul analizat luând în calcul analiza compoziției chimice, descrierea încercărilor mecanice și valorile obținute, o analiză a determinării dimensiunii de grăunte austenitic, determinări structurale - analize metalografice și nu în ultimul rând o prezentare a tuturor echipamentelor folosite la acest studiu experimental.

7. Am realizat comparativ același studiu în vederea omologării procedurii de elaborare și pe alte materiale din **12CrMo9-10, 42CrMo4 și 25CrMo4**, scotând în evidență importanța descrierii fiecărui proces dar și transparența în execuție.

Obiectivele principale ale tezei de doctorat au fost reflectate în articole și lucrări naționale și internaționale publicate în reviste de specialitate. Rezultatele cercetărilor și importanța elaborării procedurii de execuție în asigurarea calității și sporirea credibilității la nivel micro și macroeconomic.

### **6.3 Direcții viitoare de dezvoltare a cercetărilor din teza de doctorat**

#### **Direcții viitoare de dezvoltare a cercetărilor din teza de doctorat**

În continuarea cercetărilor din prezenta teză de doctorat se pot avea în vedere următoarele :

- cercetări experimentale asupra implicațiilor compoziției chimice și a parametrilor de forjare asupra proprietăților calitative finale ale produsului obținut prin forjare.
- extinderea cercetărilor asupra altor tipuri de semifabricate procesate la agentul economic și cu cerință mare pe piață.
- proiectarea unor tipuri de cuptoare de încălzire ecologice pentru protejarea mediului.
- proiectarea unor tehnologii economice de matrițare a semifabricatelor forjate.
- cercetări experimentale privind influența elementelor de aliere asupra compoziției chimice și caracteristicilor mecanice a oțelurilor.
- analize experimentale simulative a procesului de curgere a materialului în urma matrițării cu ajutorul diferitelor programe informatice tip SolidWorks, Autocad Mechanical, Autodesk Simulation CFD etc
- analiza calității semifabricatelor pe etape de proiectare și execuție;
- studii simulative privind variația caracteristicilor mecanice cu compoziția chimică a oțelurilor;
- influența elementelor de aliere asupra compoziției chimice și caracteristicilor mecanice ale oțelurilor;
- studii referitoare la analiza consumurilor de combustibili asimilate proceselor de forjare liberă;
- cercetari de laborator cu privire la analiza structurii metalografice pe semifabricate forjate și tratate termic;

**DISEMINAREA REZULTATELOR DIN TEZA DE DOCTORAT****Lucrări publicate în reviste în domeniul tezei:**

1. **Caloian, V**; Constantin, N; Vlad, M, The influence of heating temperature and cooling rate after free forging on the microstructure and the mechanical properties of AISI4140 STEEL, UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN SERIES B-CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE Volume: 81 Issue: 1 Pages: 173-182 Published: 2019- **indexata ISI**, <https://www.scientificbulletin.upb.ro/SeriaB - Chimie si Stiinta Materialelor.php?page=indexare>WOS:000444602300041
2. **Valentina CALOIAN**, Experimental research on the procedure for the preparation of standardized forged, U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 81, Iss. 4, 2019 ISSN 1454-2331, pag 253-262-230, **indexata ISI**, <https://www.scientificbulletin.upb.ro/SeriaB - Chimie si Stiinta Materialelor.php?page=indexare>
3. Costica Mustata, Elena Madalina Vlad, **Valentina Caloian**, Cristian Pandelescu, Research on the loading with pollutants and dust of flue gases resulting from the process of steel production in the LD-type converter; U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 82, Iss. 4, 2020 ISSN 1454-2331, pag 261-270, **indexata ISI**, <https://www.scientificbulletin.upb.ro/SeriaB - Chimie si Stiinta Materialelor.php?page=indexare>
4. Cristian PANDELESCU, **Elisa-Florina PLOPEANU**, Nicolae CONSTANTIN, Elena Mădălina VLAD; Analysis of the current situation concerning the duration of use and the main deflections of the pumping aggregates, ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering [e-ISSN: 2067–3809], TOME XIII [2020] | FASCICULE 2 [April – June], pag 147-152, indexata B+, BDI, <http://acta.fih.upt.ro/index.html>

**Lucrări prezentate la Conferinte Internationale, indexatae ISI, în domeniul tezei:**

1. E M Vlad, **V E Caloian**, C Pandelescu, E F Plopeanu, V Oancea, V Rucai, N Constantin and M Hritac, Experimental research on the effect of additives on the sintering process of alumina-based refractory materials, Conferinta Internationala, International Conference on Applied Sciences – ICAS 2020, May 22, 2020, Hunedoara, Romania, **indexata ISI**, [http://icas.science/forms/Program\\_ICAS2020.pdf](http://icas.science/forms/Program_ICAS2020.pdf)
2. **V E Caloian**, E M Vlad, C Pandelescu, E F Plopeanu, V Oancea, V Rucai, N Constantin and M Hritac, Experimental research with the help of thermal - derivatographic analysis on coal powder that can be blowed in the blast furnace, Conferinta Internationala, International Conference on Applied Sciences – ICAS 2020, May 22, 2020, Hunedoara, Romania, **indexata ISI**, [http://icas.science/forms/Program\\_ICAS2020.pdf](http://icas.science/forms/Program_ICAS2020.pdf)
3. **V E Caloian (Necula)**, The procedure for drawing up specifications for flanged forged semi-finished products of **12CrMo9-10** with special purpose for naval systems, Conferinta Internationala, 8th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMat 2020 November 26-27, 2020 Bucharest, Romania, <http://www.sim.pub.ro/index.php/47-noutati/anunturi/227-romat2020>

**BIBLIOGRAFIE**

- [1] [https://www.ipm.utcluj.ro/Files/Curs\\_PPDP.pdf](https://www.ipm.utcluj.ro/Files/Curs_PPDP.pdf)
- [2] VALERIA SUCIU, MARCEL VALERIU SUCIU, Studiul Materialelor, București: Fair Partners, 2007 pagini, ISBN 978-973-1877-01-3
- [3] Shengwen Tu, Xiaobo Ren, Jianying He, Zhiliang Zhang, Stress-strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review, received: 23 June 2019 Revised: 8 August 2019 Accepted: 30 August 2019, DOI: 10.1111/ffe.1313
- [4] [https://www.ipm.utcluj.ro/Files/Curs\\_4\\_MDP.pdf](https://www.ipm.utcluj.ro/Files/Curs_4_MDP.pdf)
- [5] Imagini echipamente FORJA ROTEC BUZAU
- [6] <https://www.scribd.com/doc/297343290/Cartea-Studiul-Materialelor>
- [7] <https://www.scribd.com/document/105722735/Auxiliare-Curriculare-Nivel-3-12>
- [8] <https://www.scribd.com/doc/96686209/Stiinta-Si-Ingineria-Materialelor>
- [9] <https://www.scribd.com/document/48569539/Tehnologia-materialelor>
- [10] <https://www.scribd.com/document/382634633/severin-pdf>
- [11] <https://www.scribd.com/doc/44584927/Indrumator-Laboratoare>
- [12] <https://doku.pub/documents/tratat-de-tehnologia-materialelor-curs-z0x26nwjppqn>
- [13] <https://pdfslide.tips/documents/03-tehnologia-calirii.html>
- [14] <https://pdfslide.tips/documents/structuri-metalografice.html>
- [15] [https://moam.info/studiul-materialelor-marcel\\_59eed851723ddffecd3a5dd.html](https://moam.info/studiul-materialelor-marcel_59eed851723ddffecd3a5dd.html)
- [16] <https://www.scribd.com/doc/244853789/Cartea-Std-Mater-pdf>
- [17] <https://www.scribd.com/doc/142243167/Cartea-Std-Mater-pdf>
- [18] <https://www.scribd.com/document/48569539/Tehnologia-materialelor>
- [19] <https://www.scribd.com/doc/44584927/Indrumator-Laboratoare>
- [20] <https://www.scribd.com/doc/259090693/Teknik-Las-SMAW>
- [21] <https://www.scribd.com/document/369861739/58031128-Curs-Fochist-Calificare-Noua-Pre-Scip-Tie-pdf>
- [22] <https://www.scribd.com/doc/221886419/A39>
- [23] <https://www.scribd.com/doc/85457830/Materiale-Si-Tehnologii-Neconventionale>
- [24] <https://www.scribd.com/doc/74208238/CARTE-Prevenirea-Riscurilor-in-Activitatile-de-Men-Tenant-A>
- [25] <https://www.scribd.com/doc/77662162/Sever-In>  
<https://www.scribd.com/document/335598714/Stiinta-Si-Ingineria-Materialelor>
- [26] <https://www.scribd.com/doc/242200039/www-fisierulmeu-ro-Tehnologia-materialelor-pdf>
- [27] [http://mmut.mec.upt.ro/mvasile/Lab2\\_p.pdf](http://mmut.mec.upt.ro/mvasile/Lab2_p.pdf)
- [28] <https://www.qreferat.com/referate/mecanica/Procedee-tehnologice-de-obtine443.php>
- [29] <https://www.scribd.com/doc/305221126/TFM>
- [30] <https://www.multilab.ro/MainPages/Key-lab/Fezical%20Testers/Durita/Determinarea%20Duritate.htm>
- [31] <https://issuu.com/horatiuvermesan/docs/curs-tt-2014-2015>
- [32] [https://issuu.com/fac.arhitecturasiurbanism.upt/docs/curs\\_1-14\\_mobilier\\_tehnologie\\_\\_1\\_](https://issuu.com/fac.arhitecturasiurbanism.upt/docs/curs_1-14_mobilier_tehnologie__1_)

- [33] [http://zeus.east.utcluj.ro/~hvermesan/Curs\\_TT/Bibliografie\\_files/TT\\_C1-Introducere.pdf](http://zeus.east.utcluj.ro/~hvermesan/Curs_TT/Bibliografie_files/TT_C1-Introducere.pdf)
- [34] <https://www.yumpu.com/ro/document/view/2014300/studiu-materiale-suciu-marceljpg/18>
- [35] <https://vdocuments.mx/documents/indrumar-tm.html>
- [36] [https://www.fabory.com/ro/knowledge\\_center/technical/steel/heat\\_treatment](https://www.fabory.com/ro/knowledge_center/technical/steel/heat_treatment)
- [37] <https://fr.slideshare.net/barbudan1/tehnologia-materialelor-m-banica-3>
- [38] <https://www.astmsteel.com/product/aisi-alloy-4140-steel-bar/>
- [39] <http://www.astmsteel.com/faq/>
- [40] <http://www.astmsteel.com/product/aisi-8620-steel-alloy/>
- [41] <https://www.astmsteel.com/product/4340-steel-aisi/>
- [42] <https://www.astmsteel.com/product/4130-steel-aisi-25crmo4-7218-scm430/>
- [43] <https://www.radissonimpex.com/sheet-plate-supplier-exporter/4140-alloy-steel-plate-suppliers-exporters-hong-kong.html>
- [44] <https://www.stindia.com/en19-steel-seamless-pipe.html>
- [45] <https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/L.G.Bujoreanu-Materiale-inteligente.pdf>
- [46] <https://biblioteca.regielive.ro/laboratoare/stiinta-materialelor/metode-de-determinare-a-duritatii-203085.html>
- [47] <http://www.h-metal.ro/blog/calirea-otelului/>
- [48] Controvici, I. - *Tratamentul termic al oțelurilor și al fontei*, Ed. Tehnică, București, 1953.
- [49] Darabonț, A, Pece, S. & Dăscălescu, A. - *Managementul securității și sănătății în muncă*, Vol. I, II, București, Ed. Agir., 2001.
- [50] Darabonț, A., ș.a. - *Măsurarea zgomotului și vibrațiilor în tehnică*, Ed. Tehnică, București, 1983.
- [51] Deutch, I. - *Rezistența materialelor*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1976.
- [52] Drăgan, I. - *Tehnologia deformării plastice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [53] Dumitraș, C., Militaru, C. - *Așchiera metalelor și fiabilitatea sculelor așchietoare*, , Ed. Tehnică, București, 1983.
- [54] Dulămiță, T., ș.a. - *Alegerea și tratamentul termic al oțelurilor de scule*, București, Ed. Tehnică, 1963.
- [55] Dulămiță, T., ș.a. - *Oțeluri de scule*, Ed. Tehnică, București, 1990.
- [56] Dulămiță, T., ș.a. - *Tratamente termice și termochimice*, Ed. Tehnică, București, 1990.
- [57] Ghidon, E.D., ș.a. - *Deformarea plastică a oțelului de construcții*, *Metallovedenie i termiceskaia obrabotka metallov*, nr. 2, Moscova, 1965.
- [58] Ghizdav, V. - *Prelucrarea metalelor cu puteri și viteze mari*, Ed. Tehnică, București, 1967.
- [59] Giacomelli, I., Munteanu, A. - *Tratamente termice*, Universitatea din Brașov, 1980.
- [60] Gulaev, A.P., Șigarev, A.S. - *Influența tratamentului termomecanic asupra modificărilor structurale*, *Metallovedenie i termiceskaia obrabotka metallov*, nr. 4., Moscova, 1963.

- [61] Gulaev, A.P., Şigarev, A.S. - Tratamentul termomecanic al oțelurilor și influența sa asupra structurii și proprietăților oțelurilor, Metallovedenie i termiceskaia obrabotka metallov, nr. 5, Moscova, 1961.
- [62] Caloian Valentina Elena - Considerații teoretice și experimentale asupra forjării libere a semifabricatelor metalice, Referat științific Nr 1, Prof.univ.dr.ing.: Constantin Nicolae, Bucuresti, 2017.
- [63] Caloian Valentina Elena - Cercetări experimentale cu privire analiza caracteristicilor fizico-mecanice a oțelurilor in timpul procesului de forjare libera, Nr 2, Referat științific, Prof.univ.dr.ing.: Constantin Nicolae, Bucuresti, 2017.
- [64] Caloian Valentina Elena - Cercetari experimentale privind procedura de elaborare a semifabricatelor forjate standardizate in utilizarea la sisteme subacvatice, Nr 3, Referat științific, Prof.univ.dr.ing.: Constantin Nicolae, Bucuresti, 2017.
- [65] Caloian Valentina Elena - Cercetari experimentale privind procedura de elaborare a semifabricatelor forjate standardizate in utilizarea la sisteme subacvatice, Nr 4, Referat științific, Prof.univ.dr.ing.: Constantin Nicolae, Bucuresti, 2017.
- [66] E M Vlad, V E Caloian, C Pandelescu, E F Plopeanu, V Oancea, V Rucai, N Constantin and M Hritac, Experimental research on the effect of additives on the sintering process of alumina-based refractory materials, Conferinta Internationala, InternationalConference on Applied Sciences – ICAS 2020, May 22, 2020, Hunedoara, Romania;
- [67] V Caloian, E M Vlad, C Pandelescu, E F Plopeanu, V Oancea, V Rucai, N Constantin and M Hritac, Experimental research with the help of thermal - derivatographic analysis on coal powder that can be blowed in the blast furnace, Conferinta Internationala, InternationalConference on Applied Sciences – ICAS 2020, May 22, 2020, Hunedoara, Romania, indexata ISI, [http://icas.science/forms/Program\\_ICAS2020.pdf](http://icas.science/forms/Program_ICAS2020.pdf)
- [68] Caloian, V; Constantin, N; Vlad, M, The influence of heating temperature and 42CRMO4 STEEL, UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN SERIES B-CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE Volume: 81 Issue: 1 Pages: 173-182 Published: 2019- indexata ISI, WOS:000444602300041
- [69] Valentina CALOIAN, Experimental research on the procedure for the preparation of standardized forged, U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 81, Iss. 4, 2019 ISSN 1454-2331, pag 253-262-230
- [70] S. Engineer and B. Hachtemann - Proc. Conf. on Fundamentals and Applications of Microalloying Forging Steels, TMS, Warrendale, PA, 61, 1996.
- [71] D. K. Matlock, G. Krauss and J. G. Speer - J. Mater. Process. Technol., 117, 324, 2001.
- [72] J. Zrink, T. Kvackaj and A. Pongpaybul - Mater. Sci. Eng., A329, 321, 2001.
- [73] M. J. Balart, C. L. Davis and M. Strangwood - Mater. Sci. Eng., A328, 48, 2002.
- [74] D. H. Jean, S. G. Ahn, S. C. Jung and Y. W. Kim - Proc. Conf. on Fundamentals and Applications of Microalloying Forging Steels, TMS, Warrendale, PA, 533, 1996.
- [75] Product Design Guide for Forging, Handbook of Forging Industry Association (FIA), Ohio, 44, 2002.
- [76] R. Lagneborg, T. Siweek, S. Zajac and B. Hutchinson - The Role of Vanadium in Microalloyed Steels, Swedish Institute for Metals Research, 51, Stockholm, 1999.

- [77] A. Reeder, C. Govasey and D. J. Naylor - Proc. Conf. on Fundamentals and Applications of Microalloying Forging Steels, TMS, Warrendale, PA, 455, 1997.
- [78] M. Cristiance and P. E. Reynoldst - Proc. Conf. on Fundamentals and Applications of Microalloying Forging Steels, TMS, Warrendale, PA, 29., 1996.
- [79] R. Abad, B. Lopez and I. Gutierrez - Proc. Conf. on Fundamentals and Applications of Microalloying Forging Steels, TMS, Warrendale, PA, 284, 1996.
- [80] J. G. Lenard and M. Tajima - ISIJ Int., 35, 1509, 1995.
- [81] D. Bai, J. Asante, M. Cooke and J. Dorricott - 3rd MWSP Conf. Proc., Vol. XXXIX, ISS, Warrendale, PA, 543, 2001.
- [82] A. Takahashi and M. Iino - ISIJ Int, 36, 235, 1996.
- [83] M. E. Burnett and A. J. DeArdo - HSLA Steels: Processing, Properties and Applications, , PA, USA, 415, Pittsburgh, 1988.
- [84] U. Stahlberg, H. Keife and M. Lundberg - J. Metal Work. Technol., 4, 51, 1980.
- [85] Y. Fukui, J. Yonezawa, A. Mizuta and O. Tsuda - J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 21, 975, 1980.
- [86] O. Tsuda, Y. Yamaguchi, H. Ohsuna, K. Tsuji, M. Tomonaga and S. Saito - J. Jpn. Soc. Technol. Plast., 24, 1056, 1983.
- [87] A. Wallero - J. Mech. Work. Technol., 12, 233, 1985.
- [88] A. Wang, P. F. Thomson and P. D. Hodgson - J. Mater. Process. Technol., 60, 95, 1990.
- [89] S. Hamzah and U. Stahlberg - J. Mater. Process. Technol., 84, 25, 1998.
- [90] S. Hamzah and U. Stahlberg - J. Mater. Process. Technol., 110, 324, 2001.
- [91] G. Banaszek and A. Stefanik - J. Mater. Process. Technol., 177, 238, 2006.
- [92] M. Nakasaki, I. Takasu and H. Utsunomiya - J. Mater. Process. Technol., 177, 521, 2006.
- [93] Zhang, Z.-X. Cui, W. Chen and Y. Li - J. Mater. Process. Technol., 209, 1950, 2009.
- [94] Y. Ji, J. J. Park, C. H. Moon, M. S. Chun and H. D. Park - Int. J. Mod. Phys. B, 23, 1591, 2009
- [95] Y. Kim, J. Cho and W. Bae - J. Mater. Process. Technol., 211,005, 2011.
- [96] Bazele proiectării pieselor deformate plastic”, CHELU Gh., DRĂGHICI S., GHIBAN N, Editura Bren, 2001, ISBN 973-8143-27-6
- [97] Elemente de proiectare a pieselor forjate, matrițate și extrudate”, CHELU Gh., GHIBAN N, Editura Printech, ISBN 978-973-718-690-4
- [98] Comportarea la deformare plastică a metalelor și aliajelor”, GHIBAN N., Editura Printech, ISBN 973-718-087-9 2004
- [99] Deformabilitatea materialelor metalice”, POPESCU V.I., GHIBAN N.,, Editura Printech, ISBN 973-718-255-3 2005

[1]