



Universitatea *Transilvania* din Braşov

TEZĂ DE ABILITARE

**CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ENERGIEI SOLARE ÎN
VEDEREA MODIFICĂRII PROPRIETĂȚILOR ALIAJELOR
SPECIALE PRIN TRATAMENTE TERMICE**

Domeniul: Inginerie industrială

**Autor: Prof.Dr.Ing. Ioan MILOȘAN
Universitatea Transilvania din Braşov**

BRAȘOV, 2017

CUPRINS

Cuvânt înainte	3
(A) Summary	4
(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	6
(B-i) Realizări științifice și profesionale	6
INTRODUCERE	6
1. TENDINȚE PRIVIND UTILIZAREA ENERGIEI SOLARE ÎN INDUSTRIE.....	11
1.1 Surse pentru producerea energiei electrice.....	12
1.2 Tendințe ale utilizării energiei solare.....	14
1.2.1 Cercetarea și dezvoltarea utilizării energiei solare.....	17
1.3 Concluzii.....	18
2. CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ENERGIEI SOLARE ÎN VEDEREA MODIFICĂRII PROPRIETĂȚILOR ALIAJELOR SPECIALE TRATATE TERMIC.....	19
2.1 Cuptoare solare și electrice utilizate în cadrul cercetării.....	19
2.1.1 Cuptoare solare utilizate în cadrul cercetării.....	19
2.1.2 Cuptoare electrice utilizate în cadrul cercetării.....	26
2.2 Cercetări privind duritatea aliajelor speciale tratate termic utilizând energie solară și electrică.....	26
2.2.1 Aparatura și materialele utilizate.....	27
2.2.2 Modul de lucru.....	31
2.2.3 Rezultate experimentale.....	38
2.3 Cercetări privind comportamentul la temperaturi scăzute al aliajelor speciale tratate termic utilizând energie solară și electrică.....	48
2.3.1 Aparatura și materialele utilizate.....	51
2.3.2 Modul de lucru.....	53
2.3.3 Rezultate experimentale.....	57

2.4	Cercetări privind comportamentul tribologic al aliajelor speciale tratate termic utilizând energie solară și electrică.....	65
2.4.1	Metode de caracterizare a comportamentului tribologic.....	66
2.4.2	Aparatura și materialele utilizate.....	71
2.4.3	Modul de lucru.....	74
2.4.4	Rezultate experimentale.....	78
2.5	Concluzii.....	108
3.	PRELUCRAREA PRIN ANALIZĂ STATISTICĂ, MODELARE MATEMATICĂ ȘI OPTIMIZARE A DATELOR EXPERIMENTALE.....	111
3.1	Îndepărtarea rezultatelor anormale din datele experimentale.....	112
3.1.1	Aplicații privind identificarea și îndepărtarea rezultatelor anormale din cercetările experimentale.....	115
3.2	Modelarea matematică prin experiment clasic.....	119
3.2.1	Contribuții privind analiza statistică a ecuației de regresie.....	123
3.3	Optimizarea proceselor industriale.....	129
3.3.1	Contribuții privind optimizarea proceselor industriale prin programare liniară.....	135
3.4	Concluzii.....	141
	(B-ii) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei.....	143
	(B-iii) Bibliografie.....	148

Cuvânt înainte

Această teză de abilitare reprezintă rezultatul a douăzeci și șapte de ani de cercetare în domeniul procesării aliajelor, desfășurată astfel:

a) în cadrul universitar:

- Universitatea "Transilvania" din Brașov, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor;
- Universitatea "Politehnica" din București: Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor și Facultatea Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice.

b) în cadrul institutelor de cercetare:

- Institutul de Cercetare - Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov: Centrul de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite";
- Centrul Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS - PROMES), din Font-Romeu-Odeillo, Franța.

c) în domeniul industrial:

- S.C. "ROMAN" Autocamioane S.A. Brașov (Laboratorul Central de încercări mecanice și metalografice);
- S.C. "UPRUC TPA" S.R.L. Făgăraș.

Doresc să le mulțumesc atât colegilor cât și colaboratorilor din țară și din străinătate care au contribuit alături de mine la realizarea și prelucrarea datelor prezentate în această teză.

(A) Summary

The habilitation theses *“Contributions on the use of solar energy for modifying the properties of special alloys by heat treatments”* summarizes the most important scientific and professional results obtained by the author after being awarded his PhD (1998 at the “Transilvania” University of Brasov) and after receiving tenure as a professor in 2001 at the “Transilvania” University of Brasov, faculty of Materials Science and Engineering.

Section *(B-i) Scientific and professional results* contains, besides the introduction and 3 chapters which offer details of the most important accomplishments of the author.

The **Introduction** provides an overview of the advantages and disadvantages of developing applications for concentrated solar energy heat treatments for modifying the properties of special alloys, with the mention that the research conducted and presented in this thesis falls within a field of growing interest, that of renewable energy in industry.

There are presented the special alloys used in the experimental research (steel, alloy cast iron), noting that the research was conducted both on standard materials as well as on materials with chemical compositions modified through further alloying in different percentages and by modifying the industrial parameters of the heat treatments, which added a new perspective to this research.

In Chapter 1 (**Tendencies concerning the use of solar energy in industry**), there was taken into account the fact that part of the industrial sources that produce electric energy lead to pollution and, therefore, the focus was on the study of solar powered energy, a non-polluting and renewable energy, as a basis for future scientific research.

There is also an emphasis on the fact that this research is considered a priority by the European Commission due to its positive impact on reducing pollution, in conformity with the “European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan): Towards a low carbon future” and thus 16 billion euros have been allocated for research and development until 2020.

With that in mind, the research presented in this habilitation thesis is in line with the current trends and priorities to capitalize on new research findings to enable industrial development as well as to encourage the development of non-polluting renewable energy.

Chapter 2 (**Contributions on the use of solar energy for modifying the properties of heat treated special alloys**) presents the experimental results of using solar and electric energy (through comparison) in the study of heat treated special alloys. Starting with the presentation of

the solar oven used to conduct the experimental research, the analysis was carried out by comparing the micro hardness values, the reactions to low temperatures and the tribology of the special alloys.

The results were satisfactory, showing that the treatment of alloys with solar energy resulted in values similar to the treatment using electric energy while maintaining the professional requirements of different industrial sectors (automotive, petrol, extractive, etc.).

Chapter 3 (**Processing by statistical analysis, mathematical modelling and optimization of experimental data**) presents data on the processing of experimental data through statistical analysis, modelling and optimization.

In the research, two personal computing programs were presented, used in compiling the data frequently used in functions and written in C++ (tested and corrected by the author), which help with requests of modelling and optimization with a high degree of generality.

Section (**B-ii**) *Plans of career development* is divided in 2 subchapters:

I. Work experience (1983-1989) presenting the research and teaching activity specific to being a technology engineer at “Tractorul” Brasov (1983-1986) and “Rulmentul” Brasov (1986-1989);

II. Work experience with “Transilvania” University of Brasov (1989-present) presenting the two main directions of development: the teaching activity (educational) and the research activity.

Section (**B-iii**) *Bibliography* contains 130 references connected to scientific and professional results as well as the plans for career progress and development (B-ii).

Acknowledgements:

Financial support by the Access to Research Infrastructures activity in the 7th Framework Programme of the EU (SFERA 2 Grant Agreement n. 312643) is gratefully acknowledged.

We hereby acknowledge the structural funds project PRO-DD (POS-CCE,O.2.2.1., ID 123, SMIS 2637, ctr. No 11/2009) for providing the infrastructure used in this work.

(B) REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE ȘI PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI

(B-i) REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE

INTRODUCERE

Energia solară este o sursă termică de încălzire externă, ecologică, care poate fi concentrată la puteri specifice foarte mari.

Tratamentul termic cu energie solară (alături de tratamentele termice cu radiație laser, plasmă, cu surse ultrascurte de lumină - LDG, cu fascicul de electroni, etc.), face parte din categoria tratamentelor termice neconvenționale cu încălzire ultrarapidă [25, 72, 92].

Energia solară, concentrată pe suprafețe mici, este capabilă de a realiza într-un timp foarte scurt, diferite procese de încălzire și transformare de fază în stare solidă, specifice tratamentelor termice, aplicate pieselor cu pereți subțiri, cu scopul de a finisa structura și de obținerea unor valori superioare ale proprietăților materialelor folosite în diferite ramuri industriale.

Față de celelalte surse de energie utilizate pentru realizarea tratamentelor termice cum sunt: energia termică provenită din arderea directă a combustibililor clasici (gaz metan, petrol) [97]; din conversia energiei electrice în căldură prin utilizarea rezistoarelor, a inducției electromagnetice sau a arcului electric [76, 81], din energia concentrată sub formă de plasmă termică [5, 84], laser [90] sau din surse de lumină ultrascurte (LDG - lămpi cu descărcare în gaz) [92], utilizarea energiei solare în cercetarea aplicativă curentă, face ca noțiunea teoretică de "Dezvoltare durabilă" să fie transpusă în practică și prin implementarea tehnologiilor curate.

Aplicarea energiei solare concentrate pentru realizarea tratamentelor termice prezintă o

serie de avantaje, mai ales în cazul unor materiale speciale (susceptibile la oxidare, materiale reactive sau volatile) comparativ cu instalațiile clasice de tratament termic (în cuptoare electrice sau în instalații încălzite cu gaz metan) cum ar fi [25, 78, 124]:

- este o sursă de energie naturală și practic inepuizabilă;
- poate fi considerată energie curată, deoarece nu poluează și utilizarea ei nu determină emisii de gaze cu efect de seră, nu produce deșeuri, reziduri (fum, miros, particule toxice etc.);
- permite reducerea consumului de combustibili fosili și reducerea efectelor nocive generate de arderea acestora;
- este concentrată prin sisteme flexibile ce pot fi extinse și dezvoltate;
- nu implică costuri suplimentare ulterioare de exploatare, în afara celor de achiziție și instalare;
- poate fi localizată și direcționată în zone izolate, în funcție de opțiuni.

Principalul dezavantaj al utilizării energiei solare este faptul că instalațiile se pot utiliza doar pe perioada zilei și cu îndeplinirea anumitor condiții (intensitate luminoasă și lipsa norilor).

Utilizarea energiei solare în diverse domenii de interes mondial a avut un progres considerabil în fața utilizării energiilor clasice, fiind una din preocupările cercetătorilor la nivel mondial, studiate în ultima perioadă [11, 12, 23, 24, 25, 36, 75, 78, 87, 88, 95, 96].

Cercetările realizate și prezente în această teză de abilitare, se înscriu în acest domeniu de actualitate al utilizării energiilor regenerabile în industrie, încercând să prezinte posibilitățile oferite de utilizarea energiei solare în tratamentul termic al aliajelor speciale.

Pe tot parcursul tezei, s-a realizat o paralelă (datorită experienței acumulate de autor în tratamentul termic cu folosirea energiei electrice) între utilizarea tratamentelor cu energie solară, respectiv cel al tratamentelor termice cu energie electrică, toate aplicate cu scopul îmbunătățirii proprietăților de exploatare al aliajelor speciale (oțeluri și fonte aliate) destinate prelucrării și utilizării industriale.

Cercetările s-au desfășurat atât pe aliaje industriale standardizate cât și pe aliaje noi la care s-a intervenit atât asupra compoziției chimice (prin alierea suplimentară față de compoziția standardizată, cu diferite elemente de aliere, în diferite procente, în funcție de direcțiile de cercetare) cât și prin modificare parametrilor industriali ai tratamentelor termice aplicate.

Această aliere suplimentară a aliajelor utilizate, conferă activității de cercetare o particularitate de noutate.

Noile aliajele speciale utilizate în cadrul activității de cercetare experimentală, analizate în cadrul tezei de abilitare, sunt prezentate în tabelul I.1.

Tabelul I.1. Aliajele speciale utilizate în cadrul activității de cercetare experimentală

Nr. crt.	Material	Marca	Caracteristici	Domenii de utilizare	Domeniul de cercetare în cadrul tezei de abilitare
1	Oțel inoxidabil	EN-1.4848* GX-40CrNiSi25-20	Caracteristici bune de rezistență mecanică și coroziune până la temperaturi de 1150°C	Piese supuse unor solicitări mari la temperaturi ridicate (1150°C): cuptoare industriale, rafinării de petrol, cazane industriale abur, etc	-duritate; - comportament la temperaturi scăzute (-150°C); - comportament tribologic;
2		EN-1.4136** GX-50CrMo29-2	Datorită conținutului crescut de C (0,73%) și Cr (26%), prezintă o duritate ridicată și caracteristici bune de rezistență la uzare și coroziune	Piese supuse la uzură în medii corozive cum ar fi: pompe, turbine, compresoare, supape, bușe, cochile, rulmenți, cuțite cu destinații speciale, instrumente de măsură, etc	-duritate; - comportament tribologic
3	Fontă cu grafit nodular***	EN-GJS-450-10	Rezistență relativ ridicată la tracțiune, alungire mare și rezistență bună la impact	Piese supuse unor solicitări mari (rezistență la abraziune): piese de camioane, tractoare, corpuri de compresoare, supape, cilindri, corpuri de pompe, biele, etc	-duritate; - comportament la temperaturi scăzute (-70°C); - comportament tribologic;

* conform EN-10295:2002 - Heat resistant steel castings [107,125,129]

** conform EN-10295:2002 - Heat resistant steel castings [107,125,130]

*** conform EN-1563:2011 - Founding-Spheroidal graphite cast iron [102,105,117,125]

Domeniile studiate și experimentate au fost:

1. Îmbunătățirea proprietăților mecanice (în teză s-a pus accentul pe duritatea și microduritatea aliajelor speciale);
2. Îmbunătățirea comportării la temperaturi scăzute a aliajelor speciale, realizându-se cercetări la temperaturi de până la - 150°C;
3. Îmbunătățirea comportării la uzare a aliajelor speciale, studiindu-se influența parametrilor specifici tehnologiei, cât și a utilajului aferent asupra: coeficientului de frecare, coeficientului de uzură, microduritate, nanoindentare, coeficientului de elasticitate, parametrii principali în obținerea unor produse calitativ superioare;
4. Prelucrarea datelor experimentale rezultate în urma întregii activități de cercetare, realizată prin:
 - cercetări privind îndepărtarea rezultatelor anormale din datele experimentale, folosindu-se diferite criterii statistice ("Chauvenet" și "Romanowski");
 - cercetări privind modelarea matematică prin experimentul clasic (modelarea legăturilor dintre variabilele unui sistem) realizată pe baza analizei statistice a ecuației de regresie, în acest caz, s-a utilizat un instrument software original în limbajul C++;
 - cercetări privind optimizarea proceselor industriale folosind programarea liniară (algoritmul Simplex). Și în acest caz, cercetările au fost aprofundate, prin utilizarea unui instrument software original în limbajul C++;

Prin utilizarea programelor personalizate, s-au realizat studii tehnico-economice care au dus la obținerea unor rezultate verificate de practica industrială.

5. Îmbunătățirea tehnologiilor industriale folosite de-a lungul întregii activități de cercetare.

Temele abordate în domeniul cercetării au fost în permanență în legătură cu necesitățile industriei, exemplificate mai jos:

- studiile comportării la uzare și la temperaturi scăzute, s-au realizat în toate cazurile pe aliaje elaborate în condiții industriale, la care s-a intervenit în procesul de aliere, cât și în cel al tratamentelor termice aplicate. Aliajele au fost elaborate în două societăți comerciale, astfel:

- ✓ toate mărcile de oțeluri inoxidabile, s-au elaborat în cadrul "S.C. UPRUC TPA" SRL Făgăraș, unde s-a intervenit asupra elementelor și gradului de aliere;
- ✓ fontele cu grafit nodular, cât și anumite mărci de oțeluri uzuale, utilizate în industria auto, au fost procesate (elaborate, aliate și tratate termic) în întreprinderea "S.C. ROMAN Autocamioane" S.A Brașov. Anumite regimuri de tratament termic s-au realizat și în cadrul departamentului Știința Materialelor;

- cercetările privind utilizarea tehnologiei neconvenționale de tratament termic aplicate aliajelor speciale (oțeluri inoxidabile, fonte cu grafit nodular) s-au realizat cu ajutorul unui cuptor solar cu ax vertical- Medium Size Solar Furnaces (MSSF), cu o putere de aproximativ 1 kW aflat în cadrul Centrului Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES), Font-Romeu-Odeillo (Franța). Cercetările s-au desfășurat prin coordonarea de către autor în calitate de Director al două Granturi FP7-INFRA-312643 tip SFERA (Solar Facilities for the European Research Area) finanțate de către Uniunea Europeană în perioada 2015 și 2016. În cadrul acestor granturi, au fost abordate două domenii industriale de interes. Tematica granturilor a fost:

1. *"Using the solar energy to heat treatments of special alloys resistant to low temperatures"-SE-HTRLT* cod P1502060091 (2015).

Finanțator: Uniunea Europeană, CIEMAT-PSA, Loc de desfășurare: CNRS-PROMES, Franța, 2015;

2. *"Researches regarding the influence of the heat treatments with solar energy over the wear resistant steels properties"-RESOL-WEAR* cod P1512200152 (2016);

Finanțator: Uniunea Europeană, CIEMAT-PSA, Loc de desfășurare: CNRS-PROMES, Franța, 2016;

Testarea și analizarea tuturor materialelor cercetate și prezentate în cadrul Tezei de abilitare, s-a realizat de la caz la caz în diverse locații:

- Centrul de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite" aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov, unde au fost tratate termic fontelor cu grafit nodular și oțeluri speciale înalt aliate (inoxidabile) și unde s-a realizat și investigarea cu privire la structura și proprietățile acestora (microduritate, nanoindentare, comportamentul la temperaturi scăzute și tribologic).

- Departamentul Știința Materialelor, unde cu ajutorul dotării tehnice, s-au realizat diferite tratamente termice și s-au determinat proprietăți mecanice ale fontelor și oțelurilor speciale (duritate, rezistență la tracțiune, alungire, reziliență, etc.)

- Laboratorul Central de încercări mecanice al "S.C. ROMAN Autocamioane" S.A Brașov, unde s-au determinat proprietățile mecanice și comportamentul la temperaturi scăzute atât a fontelor cu grafit nodular cât și a oțelurilor slab aliate.

Tehnologiile de tratament termic prezentate, s-au adaptat nevoilor actuale și pornind de la îmbunătățirea tehnologiilor clasice s-a ajuns la utilizarea unei tehnologii neconvenționale (folosind energia solară), obținându-se rezultate ale cercetării încurajatoare, care vor fi completate ulterior prin participarea în calitate de Director la două noi Granturi FP7 INFRA-312643 tip SFERA a căror finanțare a fost aprobată de Uniunea Europeană pentru derulare în anul 2017 și anume:

1. FP7-INFRA-312643 cod P1701100227: *Solar-assisted treating of some new stainless steels for biomedical applications, SOLAR-BIOMAT*, finanțator: Uniunea Europeană, CIEMAT-PSA, Loc de desfășurare: CIEMAT-PSA, Tabernas (Almeria), Spania, 2017, funcția: Director;

2. FP7-INFRA-312643 cod P1701270241: *Research on solar aided sintering (Al-12Si/Gr/SiC) hybrid composites for automotive industry*", *SOL-SINT-COMP*, finanțator: Uniunea Europeană, CIEMAT-PSA, Loc de desfășurare: CNRS-PROMES, Font-Romeu, Franța, 2017, funcția: Director.

CAP. 1 TENDINȚE PRIVIND UTILIZAREA ENERGIEI SOLARE ÎN INDUSTRIE

Activitatea de cercetare științifică (după susținerea tezei de doctorat în 1998 și avansarea ulterioară la gradul de profesor în 2001) s-a bazat pe folosirea energiei electrice în procesarea aliajelor speciale. Fie că a fost utilizată în procesul tehnologic de elaborare (în cuptoarele electrice cu inducție), fie ca s-a folosit la diferite tipuri de tratamente termice desfășurate în cuptoare cu rezistențe electrice, folosirea energiei electrice a fost un element de nelipsit.

În ultima perioadă (începând cu anul 2014), în activitatea de cercetare științifică, autorul a utilizat cu precădere energia solară, odată cu implicarea în Granturile FP7-INFRA-312643 tip SFERA (Solar Facilities for the European Research Area) finanțate de către Uniunea Europeană. În cadrul echipelor de cercetare, autorul a participat fie în calitate de membru în colectiv (2014-Spania), fie în calitate de Director (2015-Franța, 2016-Franța, 2017- Spania, Franța) [114], cercetările s-au desfășurat cu ajutorul cuptoarelor solare.

Toate cercetările experimentale efectuate cu ajutorul energiei solare, desfășurate în cuptorul solar, în vederea îmbunătățirii proprietăților aliajelor speciale, se încadrează în domeniul tehnologiilor neconvenționale, iar rezultatele obținute prin această tehnologie neconvențională de tratament termic au fost de fiecare dată comparate cu rezultatele obținute prin efectuarea tratamentelor termice clasice, în cuptoare cu rezistență electrică, păstrându-se aceeași parametrii tehnologici.

Deoarece în cercetările experimentale realizate în activitatea științifică, s-a utilizat drept combustibil pentru cuptoarele de tratamente termice, atât energia solară cât și energia electrică, s-a considerat utilă o prezentare a evoluției acestor surse de energie, accentul fiind pe utilizarea acestora în domeniul industrial.

S-a ținut cont de faptul că o parte din sursele industriale ce stau la baza producerii energiei electrice sunt poluante și din acest motiv, accentul în acest caz s-a pus pe studierea alternativei utilizării energiei solare, drept sursă de energie regenerabilă și nepoluantă, ca prioritate prezentă și viitoare în desfășurarea activității de cercetare științifică.

1.1 Surse pentru producerea energiei electrice

În viața de zi cu zi, fără energie electrică întreaga activitate umană s-ar bloca, deci lipsa energiei electrice este de neconceput. Sursele pentru producerea energiei electrice sunt variate, aceasta bazându-se în producerea ei atât pe surse de energii neregenerabile cât și pe surse de energii regenerabile:

a) *energii neregenerabile*: energia generată prin arderea combustibililor fosili: cărbunele, țițeiul și gazele naturale, etc;

b) *energii regenerabile*: energia solară, hidroelectrică, eoliană, geotermală, energia mareelor, energia derivată din biomasă: biodiesel, bioetanol, biogaz, etc.

Conform datelor statistice prezentate de EEA (European Environment Agency) [103], distribuția combustibililor utilizați pentru producerea energiei electrice în CE (perioada 1990-2012) este prezentată în figura 1.1.

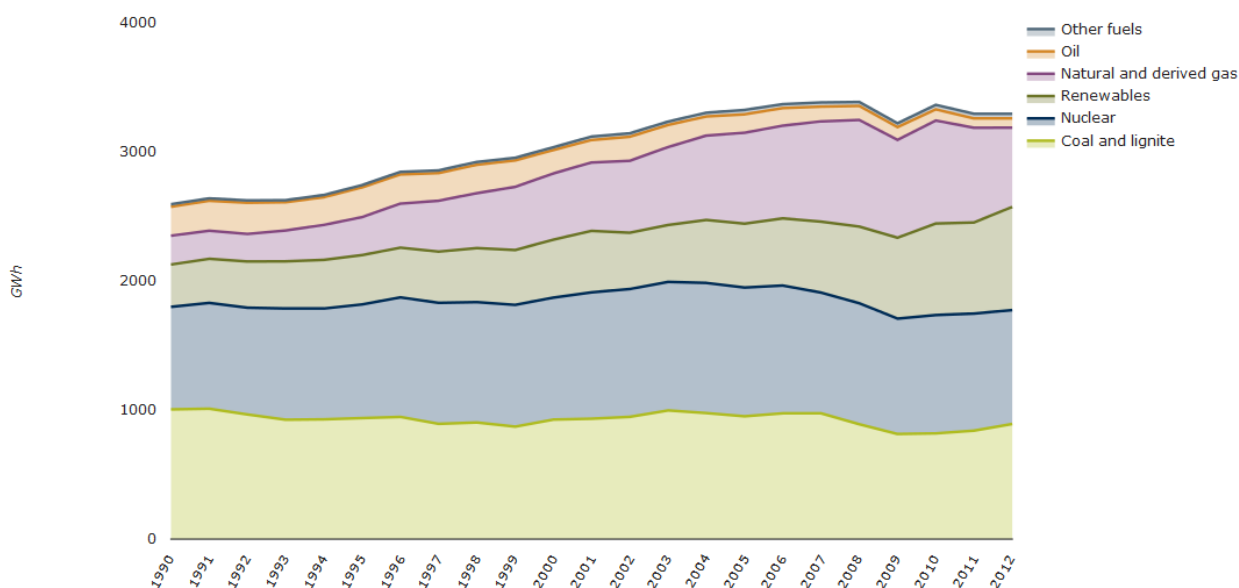


Fig. 1.1 Producția de energie electrică a UE în funcție de combustibilul folosit (1990-2012): cărbune și lignit; nuclear; regenerabil; gaze naturale și derivați; petrol; alți combustibili [103]

Conform datelor prezentate de către European Environment Agency -EEA [103], în anul 2012, combustibilul fosil utilizat în producerea energiei electrice, a reprezentat un procent de 47,9% din întreaga cantitate de combustibili folosiți în acest scop.

Deoarece prin folosirea multor combustibili în procesul de obținere a energiei electrice se produc emisii poluante în atmosferă, Comisia Europeană (prin directiva 2009/28/CE) a stabilit ca

obiectiv obligatoriu până în anul 2020, folosirea unei proporții de 20% din consumul de energie al UE să provină din surse regenerabile [122].

Țara noastră s-a aliniat la politica europeană de promovare a producției de energie electrică din surse regenerabile de energie, reglementările în domeniu fiind [120]:

- Hotărârea Guvernului nr. 443/2003 pentru promovarea producției de energie electrică din surse regenerabile de energie, cu modificările și completările ulterioare;

- Hotărârea Guvernului nr. 1535/2003 privind Strategia Națională de valorificare a resurselor regenerabile de energie;

- Hotărârea Guvernului nr. 1069/2007 privind Strategia energetică a României pentru perioada 2007-2020.

În figura 1.2 este prezentată o situație a emisiilor indirecte rezultate din transformarea energiei, cât și a emisiilor de ardere directe (exprimate în milioane de tone de echivalent CO_2), specifice principalelor sectoare consumatoare de energie din Comunitatea Europeană, în anul 2010 (date prezentate de către EEA -European Environmental Agency) [104].

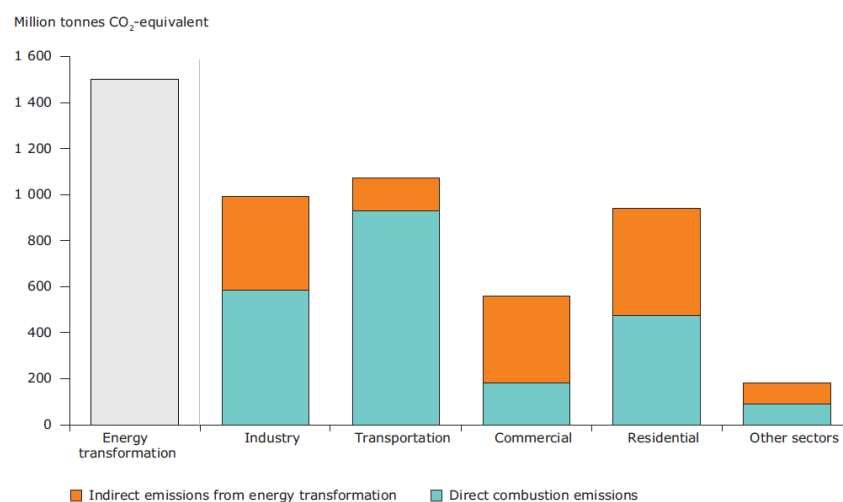


Fig. 1.2 Emisiile indirecte și directe (exprimate în milioane de tone de echivalent CO_2), specifice principalelor sectoare consumatoare de energie din Comunitatea Europeană, în anul 2010 [104]

Se remarcă faptul că după domeniul transporturilor, domeniul industrial este al doilea domeniu poluator (producător de gaze cu efect de seră) dintre sectoarele consumatoare de energie din Comunitatea Europeană, situație raportată la anul 2010.

Conform U.S. Agency International Administration (EIA) în documentul "International Energy Outlook 2016 "[128], producția de energie electrică (în funcție de combustibilul utilizat) specifică perioadei 2012-2040 are o distribuție conform figurii 1.3.

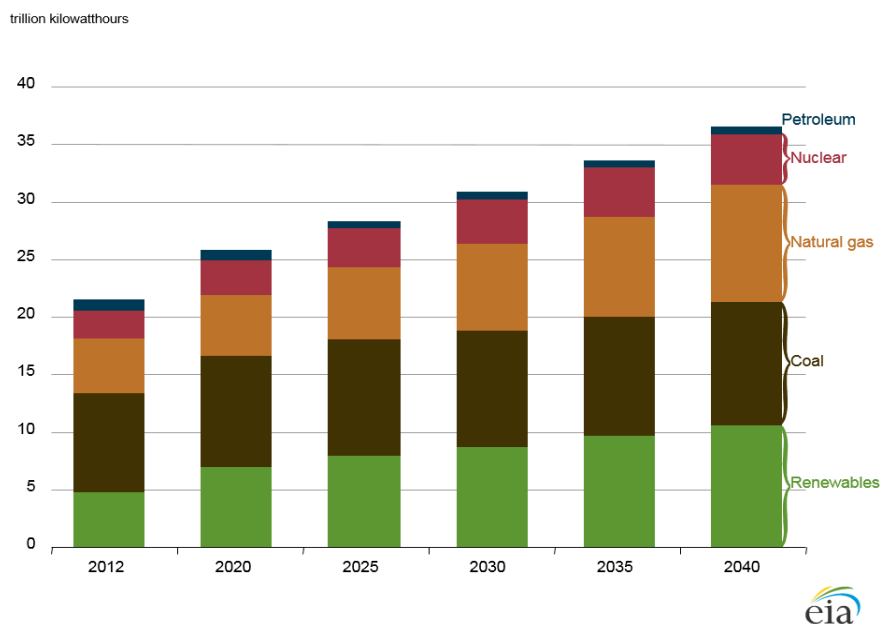


Fig. 1.3 Producția de energie electrică (în funcție de combustibilul utilizat) specifică perioadei 2012-2040 [128]

În conformitate cu documentul IOE 2016 [128], utilizarea cărbunelui în producerea energiei electrice scade de la un procent de 40% (anul 2012) la 29% (anul 2040).

În ceea ce privește utilizarea energiilor regenerabile în producerea energiei electrice, pornind de la un procent de utilizare de 22% (anul 2012), se preconizează utilizarea lor într-un procent de 29% anul 2040) din procentul de 100% combustibili totali utilizați.

În industrie, în ultima perioadă se remarcă utilizarea energiei solare, atât în calitate de combustibil folosit pentru producerea energiei electrice, cât și ca sursă de energie, fapt confirmat de datele statistice prezentate de EEA.

1.2 Tendințe ale utilizării energiei solare

Fiind o sursă de energie importantă pentru secolul XXI, energia solară are un impact minim asupra mediului, fiind și o resursă inepuizabilă de energie, alături de energia eoliană, căldura Pământului, forța valurilor și a fluxului, forța de cădere a apei, etc. Ca orice sursă de energie, energia solară are atât avantaje cât și dezavantaje în utilizarea ei.

Avantajele folosirii energiei solare [25, 98, 104, 113, 116, 124]:

- din punct de vedere ecologic, prin folosirea energiei solare (regenerabilă și nepoluantă) se protejează mediu, reducându-se fenomenul de încălzire globală;
- energia solară constituie o sursă de utilizare foarte rentabilă, deoarece sursa de producere a ei se găsește fără restricții (soarele răsare în fiecare dimineață);
- utilizarea energiei solare, conferă securitate și independență energetică (este gratuită nefiind influențată de creșteri de preț);
- prin utilizarea energiei solare pentru: încălzirea locuinței, a apei calde, producerea de energie electrică, se reduc atât costurile casnice cât și cele industriale;

Dezavantaje folosirii energiei solare [25, 116, 124]:

- energia solară este sursă de energie alternativă, fiind produsă pe timp de zi și numai în condiții meteo favorabile;
- energia solară poate fi folosită cu prioritate în zonele geografice însorite, în care radiațiile solare sunt intense ceea ce duce la amortizarea în timp a investițiilor specifice achiziționării instalațiilor de profil;
- este dificilă captarea și stocarea energiei solare într-o formă (în principal căldură sau electricitate) care să permită utilizarea ei ulterioară [114].

Conform U.S. Agency International Administration (EIA) în documentul "International Energy Outlook 2016 "[128], energiile regenerabile reprezintă o creștere a ponderii din totalul ofertei de energie electrică din lume, ele fiind sursa de generare a energiei cu cea mai mare creștere, aspect prezentat în figura 1.4.

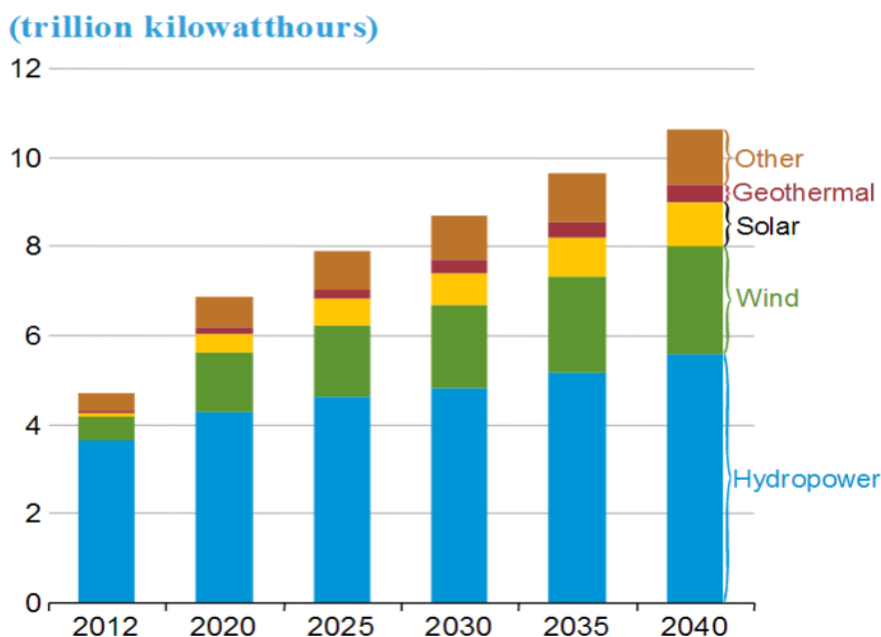


Fig. 1.4 Producția de energie electrică având ca sursă energiile regenerabile (specifică perioadei 2012-2040) [128]

În conformitate cu documentul IOE 2016 [128], producția totală de energie electrică generată de resursele regenerabile crește cu 2,9% / an, odată cu creșterea cotei de generare de energie electrică mondială, care crește de la 22% în 2012 la 29% în 2040.

În ce privește energia solară, aceasta are cea mai rapidă creștere din lume în cadrul energiei din surse regenerabile, cu o generare a energiei netă în creștere cu o medie de 8,3% / an.

Din cei 5,9 trilioane kWh care vor fi furnizați în perioada de proiecție (până în anul 2040) se preconizează că distribuția energiei electrice furnizată din energiile regenerabile va fi următoarea:

- energia hidroelectrică și eoliană va furniza o producție de aproximativ 1,9 trilioane kWh (33%);
- energia solară va furniza o producție de aproximativ 859 miliarde kWh (15%);
- alte surse regenerabile de energie (cea mai mare parte din biomasă și deșeuri) vor furniza o producție de aproximativ 856 miliarde kWh (14%).

În vederea reducerii emisiilor de carbon și producerea de energie prin tehnologii nepoluante, Comisia Europeană recomandă ca până în 2020 (în conformitate cu "Directivile: 2009/28/EC și 2009/29/EC" ale Parlamentului European cât și în conformitate cu "Planul Strategic European pentru Tehnologiile Energetice - Planul SET") să crească cantitatea de energie electrică având ca sursă energiile regenerabile [113], fapt prezentat în figura fig. 1.5.



Fig. 1.5 Obiective care trebuie îndeplinite până în 2020 [113]

Din figura 1.5 rezultă că până în anul 2020, procentele de energie produsă din energii regenerabile vor fi:

- din energia solară, să se producă 15% din necesarul de energie electrică;
- din energia eoliană, să se producă 20% din necesarul de energie electrică;
- din bioenergie, să se producă 14% din necesarul de energie;

1.2.1 Cercetarea și dezvoltarea utilizării energiei solare

Datorită importanței folosirii energiei solare în diferite aplicații (cu reducerea consumului altor surse de combustibili care prin utilizarea lor ar duce la creșterea gradului de poluare), Comisia Europeană în conformitate cu "Planul Strategic European pentru Tehnologiile Energetice - Planul SET": "Către un viitor cu emisii reduse de carbon", *finanțează cu o sumă importantă (16 miliarde de Euro) cercetarea și dezvoltarea utilizării energiei solare până în anul 2020* (an de referință fiind anul 2010) [113], fapt prezentat în figura 1.6.

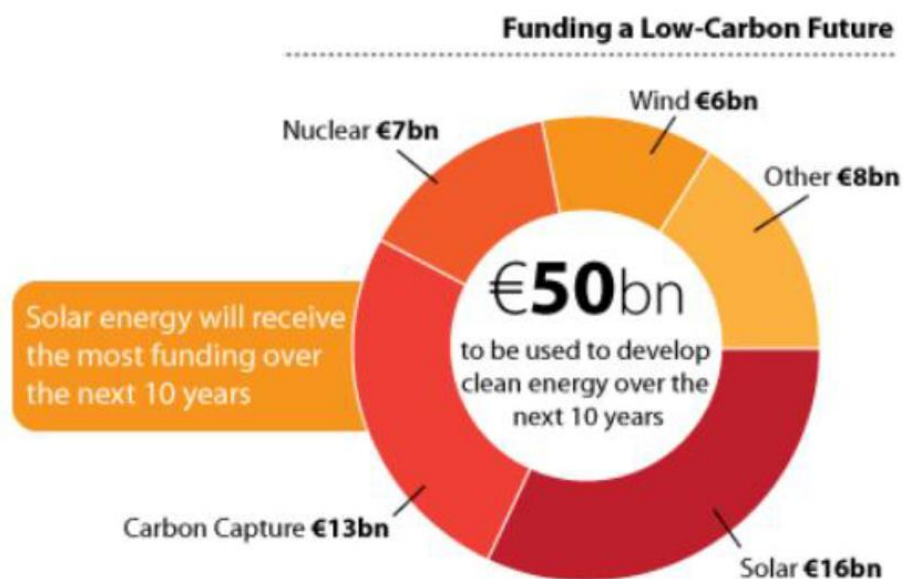


Fig. 1.6 Finanțarea unui viitor cu emisii reduse de CO₂ de către Comisia Europeană (până în anul 2020) [113]

Se remarcă faptul că finanțarea cercetării și dezvoltării producerii energiei solare de către Comisia Europeană, primește cea mai mare sumă de finanțare din totalul de 50 Mld. alocate până în anul 2020.

Energia solară poate fi folosită în multiple scopuri, printre cele mai importante amintim:

- producerea energiei electrice;
- producerea de energie termică pentru încălzirea clădirilor și a producerii apei calde de consum (prin utilizarea panourilor solare termice),
- folosirea în domeniul industrial;
- folosire drept energie pentru motoarele mijloacelor de transport: mașini, trenuri, avioane, ambarcațiuni solare;
- folosirea drept sursă de energie pentru panouri solare de informare și publicitare;

- utilizarea casnică pentru instalații de gătit (bucătărie solară);
- gadgeturi solare: telefoane, corturi solare, geți, rucsacuri, poșete, jachete cu panouri solare, etc.

Pe lângă multitudinea aplicațiilor specifice energiei solare, *se remarcă și utilizarea industrială a acesteia, prin folosirea ei drept combustibil al cuptoarelor solare* [25, 124].

1.3 Concluzii

Analizând datele prezentate în cadrul acestui capitol, se remarcă următoarele:

- ✓ o mare și importantă parte din sursele industriale actuale ce stau la baza producerii energiei electrice sunt poluante și de aceea, în vederea protejării mediului și pentru un viitor cu emisii reduse de carbon, tendința mondială în această direcție este de înlocuirea acestora cu surse de energii regenerabile, care conform U.S. Agency International Administration (EIA) în documentul "International Energy Outlook 2016 "[128], reprezintă o creștere a ponderii din totalul ofertei de energie electrică din lume, ele fiind sursa de generarea a energiei cu cea mai mare creștere;

- ✓ dintre energiile regenerabile care primesc sume importante de finanțare pentru cercetare și dezvoltare până în anul 2020, se remarcă energia solară (sursă de energie importantă pentru secolul XXI, cu un impact minim asupra mediului, fiind și o resursă inepuizabilă de energie) iar pentru cercetarea și dezvoltarea acesteia se primesc fonduri de *16 miliarde de Euro (din totalul de 50 miliarde alocată energiilor regenerabile) acordate de Comisia Europeană în conformitate cu "Planul Strategic European pentru Tehnologiile Energetice - Planul SET"*[113];

- ✓ direcția principală a cercetărilor cuprinse în această teză de abilitare urmărește să aducă date și rezultate noi în favoarea valorificării, atât în cercetare, cât și la scară industrială a energiei solare, încadrându-se astfel în tendința mondială referitoare la folosirea energiilor regenerabile și în special a energiei solare în cât mai multe domenii de activitate.

CAP. 2 CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ENERGIEI SOLARE ÎN VEDEREA MODIFICĂRII PROPRIETĂȚILOR ALIAJELOR SPECIALE TRATATE TERMIC

În cadrul acestui capitol, se vor prezenta rezultatele obținute de autor prin cercetările experimentale proprii, privind duritatea, comportamentul la temperaturi scăzute cât și comportamentul tribologic al unor aliajelor speciale tratate termic, cu ajutorul energiei solare, prin comparație cu rezultatele obținute prin tratamente termice care utilizează ca sursă energia electrică.

2.1 Cuptoare solare și electrice utilizate în cadrul cercetării

Cercetările experimentale proprii realizate după 1998 (după susținerea tezei de doctorat) au urmărit utilizarea comparativă a două tipuri de instalații de încălzire și anume: cuptoare cu energie solară și cuptoare cu sursă de energie electrică.

2.1.1 Cuptoare solare utilizate în cadrul cercetării

Cuptorul solar este un dispozitiv de captare a energiei radiante solare, care utilizează dispozitive cu oglinzi pentru a redirecționa și concentra razele soarelui pe o suprafață mică, producând astfel o temperatură extrem de ridicată. Părțile componente ale cuptorului solar sunt [25, 98, 112, 124]:

- *heliostatul* (instrument alcătuit dintr-un sistem de oglinzi folosit pentru captarea și reflectarea dirijată a unui fascicol de raze solare asupra unui dispozitiv de concentrare, independent de deplasarea Pământului în raport cu soarele);

- *concentratorul parabolic (oglină parabolică)* de tip reflectant, care are rolul să concentreze fasciculul de raze într-o zonă focală, pe obiectul supus încălzirii.

Formele constructive ale cuptoarelor solare cu heliostat și concentrator parabolic sunt prezentate în figura 2.1 [98].

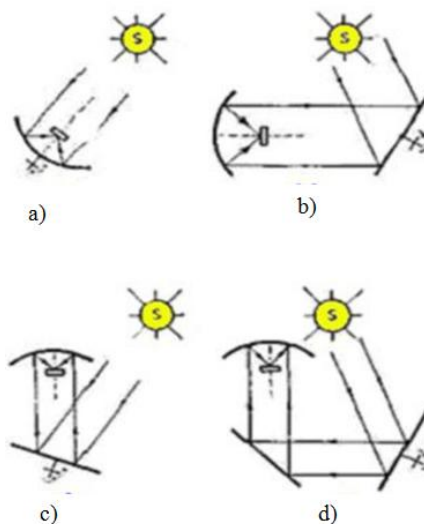


Fig. 2.1 Variante constructive ale cuptoarelor solare cu concentratoare parabolice și heliostat: a) oglindă parabolică cu axa orientată direct spre Soare; b) oglindă parabolică cu axă orizontală; c) oglindă parabolică cu axă verticală și heliostat sub oglindă; d) oglindă parabolică cu axă verticală și heliostatul alăturat [98]

Dintre toate variantele constructive prezentate în figura 2.1, varianta (c) este mai simplă și se pretează a fi utilizată la elaborarea sau tratamentul termic al aliajelor (în principal datorită faptului că agregatul de topire sau piesele ce urmează a fi tratate, sunt amplasate într-o poziție normală, așezate pe o suprafață orizontală).

Cercetările realizate cu ajutorul energiei solare și prezentate în această teză, s-au desfășurat în Centrul Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES) din localitatea Font-Romeu-Odeillo (Franța).

Cuptorul solar din Font Romeu, a fost construit în anul 1949 de Profesorul Felix Trombe, fiind primul cuptor solar de acest tip construit în lume [24, 124].

În 1993, cuptorul solar a fost folosit în regim industrial, la arderea ceramicii, cât și pentru încălzirea unor produse de bronz și aluminiu.

Aici se găsește și cel mai puternic cuptor solar din lume, Megawatt Solar Furnace (MWSF) cu o putere de peste 1 MW_{th}, cu un vârf de flux ce depășește 10000 kW/m² și care permite obținerea de temperaturi în zona focală de peste 3500°C (fig. 2.2).



Fig. 2.2 Cuptorul solar MWSF- Centrul Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES) din localitatea Font-Romeu-Odeillo (Franța) [124].

Cercetările experimentale efectuate de autor și prezentate în această teză de abilitare, s-au desfășurat cu ajutorul unui cuptor solar cu ax vertical, cu o putere de aproximativ 1 kW, Medium Size Solar Furnaces (MSSF), a cărei schemă constructivă este prezentată în figura 2.3.

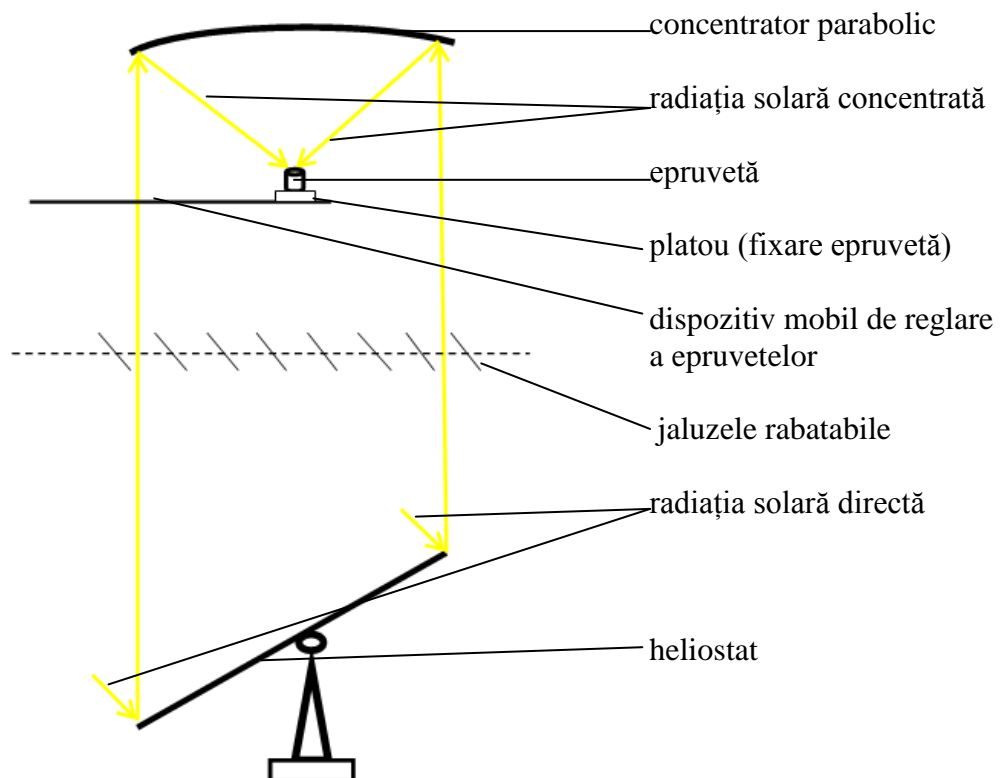


Fig. 2.3 Schema generală de funcționare a cuptorului solar "Medium Size Solar Furnaces" (MSSF)

În acest caz, energia necesară desfășurării experimentelor a fost furnizată de către un heliostat (sistem de oglinzi dispuse pe un panou solar dreptunghiular) cu dimensiunile: $L=5$ m și $l=4$ m, prezentat în figura 2.4.

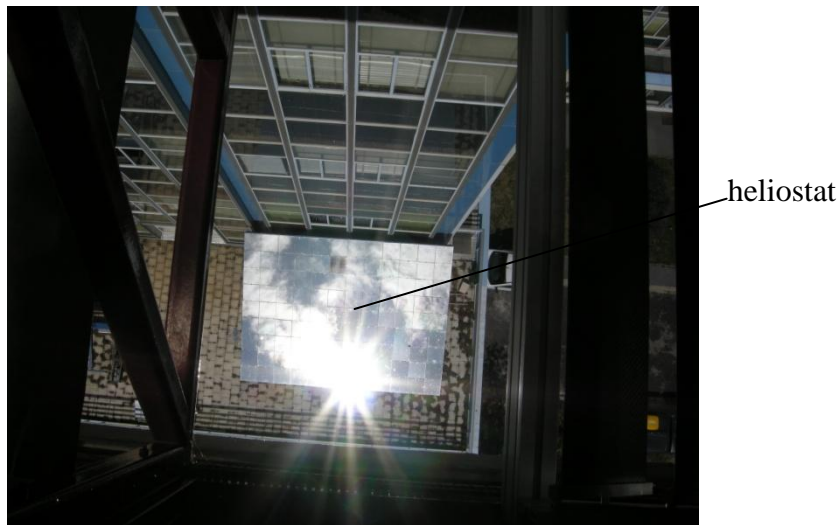


Fig. 2.4 Heliostat CNRS-PROMES (vedere de sus)

Radiația solară incidentă pe heliostat este reflectată către postul de lucru, trecând printr-un panou cu jaluzelele rabatabile, care prin deschidere sau închiderea lor (manuală sau automată), reglează fluxul radiației solare - DNI (Direct Normal Irradiance). Sistemul heliostat-atenuator reglabil este prezentat în figura 2.5.

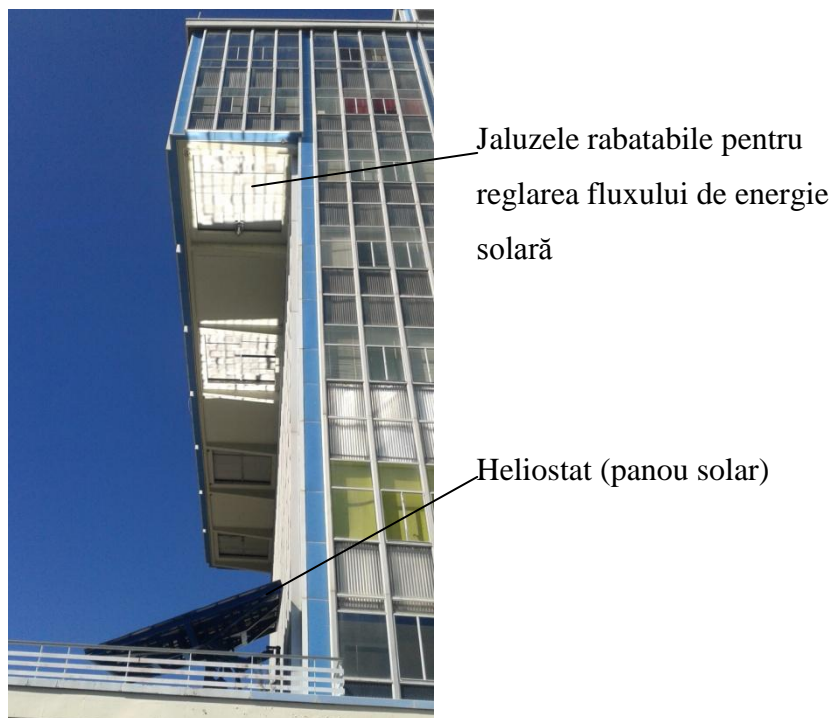
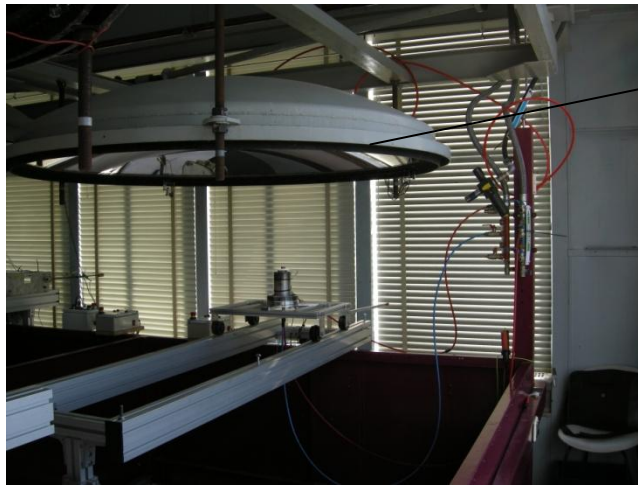


Fig. 2.5 Direcționarea fluxului de energie solară specific cuptorului solar MSSF (CNRS-PROMES) utilizat în cercetări

Postul de lucru constă dintr-o oglindă parabolică care reflectă și concentrează energia radiantă într-un plan focal. Oglinda parabolică are dimensiunea de 1,5 m (figura 2.6). Epruveta supusă încălzirii este plasată în planul focal al concentratorului parabolic.



Oglindă parabolică

Fig. 2.6 Oglindă parabolică (CNRS-PROMES)

Pentru ca epruvetele să fie în totalitate încălzire de spotul de energie solară, înaintea începerii fiecărei ședințe de lucru, se stabilește poziția corectă a spotului razelor solare (concentrarea razelor solare), fapt prezentat în figura 2.7.



Poziția de concentrare
maximă a radiației solare
(locul de amplasare al
epruvetelor)

Fig. 2.7 Stabilirea poziției spotului de energie solară (CNRS-PROMES)

După stabilirea poziției de amplasare a epruvetelor, cu ajutorul unui dispozitiv tip ORCA, se ridică (sau se coboară) întregul post de lucru, urmând poziționarea corectă în spotul de lumină concentrat a epruvetelor (fig. 2.8).



Fig. 2.8 Dispozitiv de reglare a înălțimii postului de lucru tip ORCA (CNRS-PROMES)

Pe platoul de lucru pe care s-au așezat și fixat epruvetele (fig. 2.9), s-a amplasat un suport paralelipipedic cu dimensiunile 40x30x15 mm. S-a realizat astfel o izolare termică a epruvetelor în raport cu platoul de lucru răcit cu apă la interior.

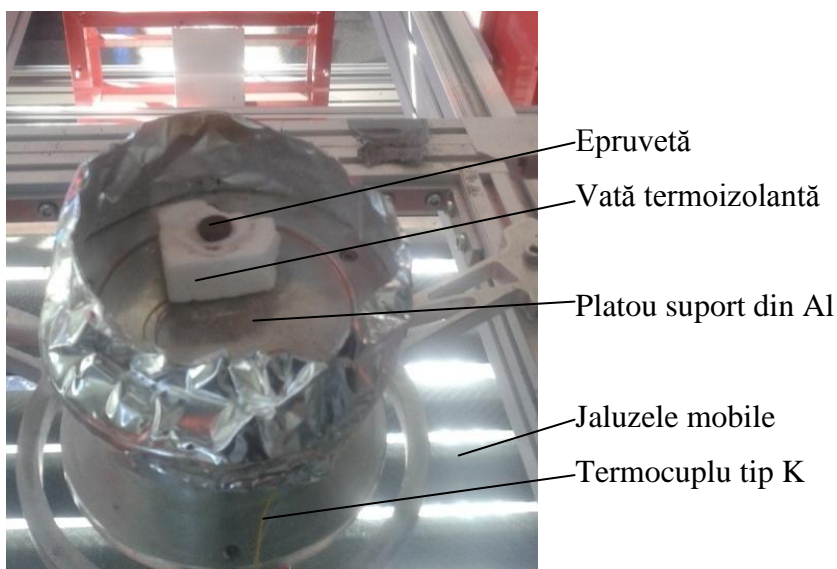


Fig. 2.9 Amplasarea epruvetei în timpul experimentelor (CNRS-PROMES)

Analizând datele de specialitate, publicate de către Centrul Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES) cât și din datele prezentate în cercetările și publicațiile din domeniu, se pot remarca diferite avantaje și

dezavantaje ale utilizării energiei solare, respectiv ale utilizării industriale a cuptoarelor solare [24, 25, 124]:

Printre avantajele utilizării cuptoarelor solare se pot aminti [25, 124]:

- această tehnologie neconvențională de tratamente termice, poate fi folosită cu succes atunci când sunt necesari parametrii tehnologici foarte greu de realizat prin tehnologiile clasice și anume: realizarea unor încălziri și răcirii rapide, sau temperaturi foarte mari de lucru;
- procesul de încălzire (topire) a produselor, poate fi aplicată și acolo unde se cere o limitare a poluării;
- activitatea de cercetarea se poate desfășura și pe materiale sau pe tehnologii considerate inițial prea costisitoare a fi procesate cu tehnologiile clasice;
- procesarea în cuptoarele solare se realizează cu cost scăzut;
- se reduce consumul de combustibili fosili;
- se reduce necesitatea de tăieri de păduri (lemnurile folosite drept combustibil);

Limitări ale folosirii cuptoarelor solare [25, 124]:

- tehnologia utilizării cuptoarelor solare a existat de multă vreme dar niciodată nu a fost în întregime exploatată sau folosită industrial pe scară largă;
- marele dezavantaj al utilizării energiei solare, rămâne totuși faptul că utilizarea acesteia este limitată în timp și zonă geografică (se poate utiliza adecvat numai în zilele cu intensitate solară și fără existența unor perturbații noroase);
- construcția cuptoarelor solare foarte mari este costisitoare și ocupă spații mari;

Printre procesele industriale în care folosirea cuptoarelor solare au dat rezultate, amintim [24, 25, 124]:

- topirea unor metale sau aliaje necesare industriilor: aerospațiale, de apărare, electrotehnice, metalurgice, etc., materiale care necesită temperaturi ridicate de topire, acest proces fiind realizat fără poluare;
- topirea metalelor în cazul reciclării acestora;
- distrugerea prin topire a deșeurilor periculoase;
- sudarea unor componente ale utilajelor/mașinilor;
- efectuarea unor operații de tratamente termic de suprafață sau în volum;
- înlocuirea de către cuptoarele solare (de mari dimensiuni) a cuptoarelor cu laser sau a cuptoarelor care utilizează combustibili fosili, în diferitele procese industriale;

2.1.2 Cuptoare electrice utilizate în cadrul cercetării

În cadrul experimentelor utilizate ca termen de comparație, elaborarea aliajelor speciale cât și tratamentul termic specific acestora (în funcție de perioadă și tipul activității de desfășurare), s-a realizat cu ajutorul următoarelor tipuri de cuptoare electrice:

a) cuptoare electrice de topire cu inducție cu creuzet, folosite la elaborarea atât a oțelurilor speciale cât și a fontelor cu grafit nodular.

- oțelurile speciale (inoxidabile) s-au elaborat în cadrul S.C. "UPRUC TPA" Srl Făgăraș;
- fontele cu grafit nodular au fost elaborate în cadrul S.C. "ROMAN" Autocamioane S.A.

Brașov;

b) cuptoarele cu rezistență electrică au fost utilizate în realizarea diferitelor variante de tratamente termice:

- cuptoare electrice tip "UTTIS" București, cuptoare aflate în dotarea departamentului Știința Materialelor (în special în perioada anilor 1998-2010);

- cuptorul cu rezistoare electrice tip "Nabertherm", aflate în dotarea Centrului de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite" aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltate al Universității Transilvania din Brașov (utilizate începând cu anul 2010). Pe acest echipament se pot realiza tratamente termice și de sinterizare speciale, pentru materiale și aliaje metalice și nemetalice (oxidice). Cuptorul cu rezistoare electrice poate funcționa până la temperatura de lucru de 1750°C, volumul camerei de lucru fiind de 5dm³. Cuptorul permite realizarea unor cicluri de tratament termic cu o înaltă precizie de respectare a temperaturii dorite pentru materiale metalice și nemetalice pe toată plaja de lucru (20-1750°C) [118].

2.2 Cercetări privind duritatea aliajelor speciale tratate termic utilizând energie solară și electrică

Duritatea este proprietatea metalului de a se opune pătrunderii mecanice în suprafața sa a unui corp dur (penetrator) [2, 93, 94, 125].

Metodele de determinare a durității aliajelor speciale, folosite în cadrul cercetărilor experimentale au fost:

- Metoda Brinell [HB] - metodă ce folosește o bilă ca penetrator, care este apăsată static asupra materialului, bila putând fi din oțel sau carburi metalice, metodă realizată în conformitate

cu standardul specific, ISO 6506-1:2014: "Materiale metalice-Testul de duritate Brinell-Partea 1: Metoda de testare". Pentru microduritate, specific este standardul ISO 6507-1: 2006 [94, 117, 125];

- Metoda Rockwell [HRC sau HRB] - metoda ce folosește drept penetrator (în funcție de calitatea materialelor) fie un con de diamant (pentru materiale foarte dure) fie o bilă din carburi metalice (pentru materialele cu o duritate medie). Standardul specific acestei metode este ISO 6508-1:2016: "Materiale metalice-Testul de duritate Rockwell-Partea 1: Metoda de testare" [117];

- Metoda Vickers [HV] folosește un penetrator de diamant, cu o formă piramidală cu baza pătrată, în conformitate cu standardul ISO 6507-1:2005 "Materiale metalice-Testul de duritate Vickers-Partea 1: Metoda de testare" [94, 117, 125].

În cadrul cercetărilor experimentale, îmbunătățirea durității aliajelor speciale (oțeluri aliate sau fontelor cu grafit nodular-Fgn), s-a realizat fie prin aliere suplimentară (modificarea compoziției chimice) fie prin aplicarea diferitelor variante de tratamente termice (modificarea structurii), fie combinat (aliere suplimentară urmată de aplicarea diferitelor variante de tratamente termice).

2.2.1 Aparatura și materialele utilizate

2.2.1.1 Aparatura specifică utilizată pentru studiul durității aliajelor speciale

✓ *Elaborarea aliajelor speciale s-a realizat cu ajutorul următoarelor cuptoare:*

- cuptoare electrice cu inducție cu creuzet pentru elaborarea atât a oțelului inoxidabil (EN 1.4848) cât și a fontelor speciale: EN-GJS-450-10, respectiv Fgn aliată cu Cr-Ni;

✓ *Tratamentul termic al aliajelor speciale s-a realizat cu ajutorul următoarelor cuptoare:*

- cuptor solar cu ax vertical, cu o putere de aproximativ 1 kW, Medium Size Solar Furnaces (MSSF) aflat în cadrul Centrului Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES) din localitatea Font-Romeu-Odeillo (Franța), utilizat pentru efectuarea diferitelor variante de tratamente termice (a fost prezentat la punctul 2.1.2);

- cuptor cu rezistoare electrice tip "Nabertherm", aflat în dotarea Centrului de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite" din cadrul Institutului de Cercetare - Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov, utilizat de asemenea pentru efectuarea diferitelor variante de tratamente termice (prezentat la punctul 2.1.1);

- cuptor cu rezistoare electrice tip "UTTIS", aflate în dotarea Departamentului Știința Materialelor, utilizat pentru efectuarea diferitelor variante de tratamente termice;

✓ *Măsurarea temperaturii pe tot parcursul tratamentului termic în cuptorul solar*

S-a realizat prin amplasarea unui termocuplul de tip "k" poziționat la partea inferioară a epruvetelor, temperatura fiind măsurată de acesta prin contact cu epruveta, iar achiziția datelor s-a realizat cu un sistem Data Logger EL-GFX-DTC with Graphic Screen (fig. 2.10).



Fig.2.10 Sistem de achiziția datelor Data Logger EL-GFX-DTC, Dual Channel K type Thermocouple with Graphic Screen [101]

✓ *Aparatura utilizată pentru analiza microstructurii*

În vederea efectuării analizei la microscop a microstructurii, s-a utilizat Sistemul de analiza structurală OMNIMET-BUEHLER, dotat cu microscop NIKON (cu rezoluție de până la 1000X) și cu softuri adecvate analizelor structurale specifice materialelor metalice și nemetalice, aflate în cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite din cadrul Institutului de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov [118];

✓ *Încercările mecanice de duritate s-au realizat cu ajutorul următoarelor aparate:*

- pentru determinarea microdurității prin Metoda Vickers [HV] s-a utilizat microdurimetrului "FM 700" cu o sarcină de încărcare de 100gf din cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite din cadrul Institutului de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov. Prelucrarea informațiilor în regim automat cât și orientarea măsurătorilor pe direcții prestabilite s-a realizat cu ajutorului softului Precidur [118];

- pentru determinarea durității prin metoda Brinell [HB] s-a realizat cu un durimetru specific având bila din oțel cu diametrul (D) de 5 mm, cu o sarcină de încărcare (F) de 7500 N și un timp de apăsare (T) de 15 secunde, aflat în cadrul departamentului Știința Materialelor;

2.2.1.2 Materialele utilizate în cadrul cercetării

Specific materialelor utilizate în cadrul cercetărilor experimentale este faptul că toate au fost aliate suplimentar cu elemente de aliere (față de compoziția standardizată), în vederea finisării structurii și obținerea unor valori superioare ale proprietăților de exploatare. *Această aliere suplimentară, conferă activității de cercetare a autorului particularitatea de noutate.* Materialele utilizate în cadrul experimentelor sunt prezentate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1 Compoziția chimică a aliajelor studiate

Compoziția chimică [%]		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Co	W	Cu
Oțel inoxidabil* En 1.4848	Standard	0,3-0,5	1-2,5	≤2	≤0,04	≤0,030	-	24-27	11-14	≤0,5	-	-	-
	Experimente	0,40	1,37	0,90	0,03	0,035	-	24,10	21,90	0,72	6,15	1,80	0,30
Fgn-Ni-Cu-Cr** EN-GJS-450-10	Standard	3,25-3,7	2,4-3,0	0,1-0,3	≤0,06	≤0,029	0,04-0,07	-	-	-	-	-	-
	Experimente	3,58	2,25	0,54	0,008	0,02	0,06	0,20	0,54	-	-	-	0,42
Fgn-Ni-Cr** EN-GJS-450-10	Standard	3,25-3,7	2,4-3,0	0,1-0,3	≤0,08	≤0,02	0,04-0,07	-	-	-	-	-	-
	Experimente	3,61	2,67	0,53	0,011	0,05	0,06	0,20	0,45	-	-	-	-

* conform EN 10295:2002 - Heat resistant steel castings [107, 125, 129]

** conform EN 1563:2011 - Founding - Spheroidal graphite cast irons [102, 105, 117, 125]

Conform standardului EN 10200:2012 [105, 115] un oțel inoxidabil este un aliaj de fier, crom și carbon, cu un conținut mai mare de 10,5%Cr și mai mic de 1,2%C.

În cazul oțelului inoxidabil, față de compoziția chimică standard, s-a realizat o aliere suplimentară, prin adăugarea următoarelor elemente de aliere: cobalt (Co), wolfram (W), cupru (Cu) și molibden (Mo). Prin această aliere suplimentară, s-a dorit o îmbunătățire a proprietăților de: duritate (alierea cu Co, W și Mo), rezistența la rupere (alierea cu Co și Cu), rezistența la oboseală (alierea cu Co și Mo), rezistență la cald cât și a durității la roșu (W).

Cobaltul (Co), inhibă creșterea grăunților la temperaturi ridicate și îmbunătățește semnificativ păstrarea rezistenței la temperaturi ridicate, rezultând o creștere a duratei de viață a sculelor așchietoare. Wolframul (W) introdus pentru creșterea rezistenței la cald și a durității la roșu, formează carburi foarte dure, rezistente la uzură.

Cuprul (Cu), are o tendință moderată de segregare, el crescând rezistența la coroziune în atmosferă (peste 0.20 %). La un conținut de sub 1%, cuprul crește rezistența la H₂SO₄ și HCl.

Molibdenul (Mo) este un element puternic carburigen, el se dizolvă ușor în cementită, îmbunătățind rezistența la fluaj la temperaturi ridicate.

Structura brut turnată a acestui oțel a fost analizată pe baza diagramei Schaeffler [99].

Conform diagramei Schaeffler (fig. 2.11), structura oțelurilor inoxidabile la răcire în aer liber, se calculează cu ajutorul relațiilor Cr_{echiv} și Ni_{echiv} (rel. 2.1 și 2.2):

$$Cr_{echiv} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad (2.1)$$

$$Ni_{echiv} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \quad (2.2)$$

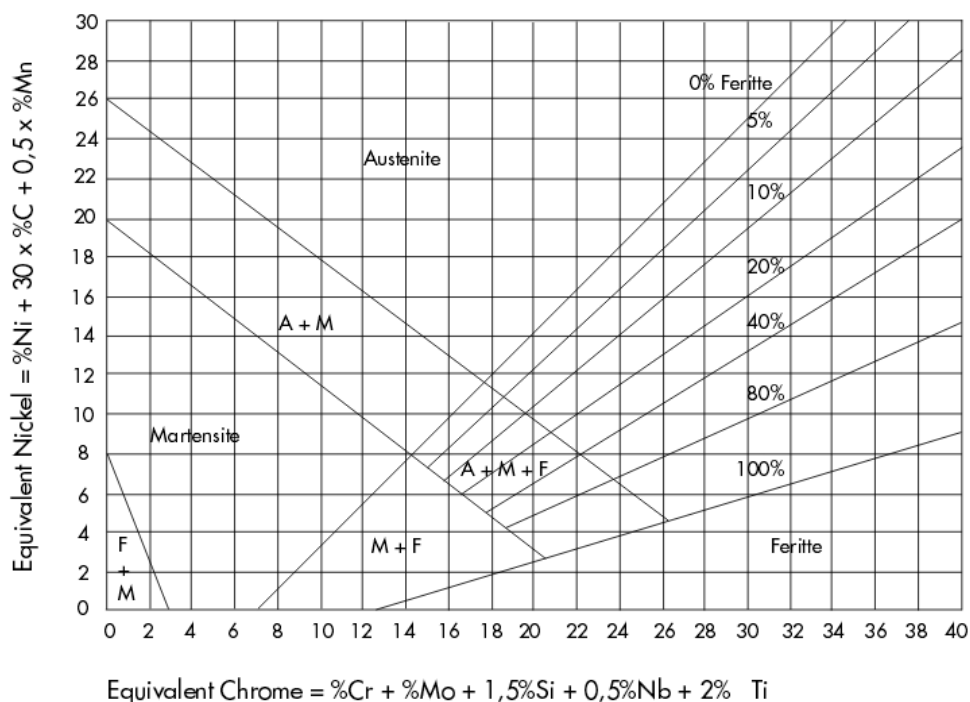


Fig. 2.11 Diagrama Schaeffler [99]

În cazul oțelului marca EN 1.4848. (GX40CrNiSi25-20) studiat, $Cr_{echiv} = 26,875$ [%] iar $Ni_{echiv} = 34,35$ [%], ceea ce indică o structură austenitică (Fey), fapt explicat de prezența în compoziția chimică a unui procent ridicat de Ni (în cazul nostru Ni=21,90%) element puternic austenitogen.

Datorită procentelor ridicate de elemente de aliere: Cr (24,10%); Ni (21,90%); Co (6,15%); W (1,80%); Mo (0,72%) și Cu (0,30%), în structură sunt prezente carburi complexe poliedrice (K) care pot fi de tipul $(Cr, Fe)_{23}C_6$, $(Fe, Cr)_4C$, acestea pot fi dispuse sub formă de rețea (în șiruri) cât și carburi izolate.

Această structură austenitică specifică oțelului inoxidabil EN 1.4848 analizat, îi conferă acestuia următoarele avantaje: proprietăți non-magnetice, o plasticitate și o sudabilitate bună, acesta fiind unul dintre aliajele cele mai rezistente la coroziune dintre toate clasele de oțeluri inoxidabile (datorită conținuturilor ridicate de Cr și Ni), fiind și cel mai puțin casant (în

comparație cu celelalte clase de oțeluri inoxidabile) la temperaturi joase. Fiind cunoscute și ca aliajele din seria 300, acestea sunt cele care se utilizează frecvent pentru aplicațiile inoxidabile [93]. În stare brut turnată acest oțel a avut duritatea de 23 HRC ~255 HV₁₀₀ (duritatea reprezintă media aritmetică a șase determinări efectuate pe material).

Principalul dezavantaj al acestei structurii [99] este fisurarea și coroziunea intercristalină în intervalul de temperaturi (500 - 800°C) datorită precipitării carburilor de tipul (Cr, Fe)₂₃C₆.

În cazul fontelor cu grafit nodular, față de compoziția chimică standard, acestea au fost aliate suplimentare cu Cr, Ni și Cu, știind că la alegerea unei anumite compoziții chimice (în funcție de scopul urmărit) se ține cont de influența elementelor asupra călibilității și implicit realizarea unor produse cu proprietăți mecanice superioare [63]. Influența elementelor de aliere asupra diverselor proprietăți specifice fontelor cu grafit nodular este prezentată în tabelul 2.2.

Tabelul 2.2 Influența elementelor de aliere asupra diverselor proprietăți [63]

Proprietăți	Si	Mn	Mo	Ni	Cu	Viteza de răcire după turnare
Nr.de separări de grafit	↓	↑	↑	↓	↓	↑
Dimensiunea grafitului	↑	↓	↓	↑	↑	↓
Formarea de carburi	↓↓	↑↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↑
Segregații	–	↑↑	↑↑	↑	↑	↓
Călibilitatea	↑	↑↑↑	↑↑	↑	↑↑	–
Rezistența mecanică	↑	↓	↑↑	↑	↑	↑
Alungire specifică	↓	↓↓	↓	↑	↑	↑
Reziliența	↓	↓↓	↓	↑	↑	↑

Prin săgeți se indică modificarea proprietăților, respectiv structura de turnare. În ceea ce privește cromul acesta influențează favorabil călibilitatea Fgn.

În stare brut turnată, fontele au avut o structură perlito-feritică cu valorile durității de aproximativ 190 HB (pentru Fgn Ni-Cu-Cr) și 181 HB (pentru Fgn Ni-Cr), valorile durității, reprezintă media aritmetică a șase determinări efectuate pe fiecare material în parte.

2.2.2 Modul de lucru

Variantele experimentelor de utilizare a energiei solare, respectiv a energie electrice în vederea studiului influenței parametrilor tehnologici ai diferitelor tratamente termice asupra durității, sunt prezentate în tabelul 2.3.

Tabelul 2.3 Variante experimentelor de utilizare a energiei solare și electrice în studiul durității aliajelor speciale

Varianta experimentală	Material	Energia utilizată		Tratamentul termic aplicat
		Solară	Electrică	
V1	Oțel inoxidabil EN 1.4848	X	X	Călire de punere în soluție
V2		X	X	Călire +Revenire înaltă
V3	Fgn Ni-Cu-Cr EN-GJS-450-10	X	-	Călire+Revenire în domeniul bainitic
V4	Fgn Ni-Cr EN-GJS-450-10	-	X	Călire izotermă
V5		-	X	Călire "Dual-Phase"

2.2.2.1 *Tratamente termice efectuate cu ajutorul energiei solare și a energiei electrice aplicate oțelului inoxidabil EN 1.4848*

Cele 2 variante experimentale (V1 și V2) specifice oțelului inoxidabil EN 1.4848 (vezi tabelul 3.3), realizate în cuptorul solar cât și în cuptorul electric, au avut aceeași parametrii tehnologici de încălzire. Variantele realizate au fost: V1- călire de punere în soluție și V2- călire urmată de revenire înaltă. Ciclograma specifică tratamentului termic de călire de punere în soluție este prezentată în figura 2.12.

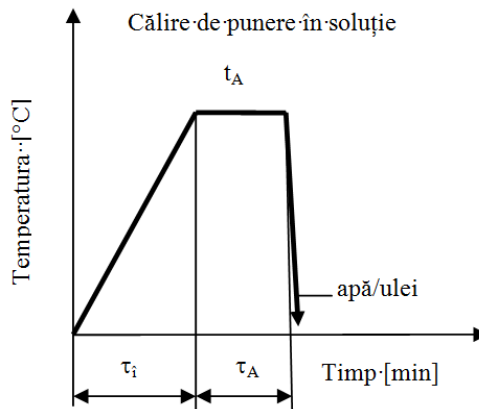


Fig. 2.12 Varianta experimentală V1 (călire de punere în soluție): V1a-călire în apă; V1b-călire în ulei

Scopul realizării acestui tip de tratament termic conform (V1) a fost eliminarea principalului dezavantaj al utilizării oțelului EN 1.4848 [93]: fisurarea și coroziunea intercrystalină în intervalul de temperaturi: 500 - 800°C, datorită precipitării carburilor de tipul $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Tehnologic, eliminarea acestui inconvenient, s-a realizat atât prin introducerea suplimentară în compoziția chimică a oțelului a unui element stabilizator (Mo) dar mai ales prin

efectuarea tratamentului termic de călire de punere în soluție de la o temperatură de 1000 - 1100°C [21, 89, 93, 127], având ca efect principal, dizolvarea carburilor. La final, în urma aplicării tratamentului termic, structura obținută a fost austenitică suprasaturată în carbon, în afara de echilibru, cu valori ale duriității specifice acestei structuri, având implicit o rezistență la coroziune, proprietăți de tenacitate și rezistență, remarcabile [21].

Epruvetele ($\varnothing 10 \times 3$ mm) au fost încălzite timp, $\tau_i = 20$ minute, până s-a ajuns la temperatura de austenitizare, $t_A = 1050^\circ\text{C}$, s-au menținut la această temperatură un timp, $\tau_A = 7$ minute, după care au fost răcite brusc, prin agitare în apă (varianta V1a) sau în ulei (varianta V1b). Temperatura de punere în soluție a fost aleasă astfel încât să fie situată cel mai frecvent deasupra temperaturii care marchează dizolvarea fazelor intermetalice [89, 93, 127].

Ciclograma specifică tratamentului termic de călire urmată de revenire înaltă este prezentată în figura 2.13.

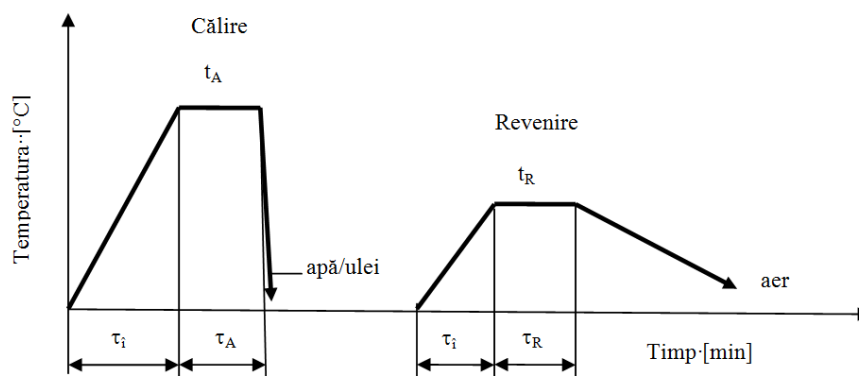


Fig. 2.13 Tratamentul termic de călire + revenire înaltă, varianta V2: V2a-călire în apă; V2b-călire în ulei

Varianta 2 de tratamente termic (călire + revenire înaltă) a avut drept scop obținerea la final a unei structuri de austenită ($\text{Fe}\gamma$) și ferita δ (ca și la varianta V1) cât și a unor precipitări intermetalice în zona limitelor de grăunte și în austenită. Aceste carburi (K) care pot fi de tipul $(\text{Cr,Fe,Mo})_{23}\text{C}_6$, $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ sau $(\text{Fe,Cr}_4)\text{C}$, duc la obținerea unor valori superioare ale microduriității [64, 89, 93, 127].

Epruvetele ($\varnothing 10 \times 3$ mm) au fost încălzite în cuptorul solar timp, $\tau_i = 15$ minute, până s-a ajuns la temperatura de austenitizare, $t_A = 900^\circ\text{C}$, s-au menținut la această temperatură un timp, $\tau_A = 7$ minute, după care au fost răcite brusc, prin agitare în apă (varianta 2a) sau în ulei (varianta 2b). Timpul de încălzire în cuptorul solar până la temperatura de revenire, $\tau_i = 12$ minute; iar revenirea înaltă a epruvetelor s-a realizat la temperatura $t_R = 625^\circ\text{C}$, cu un timp de menținere la revenire $\tau_R = 7$ minute și cu o răcire ulterioară în aer.

În cadrul utilizării energiei solare, pentru tratamente termice efectuate, încălzirea s-a realizat cu o viteză care a variat între 0,5 și 1,5 °C/s iar valoarea radiației solare (Direct Normal Irradiance-DNI) a variat între 850 și 925 W/m² (în conformitate cu regulamentul de desfășurare a experimentelor. Valoarea minima recomandată pentru realizarea unei încălziri în bune condiții a probelor în instalația utilizată, este o radiație solară-DNI incidentă de minim 800 W/m²).

Încălzirea probelor s-a realizat cu spotul de lumină concentrat și poziționat pe suprafața superioară a acestora. Diametrul spotului în instalația solară a fost de 15 mm ceea ce corespunde unei suprafețe de iradiere $\pi D^2/4 = 176,6 \text{ mm}^2$.

Suprafața superioară a epruvetelor cu dimensiunile ($\varnothing 10 \times 3 \text{ mm}$) plasată sub spot a fost de (78.5 mm²). Deoarece diametrul epruvetelor a fost mai mic decât al spotului, acestea au fost încălzite de către spotul razelor solare concentrate pe toată suprafața superioară. Ca urmare, experimentele s-au desfășurat în condiții tehnice optime (randament mare al încălzirii).

Așa cum s-a menționat anterior, măsurarea experimentală a temperaturii atât în cuptorul solar cât și în cuptorul electric, s-a realizat cu ajutorul unui termocuplu de tip "k" poziționat în contact cu suprafața inferioară a epruvetelor. Temperatura a fost măsurată de acesta prin contact cu epruveta, iar achiziția datelor s-a realizat cu un sistem Data Logger EL-GFX-DTC with Graphic Screen (vezi figura 2.10). În figura 2.14 este prezentată modul de desfășurare a experimentelor specifice celor 2 variante experimentale (V1 și V2) în cuptorul solar din cadrul Institutului PROMES-CNRS, Font-Romeu-Odeillo (Franța).

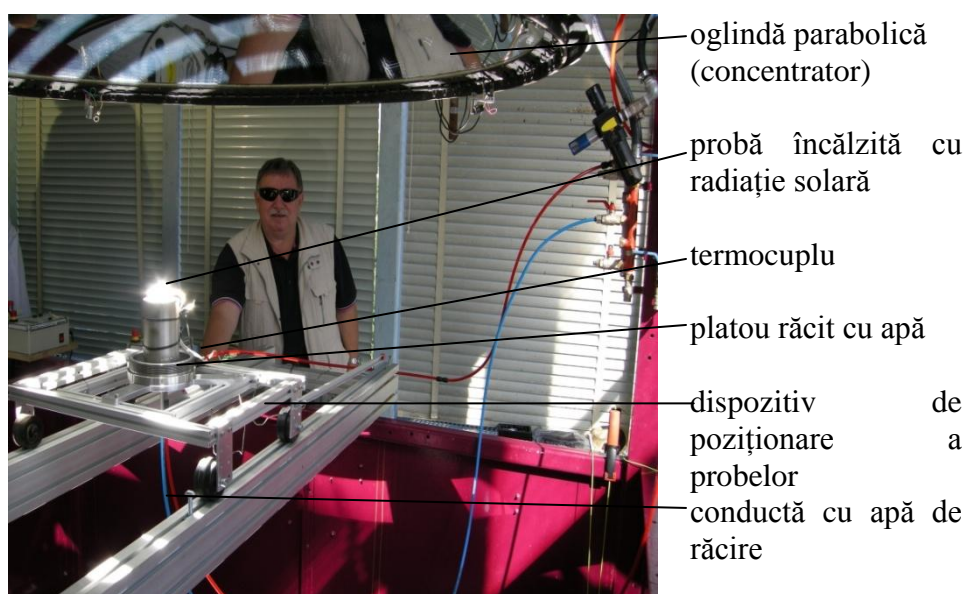


Fig. 2.14 Desfășurarea experimentelor cu energie solară în cadrul Institutului PROMES-CNRS, Font-Romeu-Odeillo (Franța)

În cazul tratamentelor termice realizate cu ajutorul energiei electrice, s-a utilizat cuptorul cu rezistoare electrice tip "Nabertherm", aflat în dotarea Centrului de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite" la Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov.

2.2.2.2 *Tratamente termice efectuate cu ajutorul energiei solare aplicate fontei cu grafit nodular EN-GJS-450-10, aliată cu Ni-Cu-Cr varianta experimentală V3*

Varianta experimentală (V3): călire urmată de revenire în domeniul bainitic aplicată fontei cu grafit nodular aliată cu Ni-Cu-Cr, marca EN-GJS-450-10 (vezi tabelul 2.1), s-a realizat de asemenea în cuptorul solar (experimente desfășurate în cadrul Institutului PROMES-CNRS, Font-Romeu-Odeillo, Franța). Acest tratament face parte din tratamentele termice de îmbunătățire a caracteristicilor de rezistență a fontelor, fiind similar pieselor de oțel.

În figura 2.15 se prezintă varianta de tratament termic de călire urmată de revenire în domeniul bainitic.

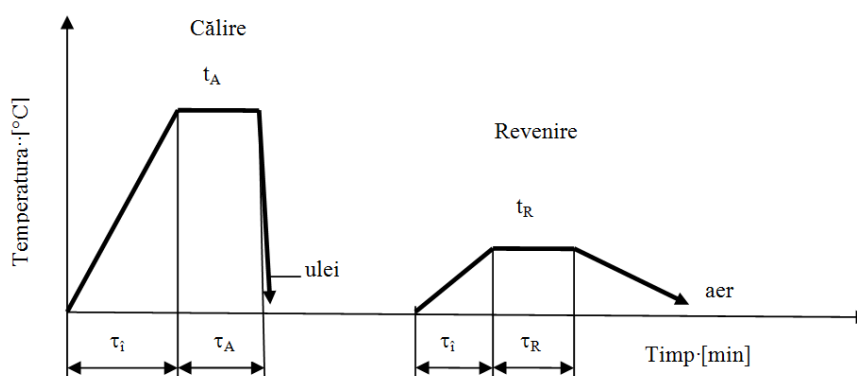


Fig. 2.15 Tratamentul termic al Fgn EN-GJS-450-10: călire urmată de revenire în domeniul bainitic (varianta V3)

Scopul realizării variantei V3 de tratament termic în cuptorul solar, a fost obținerea în final a unei structuri de bainită (inferioară și superioară), alături de martensită și austenită reziduală, care să favorizeze obținerea unor valori superioare ale durității (în special după efectuarea revenirii la temperaturi mai scăzute, specifice obținerii bainitei inferioare și a martensitei de revenire). Se remarcă faptul că după austenitizare și răcire bruscă în ulei, structura alcătuită din martensită, austenită reziduală (A_{rez}) și carburi, se supune ulterior revenirii la temperaturi în domeniul bainitic (235 - 450°C) obținându-se o structură alcătuită din bainită inferioară, martensită de revenire și austenită reziduală (în cazul menținerilor la revenire în

intervalul de temperaturi: 235-325°C) respectiv bainită superioară și austenită reziduală (în cazul menținerilor la revenire în intervalul de temperaturi: 375-450°C).

În cazul acestor cercetări experimentale (corespunzător variantei V3), epruvetele cu dimensiunea ($\varnothing 10 \times 3$ mm) au fost încălzite în cuptorul solar, parametri tehnologici ai acestei variante (V3) au fost:

- timpul de încălzire în cuptorul solar până la temperatura de austenitizare, $\tau_i = 15$ minute;
- temperatura de austenitizare la călirea clasică izotermă: $t_A = 900$ [°C], loturile A și B;
- timpul de menținere la temperatura de austenitizare, $\tau_A = 7$ [min], pentru ambele loturi;
- călirea s-a realizat în ulei;
- timpul de încălzire în cuptorul solar până la temperatura de revenire, $\tau_i = 6$ minute (lotul A) și $\tau_i = 8$ minute (lotul B);
- temperatura de revenire, $t_R = 300^\circ\text{C}$ (lotul A) și 400°C (lotul B);
- timpul de menținere la revenire, $t_R = 7$ [min], pentru ambele;
- răcirea după revenire s-a realizat în aer.

2.2.2.3 Tratamente termice efectuate cu ajutorul energiei electrice solare aplicate fontei cu grafit nodular EN-GJS-450-10 aliată cu Ni-Cr varianta experimentală V4 și V5

În cazul variantelor experimentale V4 (varianta 4) și V5 (varianta 5), s-a folosit ca material fonta cu grafit nodular (Fgn), aliată cu Ni-Cr (vezi tabelul 2.1). Ciclograma specifică celor două variante experimentale (V4) și (V5) de tratament termic, este prezentată în figura 2.16

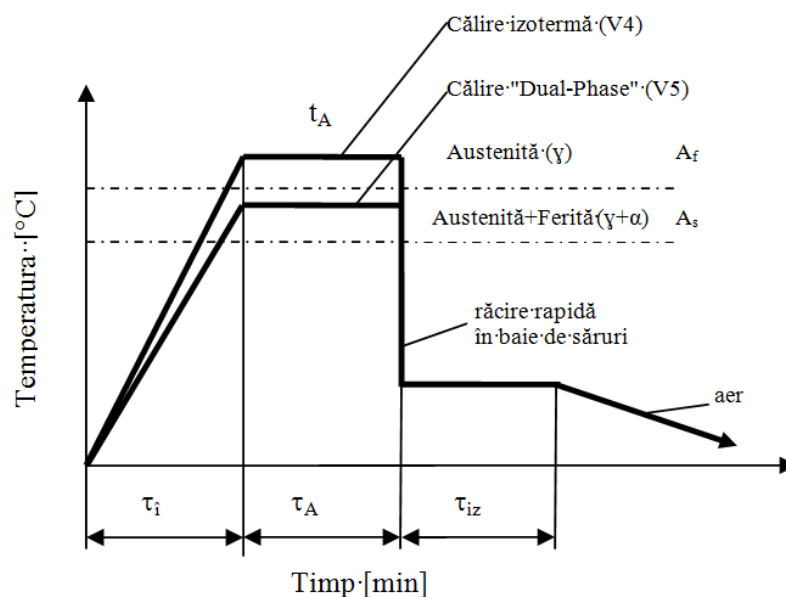


Fig. 2.16 Tratamente termice aplicate Fgn: V4- clasic de călire izotermă;
V5- călire "Dual-Phase"

Variantele de răcire și menținere izotermă aplicate în acest caz au fost specifice domeniului de formare al bainitei și anume: "călirea clasică izotermă"(Varianta 4), respectiv călirea "Dual-Phase"(Varianta 5), încălzirea a fost realizată cu ajutorul energiei electrice în cuptorul cu rezistoare electrice tip "UTTIS", aflat în dotarea Departamentului Știința Materialelor din Universitatea Transilvania din Brașov.

Varianta V4 "Călirea clasică izotermă"

Acesta variantă face parte din tratamentele termice de îmbunătățire a caracteristicilor de rezistență a fontelor, fiind similară tratamentelor aplicate pieselor de oțel, dar prezentând o serie de particularități. Se remarcă următoarele diferențe metalurgice importante [80]:

- în cazul oțelului, carbonul este principalul factor care stă la baza stabilirii regimului termic, în timp ce la fontă, siliciul joacă acest rol;
- conținuturile mari de C și Si în masa metalică alături de valorile relativ ridicate ale conținutului de Mn ca și prezența unor elemente însoțitoare existente în fontele uzuale, determină o călibilitate superioară față de oțel;
- complexitatea constructivă caracteristică pieselor din fontă ridică probleme referitor la stabilirea vitezei de încălzire și a duratei lor de menținere, din aceleași motive, apar probleme în ceea ce privește răcirea pieselor de la temperatura de austenitizare până la cea de transformare izotermă;
- la încălzirea în cuptoarele electrice a pieselor din fontă se pot utiliza atmosfere protectoare, în timp ce în cuptoarele cu flacără decarburarea și oxidarea decurg cu viteză ridicată în lipsa atmosferei de protecție.

Tratamentul clasic de călire izotermă este aplicat Fgn pentru obținerea structurii bainitice în intervalul de temperaturi caracteristic (235...450° C) [74]. În cadrul celor două variante de tratamente termic prezentate, semnificația punctelor de transformare caracteristice este: As, Af - punctul de început, respectiv de sfârșit al formării austenitei.

Tratamentul termic aplicat a cuprins următoarele etape [74]:

- I. Încălzirea pieselor până la temperatura de austenitizare și menținerea la această temperatură.
- II. Răcirea cu o asemenea viteză (5 - 15°C/sec) astfel încât să se asigure stabilitatea austenitei până la temperatura de transformare izotermă (preîntâmpinarea formării perlitei).
- III. Menținerea la temperatura de transformare izotermă a austenitei în domeniul bainitic.
- IV. Răcirea în aer până la temperatura ambiantă.

Varianta V5 - Tratamentul de călire "Dual-Phase"

Această variantă presupune utilizarea unui anumit tip de Fgn caracterizată printr-un interval de temperaturi As-Af mai larg și situat pe scara temperaturii la valori mai scăzute [80] aspect prezentat în figura 2.16.

Pentru obținerea structurii "Dual-Phase", încălzirea se realizează în domeniul As-Af unde, alături de austenită este prezentă și ferita. Proporția de ferită este determinată direct de temperatura la care are loc încălzirea. La temperaturi mai ridicate în domeniul As-Af, proporția de ferită este mai mică. În final, acest amestec de faze format din ferită și bainită în care ferita ce nu a suferit transformare prezintă o foarte bună tenacitate, face ca proprietățile finale ale piesei să fie caracterizate printr-o foarte bună rezistență la șoc, chiar în condiții de temperaturi scăzute.

Parametrii specifici celor două variante de tratament termic (V4) și (V5) conform datelor din literatură [37] sunt:

- temperatura de austenitizare la călirea clasică izotermă (V4): $t_A = 900$ [°C] pentru loturile A,B, C;
- temperatura de austenitizare la călirea "Dual-Phase" (V5): $t_A = 830$ [°C] pentru loturile A₁, B₁, C₁;
- timpul de menținere la temperatura de austenitizare, $\tau_A = 60$ [min], pentru toate loturile;
- temperatura de menținere izotermă, $t_{iz} = 300, 350$ și 400 [°C], pentru toate loturile;
- timpul de menținere la nivel izotermi, $\tau_{iz} = 10; 20; 30; 40; 50$ și 60 [min], pentru toate loturile;

Menținerea în treaptă izotermă pentru toate cele 6 loturi experimentale s-a realizat în baie de săruri (55% KNO₃ + 45% NaNO₃), iar răcirea ulterioară s-a realizat în aer.

2.2.3 Rezultate experimentale

2.2.3.1 Rezultatele privind microduratea obținută la piesele tratate termic în cuptorul solar (variante VI și V2)

Rezultatele microdurateții [HV₁₀₀] obținute în cele 8 epruvete experimentale, tratate termic în cuptorul solar sunt prezentate în figurile 2.17 și 2.18. Pe fiecare epruvetă s-au efectuat un număr de 5 determinări paralele ale microdurateții, cu scopul de a verifica corectitudinea efectuării experimentelor specifice fiecărei variante tehnologice în parte.

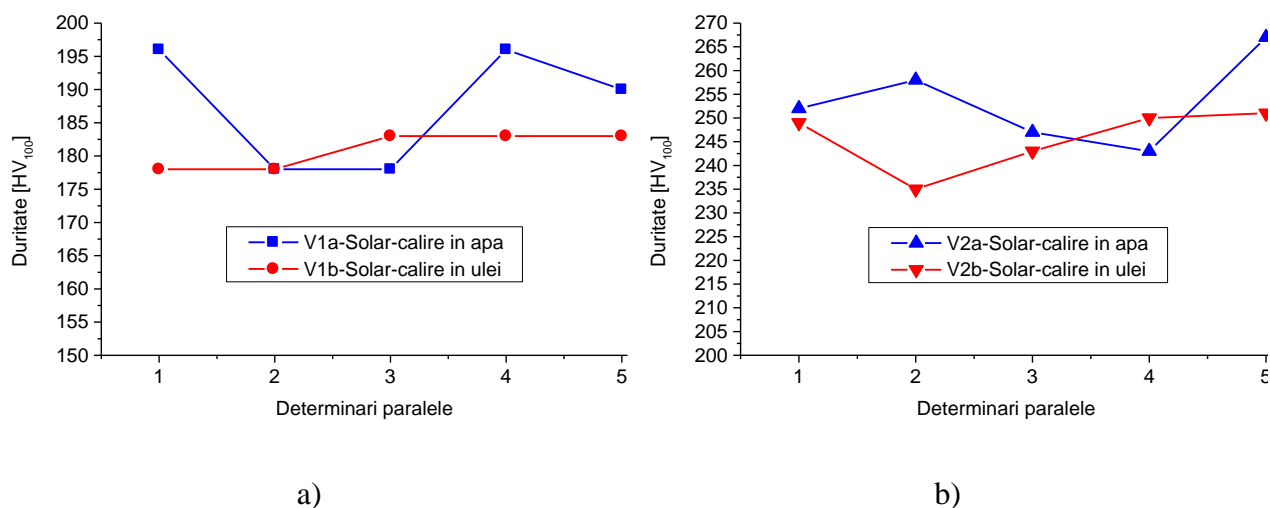


Fig. 2.17 Influența vitezei de răcire asupra durității oțelului, tratament termic în cuptor solar: a) V1- călire la 1050°C; b) V2- călire la 900°C + revenire la 625°C

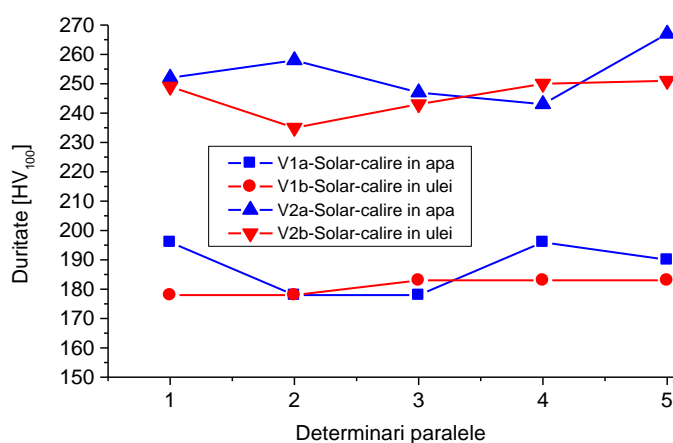


Fig. 2.18 Influența vitezei de răcire asupra durității oțelului, tratament termic în cuptor solar: V1-călire la 1050°C; V2- călire la 900°C +revenire la 625°C

Din analiza datelor experimentale obținute prin efectuarea tratamentelor termice în cuptorul solar (prezentate în figurile 2.16 și 2.17) se observă următoarele:

- microduritatea crește în cazul variantei V2 de tratament termic (călire la 900°C + revenire la 625°C) comparativ cu varianta V1 de călire (călire la 1050°C). Acest fapt se explică prin aceea că, în cazul probelor obținute prin varianta V2 (călire + revenire înaltă), structura conține pe lângă austenită (Fey), ferita δ (ca și la varianta V1) și frecvente precipitări intermetalice în zona limitelor de grăunte cât și în austenită. Aceste carburi (K) care pot fi de tipul $(Cr, Fe, Mo)_{23}C_6$, $(Cr, Fe)_{23}C_6$ sau $(Fe, Cr_4)C$, duc la obținerea unor valori superioare ale microdurității [64, 89, 93];

- în cazul în care s-a utilizat la călire ca mediu de răcire mai activ (apa în comparație cu uleiul) acesta duce la o finisare a structurii (grăunți cu dimensiuni mai mici) ceea ce induce

obținerea unor valori superioare ale proprietăților, în cazul nostru duce la obținerea unor valori superioare ale microdurității.

2.2.3.2 Rezultatele privind microduratea obținută la piesele tratate termic în cuptorul electric (variante V1 și V2)

Rezultatele microdurității obținute la probele din oțel inoxidabil EN 1.4848, tratate termic în cuptorul electric sunt prezentate în figurile 2.19 și 2.20.

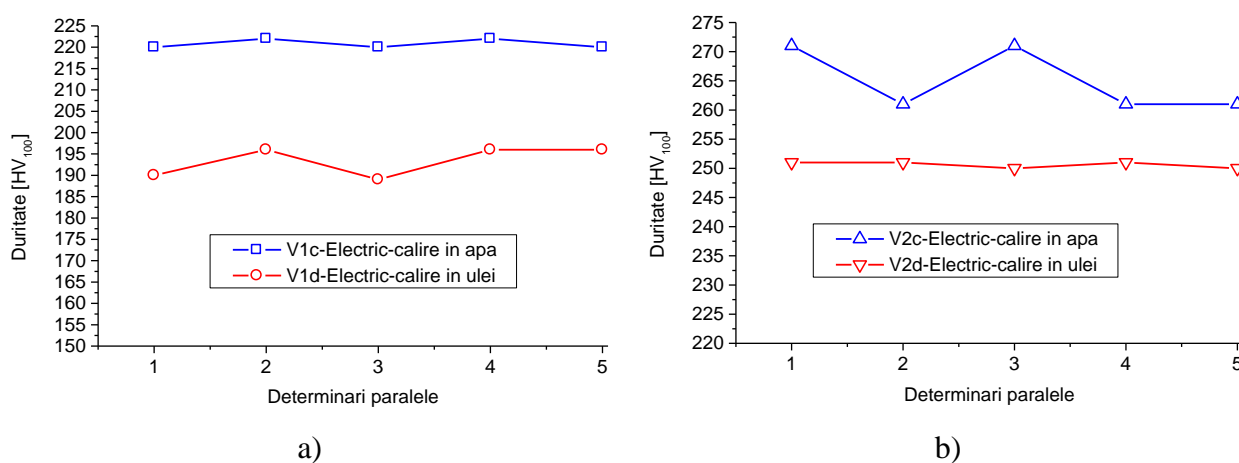


Fig. 2.19 Influența vitezei de răcire asupra durității oțelului, tratament termic în cuptor electric:

a) V1- călire la 1050°C; b) V2- călire la 900°C +revenire la 625°C

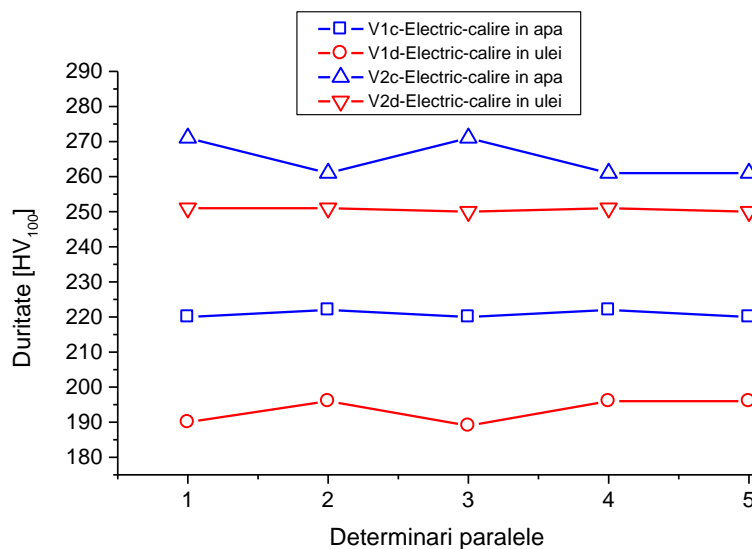


Fig.2.20 Influența vitezei de răcire asupra durității oțelului, tratament termic în cuptor electric:

V1- călire la 1050°C; V2- călire la 900°C +revenire la 625°C

Din analiza datelor experimentale obținute prin efectuarea tratamentelor termice în cuptorul solar (prezentate în figurile 2.19 și 2.20) se observă aceleași concluzii specifice prezentate la varianta V1 de tratament termic în cuptorul solar.

2.2.3.3 Analiza comparativă a valorilor durtății oțelului EN 1.4848 tratat termic în cuptorul solar respectiv în cuptorul electric (variante V1 și V2)

Analizând valorile durtății prezentate anterior specifice derulării tratamentelor termice în cele două tipuri de agregate, în figura 2.21 sunt comparate toate valorile specifice variantei V1 de călire (călire la 1050°C). Călirea s-a realizat în cuptorul solar pentru probele V1a (mediu de răcire apa) și V1b (mediul de răcire uleiul) respectiv călirea s-a realizat în cuptor electric pentru probele V1c (mediu de răcire apa) și V1d (mediul de răcire uleiul).

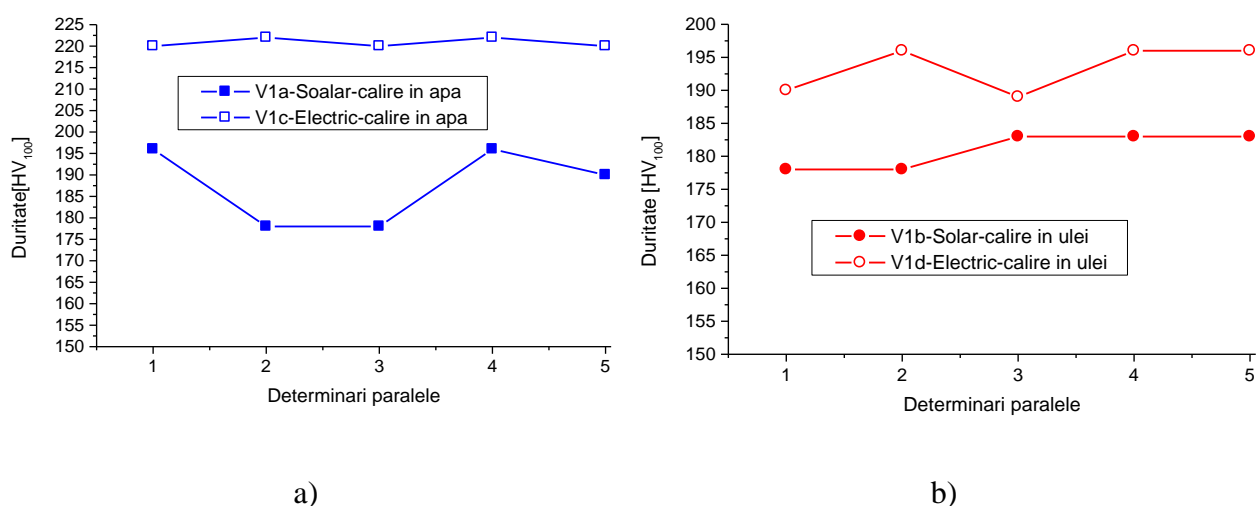


Fig. 2.21 Comparație privind influența energiei utilizate la tratamentul termic asupra durtății oțelului, varianta V1 de tratament termic (încălzire la 1050°C): a) călire în apă; b) călire în ulei

În figura 2.22 sunt comparate toate valorile specifice variantei 2 de călire (V2- încălzire la 900°C +revenire la 625°C cu răcire ulterioară în aer).

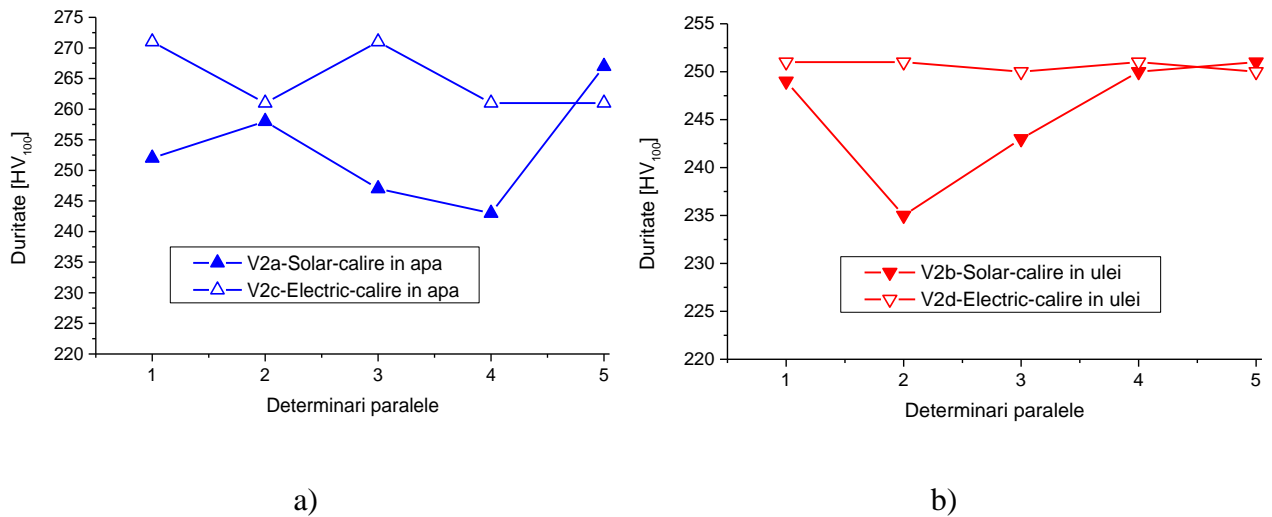


Fig. 2.22 Comparație privind influența energiei utilizate și a variantei de tratament termic la călire în ulei (V2- încălzire la 900°C +revenire la 625°C)

În figura 2.23 este prezentată o comparație privind influența energiei utilizate, a variantei de tratament termic la călirea și a mediului de răcire (apa) asupra durtății oțelului (V1 de tratament termic -încălzire la 1050°C; V2- încălzire la 900°C +revenire la 625°C).

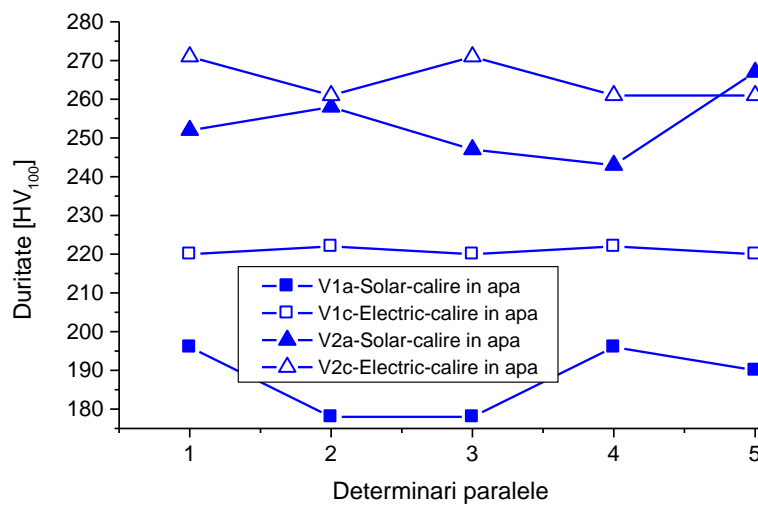


Fig. 2.23 Comparație privind influența energiei utilizate, a variantei de tratament termic la călire și a mediului de răcire (apa) asupra durtății oțelului (V1 - încălzire la 1050°C; V2 - încălzire la 900°C +revenire la 625°C)

În figura 2.24 este prezentată o comparație privind influența energiei utilizate, a variantei de tratament termic la călirea și a mediului de răcire (uleiul) asupra durtății oțelului (V1 de tratament termic încălzire la 1050°C; V2- încălzire la 900°C +revenire la 625°C).

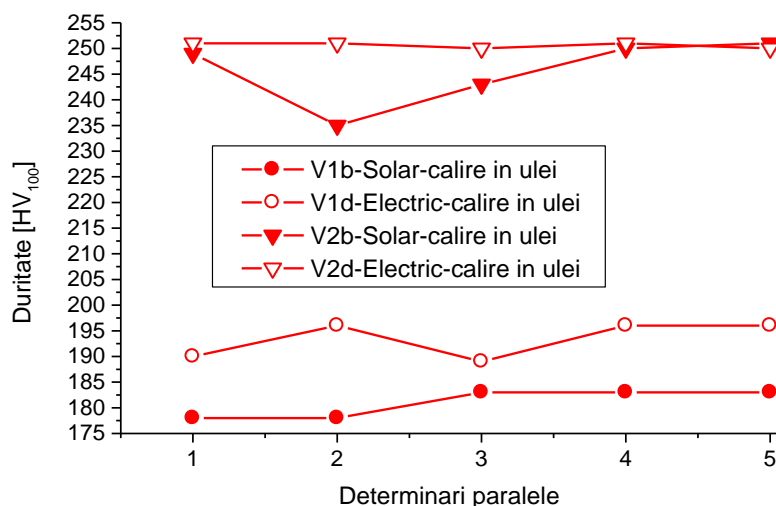


Fig. 2.24 Comparație privind influența energiei utilizate, a variantei de tratament termic la călirea și a mediului de răcire (uleiul) asupra durității oțelului.
(V1 -încălzire la 1050°C; V2- încălzire la 900°C +revenire la 625°C)

Analizând rezultatele durității pentru toate cele 5 determinări paralele specifice fiecărei probe în parte, prezentate în figurile 2.20 - 2.23, se pot observa următoarele concluzii generale:

- pentru toate probele, valorile durității sunt sensibil mai mari atunci când tratamentul termic s-a realizat în cuptorul electric.
- în cazul tratamentului termic în cuptorul electric, rezultatele (microduritatea) sunt mai uniforme pe suprafața epruvetelor. Acest fapt poate fi explicat prin constanța gradientului de încălzire și menținere a temperaturii pe parcursul desfășurării tratamentului termic, știut fiind faptul că un inconvenient în realizarea tratamentelor termice cu ajutorul energiei solare este păstrarea constanței gradientului de încălzire (DNI poate varia odată cu apariția norilor).

2.2.3.4 Analiza valorilor durității fontei EN-GSJ-450-10 aliată cu Ni-Cu-Cr tratată termic în cuptorul solar (varianta V3)

În cazul în care se realizează varianta de tratament termic de călire urmată de revenire în domeniul bainitic, în cadrul cercetărilor experimentale s-a utilizat Fgn marca EN-GJS-450-10 aliată cu Ni-Cu-Cr. Pentru desfășurarea experimentelor, din această fontă, s-au prelucrat un număr de 4 epruvete, cu o formă cilindrică, cu diametrul de Ø10 mm și grosimea de 5 mm.

Tratamentul termic efectuat cu ajutorul energiei solare s-a realizat în același cuptor solar cu o putere de aproximativ 1 kW, cu ax vertical (Medium Size Solar Furnaces) din cadrul Centrului Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS - PROMES), Font-Romeu-Odeillo (Franța).

În figura 2.25 este prezentată influența tratamentului termice de călire urmată de revenire (variante -V3 de tratament termic) asupra valorilor durității.

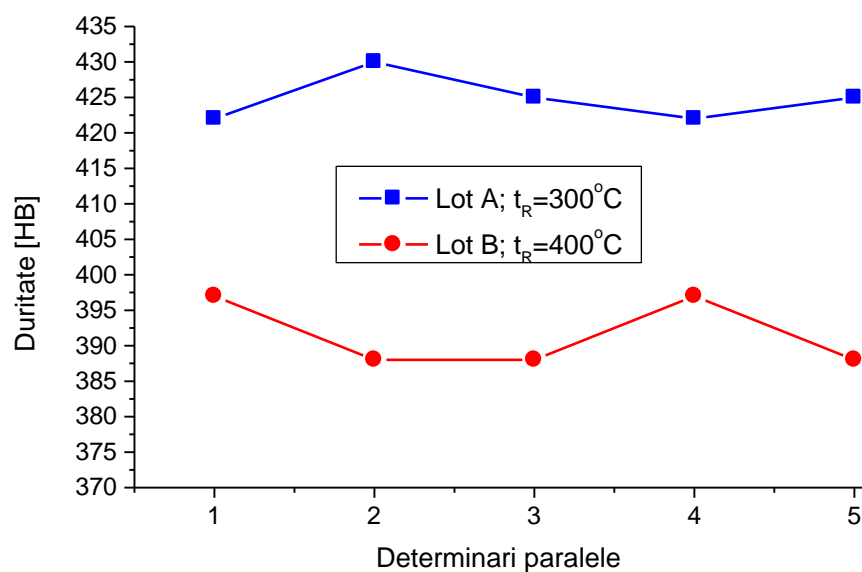


Fig. 2.25 Influența tratamentelor termice de călire urmată de revenire asupra valorilor durității (variante V3 de tratament termic)

Analizând valorile durității prezentate în figura 2.25, se pot concluziona următoarele:

a) în cadrul cercetărilor s-au utilizat temperaturi diferite de menținere la revenire și anume $t_R = 300^\circ\text{C}$ (Lot A) caracteristic formării structurii de ferită bainitică inferioară, respectiv 400°C (Lot B), caracteristic formării structurii de ferită bainitică superioară;

b) în cazul probei menținute la temperatura de revenire, $t_R = 300^\circ\text{C}$, structura este constituită din ferită bainitică inferioară, austenită reziduală și martensită de revenire, constituenți ce determină valori mari pentru duritate,

c) în cazul pieselor menținute la temperatura de revenire, $t_R = 400^\circ\text{C}$, valorile durității sunt mai scăzute decât în cazul lotului A, acesta explicându-se prin faptul că în structură apare ferită bainitică superioară, austenita îmbogățită în carbon și dispare martensita, ceea ce favorizează obținerea acestor valori ale durității.

d) se remarcă faptul că, răcirea în ulei la tratamentul de călire, specific fontelor, conduce în final (după tratamentul de revenire) la o omogenitate a valorilor durității, acestea fiind relativ apropiate pentru toate cele 5 determinări paralele.

2.2.3.5 Analiza valorilor durtății fontei cu grafit nodular EN-GSJ-450-10 aliată cu Ni-Cr tratată termic în cuptorul electric (variante V4 și V5)

Pentru desfășurarea experimentelor, din această fontă EN-GSJ-450-10 aliată cu Ni-Cr, s-au prelucrat un număr de 16 epruvete, cu o formă cilindrică, cu diametrul de Ø10 mm și grosimea de 10 mm. După efectuarea celor 2 variante de tratament termic prezentate anterior (paragraful 2.2.2.1), experimente realizate în cuptorul cu rezistoare electrice, s-au determinat valorile durtății [HB]. S-a modificat temperatura treptei izoterme și durata de menținere în treaptă izotermă.

În figura 2.26 este prezentată influența parametrilor tratamentului termic de călire izotermă (variante V4) asupra valorilor durtății [37].

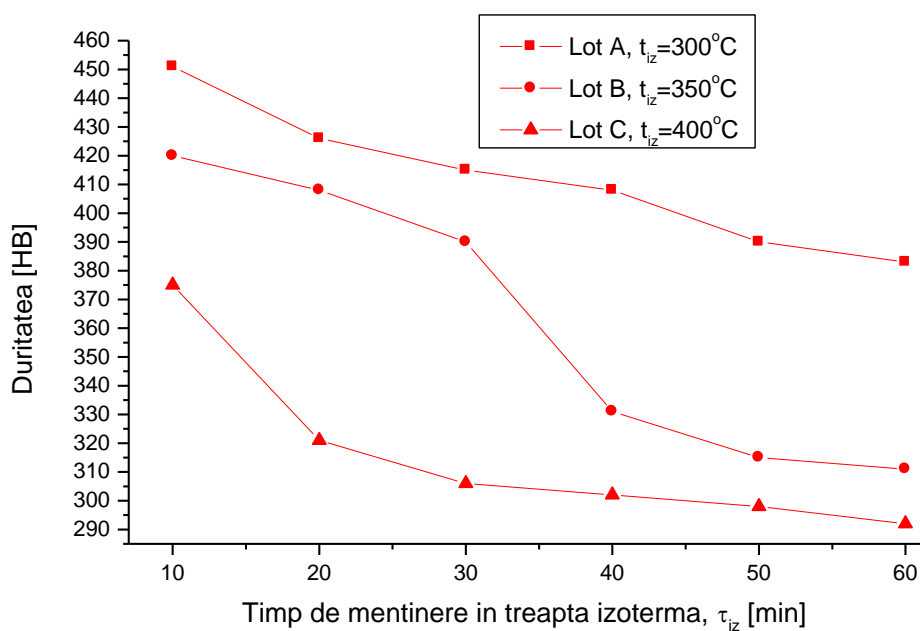


Fig. 2.26 Influența parametrilor tratamentului termic de călire izotermă (V4) asupra durtății [37]

În figura 2.27 este prezentată influența aceluiași parametrii tehnologici ai tratamentului termic de călire "Dual-Phase"(variante V5), asupra valorilor durtății.

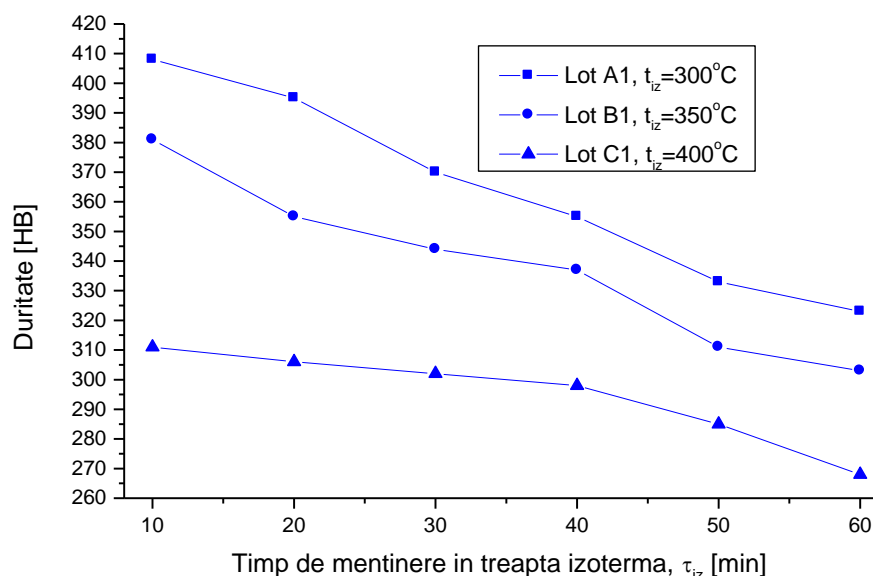


Fig. 2.27 Influența parametrilor tratamentului termic de călire "Dual-Phase" (V5) asupra durității [37]

În figura 2.28 este prezentată comparativ în același grafic, influența celor două variante de tratament termic asupra valorilor durității.

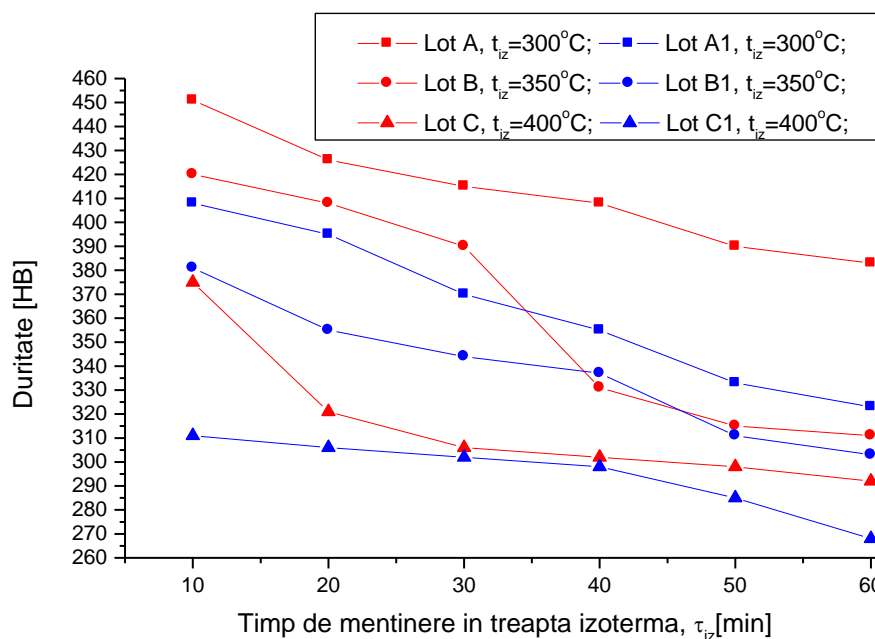


Fig. 2.28 Influența parametrilor tratamentelor termice de călire izotermă (Lot A, B, C, varianta V4) și călire "Dual-Phase" (Lot A1, B1, C1, varianta V5) asupra durității [37]

Analizând valorile durității prezentate în figurile 2.26 - 2.28, se pot concluziona următoarele:

a) în cadrul cercetărilor s-au utilizat temperaturi diferite de menținere la austenitizare și anume $t_A = 900^{\circ}\text{C}$, pentru tratamentul clasic de călire izotermă (lot A, B și C) și $t_A = 830^{\circ}\text{C}$,

pentru călirea bainitică de obținerea structurii "Dual-Phase" (lot A1, B1 și C1), variantă a tratamentului clasic de călire izotermă;

b) în timp ce la călirea clasică se realizează o austenitizare completă a masei metalice de bază, la călirea "Dual-Phase", se realizează numai o austenitizare parțială a masei metalice de bază;

În ceea ce privește tratamentul clasic de călire izotermă (lot A, B și C) se pot face următoarele observații:

- în cazul pieselor menținute la $t_{iz} = 300^{\circ} \text{C}$, structura este constituită din ferită bainitică inferioară, austenită reziduală și martensită, constituenți ce determină valori mari pentru duritate, această structură suferind modificări odată cu creșterea temperaturii și timpului de menținere în treaptă izotermă;

- se observă de asemenea și o caracteristică generală pentru toate loturile studiate și anume faptul că duratele mici de menținere la transformarea izotermă ($\tau_{iz} = 10, 20, 30 \text{ min.}$), determină valori ridicate ale durității. Aceasta se explică prin faptul că odată cu scurtarea duratei de menținere în treapta izotermă, urmată de o răcire în aer până la temperatura ambiantă, în structură crește proporția de martensită (apărută prin transformarea la răcire a austenitei subrăcite), constituent ce determină valori mari ale durității;

- în cazul pieselor menținute la $t_{iz} = 400^{\circ} \text{C}$, apare ferita bainitică superioară, austenita îmbogățită în carbon și dispare martensita ceea ce conduce la scăderea durității.

În ceea ce privește tratamentul clasic de călire "Dual-Phase" (lot A1, B1 și C1) se pot face următoarele observații:

- toate observațiile prezentate în cazul călirii izoterme sunt valabile și în cazul acestei variante de călire, cu mențiunea că valorile proprietăților mecanice obținute în acest tip de tratament sunt sensibil modificate;

- comparând valorile durității pentru cele două variante de tratament termic se remarcă faptul că prin metoda clasică de călire izotermă, pentru aceeași temperatură și aceeași durată de menținere se obțin valori superioare pentru duritate în comparație cu cele obținute în varianta de călire prin tratamentul "Dual - Phase" [37].

- structura obținută în urma tratamentului "Dual-Phase" este caracterizată prin procent superior de ferită aflată în structură alături de ferită bainitică. Acest amestec de faze în care ferita ce nu a suferit transformări prezintă valori mai scăzute ale durității. *Prin bainită înțelegem însă ca și în cazurile anterioare o structură formată din ferită bainitică și austenită îmbogățită.*

2.3 Cercetări privind comportamentul la temperaturi scăzute al aliajelor speciale tratate termic utilizând energia solară și electrică

În general, tuturor metalelor și aliajelor le scad caracteristicile atunci când sunt răcite la temperaturi scăzute (sub 0°C) deoarece devin fragile. Sunt și cazuri când anumite proprietăți (rezistența la deformare plastică, în unele cazuri duritatea și rezistența la oboseală) cresc odată cu scăderea temperaturii, acest fapt fiind explicat de transformările în stare solidă specifice și anume transformarea austenitei reziduale în martensită [74].

În studiul metalelor și aliajelor la temperaturi scăzute, o importanță deosebită o prezintă valoarea tenacității (ductilitatea) cât și tendința de rupere fragilă (sensibilitatea la efectul de creștătură), proprietăți care sunt sensibil micșorate. Criteriul cel mai uzual de apreciere a tenacității metalelor îl constituie rezultatele încercărilor de reziliență.

Comportarea la rupere a materialelor metalice la diferite temperaturi poate fi pusă în evidență prin încercarea la încovoiere prin șoc [2, 125], acesta fiind reglementată de standardul EN 10045-1:1990: Metallic materials - Charpy impact test - Part 1: Test method [109].

Din examinarea valorilor rezilienței obținute, se evidențiază direct caracterul comportării metalului în condiții de determinare a susceptibilității la rupere fragilă, reziliența reprezentând de fapt denumirea caracteristicii mecanice, definită prin raportul dintre energia consumată la rupere și secțiunea epruvetei în porțiunea încrestată (planul în care se execută lovirea). Prin această încercare se determină caracteristica mecanică numită Energia specifică de rupere, KV respectiv KU [2, 125]:

$$KV=Wr \text{ (pentru epruvete cu creștătura în formă de V),} \quad (2.3)$$

$$KU=Wr \text{ (pentru epruvete cu creștătura în formă de U),} \quad (2.4)$$

Reziliența exprimă rezultatul încercării la încovoiere prin șoc, notată KCV sau KCU (funcție de forma creștăturii epruvetei de încercare) [2, 125]:

$$KCV \text{ sau } KCU = Wr/S_o, \quad (2.5)$$

unde: S_o este aria secțiunii transversale a epruvetei.

Încercarea pe epruvete cu creștătură în V, reflectă capacitatea materialului de a se opune propagării fisurii, în timp ce încercarea pe epruvete cu creștătură în U, reflectă capacitatea materialului de a se opune inițierii și propagării fisurii [2, 125].

Această încercare este importantă pentru verificarea comportării ductile la rupere la temperatura de utilizare a materialelor, știind că domeniul uzual de exploatare al construcțiilor tehnice fiind cuprins între -100 și + 100 °C.

În cazul metalelor și aliajelor considerate mai fragile (fontele sau oțelurile de scule) se folosesc epruvete fără creștătură, în timp ce la restul oțelurilor, asemenea epruvete dau rezultate foarte disperse datorită variației mari a planului secțiunii de rupere [2, 125].

Pot fi considerate drept aplicații criogenice următoarele: agregate și mașini frigorifice, containerele de stocare, conductele de transport a gazelor lichefiate (oxigen, hidrogen, azot și heliu), construcțiile înalte, autovehicule, în domeniul programelor spațiale (nave, rachete, proiectilele și vehiculele spațiale), superconductori, în criobiologie, etc., toate aceste materiale fiind supuse exploatării la temperaturi scăzute (-10....-200°C).

Oțelurile rezistente (tenace) la temperaturi joase (criogenice), sunt cele destinate să lucreze la - 40...- 50°C și care la cele mai joase temperaturi de exploatare își păstrează o reziliență $KCV_{\min} = 35 \text{ J/cm}^2$ (sau energia de rupere $KV_{\min} = 27 \text{ J}$).

Oțelurile mediu și înalt aliate cu Ni, Cr-Ni, Cr-Mn sunt cele mai utilizate la temperaturi scăzute [80].

Cerințele oricărei aplicații criogenice sunt legate de o bună rezistență și reziliență, concomitent cu păstrarea unei plasticități acceptabile și de aceea oțelurile sunt aliate cu Ni își păstrează reziliența și ductilitatea în limite acceptabile la utilizarea la temperaturi scăzute.

Oțelurile care au o tenacitate foarte ridicată până la temperaturi apropiate de zero absolut (- 273°C) sunt oțeluri Cr - Ni (austenitice) cu 16 - 26 % Cr și 3,5 - 22 % Ni ($C \leq 0,1 \%$) [74]. Aceste oțeluri sunt folosite în stare de normalizare la 900°C, dar cel mai frecvent, în stare călită (de punere în soluție) de la 1050 - 1200°C și revenite [93].

Caracteristicile mecanice la temperaturi joase ale unor oțeluri Cr - Ni sunt prezentate în tabelul 2.4.

Studiind tabelul 2.4, se remarcă faptul că în timp ce rezistența oțelurilor crește cu scăderea temperaturii, reziliența se menține la valori foarte ridicate ($\geq 100 \text{ J/cm}^2$), chiar și la cele mai joase temperaturi. Caracteristicile de plasticitate sunt superioare oțelurilor aliate cu Ni, iar sudabilitatea este bună (prin procedee electrice) [93].

Tabelul 2.4 Caracteristicile mecanice la temperaturi joase ale oțelurilor Cr-Ni (austenitice) [19]

Marca	Temperatura [°C]	Caracteristica			
		R _{p0,2}	R _m	A	KCU
		[daN/mm ²]		[%]	[J/cm ²]
2 CrNi 185	20	19	55	50	200
	- 150	21	118	45	190
	- 196	23	236	40	150
	- 253	24	147	35	120
2 MoNiCr 175	20	19,5	54	50	200
	- 196	23,5	132	45	150
10TiNiCr 180	20	23,5	59	45	200
	- 150	35	118	40	150
	- 196	39	132	35	130
	- 253	42	147	30	100
10 TiMoNiCr 175	20	23,5	59	45	200
	- 196	49	142	40	150
12 CrNi 250	20	27,5	64	40	200
	- 196	49	103	40	150

Alte oțeluri aliate folosite la temperaturi scăzute sunt oțelurile Cr - Mn (austenitice de tip 15 - 15, 12 - 19, sau 3 - 20). Acestea sunt folosite în scopul economisirii oțelurilor Cr - Ni care sunt scumpe. Un oțel Cr - Mn (cu 15 % Mn; 12 % Cr; 1,15 % Mo; 0,6 % V și 0,25 % C) are spre exemplu KCU \approx 115 J/cm² la - 80°C, iar la - 180°C își păstrează (în stare turnată) încă KCU \approx 40 J/cm² [19].

În cazul fontelor cu grafit nodular cu structura bainitică (FgnB) obținută prin tratament termic de călire izotermă, acestea combină o serie de proprietăți mecanice la valori superioare în comparație cu Fgn clasice sau cu oțelurile forjate. Aceste fonte pot concura serios oțelurile utilizate în prezent în industria de automobile [74].

Lucrări anterioare [38-42], au arătat importanța proprietăților Fgn bainitice obținute prin tratamente termice și în special prin tratamentul termic de călire izotermă.

În general se acceptă ca domeniu de lucru pentru piesele din FgnB, intervalul de lucru între -50°C...+ 150°C, în care structura și caracteristicile nu înregistrează schimbări esențiale [74].

Comportarea bună la temperaturi scăzute este determinată de cantitatea de austenită reziduală (A_{rez}) care are o stabilitate bună până la - 50°C. Peste această temperatură, scade stabilitatea A_{rez} , ea transformându-se în martensită, ducând la creșterea durtății și la scăderea rezilienței. În general se remarcă faptul că stabilitatea FgnB este: bună, până la - 50°C; mulțumitoare, până la - 120°C și scăzută, până la - 196°C [74].

Unele utilizări la temperaturi joase își găsesc și fontele austenitice nodulare, cu 30 - 35% Ni (FagnNi 35 – SR ISO 2892:1994) și îndeosebi FagnNiMn 23.4 ale cărei caracteristici mecanice, inclusiv tenacitatea sunt corespunzătoare chiar și la - 196°C (KV = 31 J) [74].

2.3.1 Aparatura și materialele utilizate în cadrul cercetării

2.3.1.1 Aparatura utilizată în cadrul cercetării

Menținerea la temperaturi scăzute (în cadrul cercetărilor s-au efectuat mențineri la temperaturi cuprinse între: -20°..... -150°C) s-a realizat cu ajutorul a mai multor instalații:

a) Instalație Experimentală Criogenică" din cadrul Laboratorului Central de încercări mecanice al "S.C. ROMAN Autocamioane" S.A Brașov.

Această "Instalație Experimentală Criogenică" este alcătuită din următoarele părți principale:

- incinta propriu-zisă termostată izolată termic, în care se mențin probele la temperaturi scăzute într-un mediu de răcire (determinările s-au desfășurat până la temperaturi de - 70°C).
- sistemul de alimentare cu lichid de răcire și evacuare a lichidului sau vaporilor.
- mijloacele de măsurare a temperaturii (termometre sau termocuple).

Mediul de răcire este alcătuit din: agentul de răcire (cei mai utilizați agenți de răcire sunt: gheața, zăpada carbonică și azotul lichid; în instalația experimentală s-a utilizat zăpadă carbonică, CO₂ solid) și fluidul de răcire (alcool etilic, toluen, eter de petrol, propan, propilenă), în instalația experimentală s-a utilizat alcool etilic.

O condiție care trebuie respectată atunci când se utilizează medii de răcire este că agentul de răcire, zăpadă carbonică (CO₂ solid) răcește la început incinta, iar apoi se introduce fluidul de răcire (în cazul nostru alcoolul etilic) și astfel, oxigenul din spațiul de răcire este îndepărtat de către vaporii de CO₂, micșorându-se pericolul de aprindere (pe timpul derulării experimentelor, trebuie să se asigure o bună aerisire a zonei de încercare) [29, 111].

Incinta în care se răcesc probele trebuie să fie izolată și închisă cât mai bine, dar nu perfect ermetic, deoarece sublimarea gheții carbonice în dioxid de carbon se face cu expansiune volumică, ce ar putea conduce la presiuni foarte mari.

Temperatura scăzută și sublimarea directă (trecerea din stare solidă direct în stare gazoasă) a CO₂, face din zăpada carbonică un eficient lichid de răcire, fiind mai rece decât gheața și totodată nelăsând nici un reziduu [29, 111]. Zăpada carbonică (CO₂ solid), se obține

din dioxidul de carbon lichid care trece printr-o valvă criogenică către camera de expansiune unde în condiții normale de presiune se va produce o pulverizare rapidă a dioxidul de carbon lichid care trece din starea lichidă în cea de gaz, trecere care se va realiza cu o puternică scădere a temperaturii [29, 111].

Din cantitatea de dioxidul de carbon gaz aflat în instalația experimentală, aproximativ 45% îngheță, rezultând zăpada carbonică necesară experimentelor. Acesta asigură obținerea în incintă a unor temperaturi de până la $-78,5^{\circ}\text{C}$ [29, 111].

b) Încercările de reziliență (KCV) s-au realizat în cadrul *Laboratorului Central de încercări mecanice* al "S.C. ROMAN Autocamioane" S.A Brașov. Fiind capacitatea materialului de a absorbi energie în procesul de deformare elastică și plastică, reziliența reprezintă aprecierea susceptibilității la ruperea fragilă a materialului [93].

În cazul cercetărilor experimentale efectuate, s-au utilizat epruvete cu creștătura în V. Această încercare reflectă capacitatea materialului de a se opune propagării fisurii (încercarea pe epruvete cu creștătură în U, reflectă capacitatea materialului de a se opune inițierii și propagării fisurii). Instalația specifică acestei determinări a fost ciocanul pendul Charpy, determinările realizându-se în conformitate cu standardul EN 10045-1:1990 "*Metallic materials-Charpy impact test-Part 1: Test methods*" [108].

c) Echipament de analiză termică "DSC 200 F3 Maia" folosit la analiza calorimetrică diferențială (DSC) în vederea studierii transformărilor de fază în stare solidă la temperaturi scăzute (-150°C). Echipamentul se află în Centrul de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite din Institutul de Cercetare-Dezvoltare - ICDT al Universității Transilvania din Brașov.

În cadrul acestor teste, s-au studiat transformările de fază în stare solidă la diferite temperaturi (între $+20^{\circ}\text{C}$ și -150°C) pentru oțelul inoxidabil austenitic, pentru a estima modul de comportare a acestuia în condiții criogenice, cu aplicații în industria aeronautică, alimentară, chimică, transporturi, etc.

Prelucrarea curbelor DSC rezultate în cadrul experimentelor, s-a realizat cu ajutorul softului "NETZCH Proteus" cu care este dotat echipamentul [118].

2.3.1.2 Materiale utilizate în cadrul cercetării

Materialele utilizate în cadrul cercetării sunt prezentate în tabelul 2.5.

Tabelul 2.5 Materialele utilizate în cadrul cercetărilor experimentale [40]

Compoziția chimică [%]		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Co	W	Cu
Oțel inoxidabil*	Standard	0,3--0,5	1-2,5	≤2	≤0,04	≤0,030	-	24-27	11-14	≤0,5	-	-	-
	Experimente	0,40	1,37	0,90	0,03	0,035	-	24,10	21,90	0,72	6,15	1,80	0,30
Oțel C45**	Standard	0,43-0,50	≤0,4	0,5-0,8	≤0,045	≤0,045	-	-	≤0,4	-	-	-	-
	Experimente	0,47	0,2	0,69	0,021	0,021	-	-	-	-	-	-	-
Fgn***	Standard	3,25--3,7	2,4-3,0	0,1-0,3	≤0,08	≤0,02	0,04-0,07	-	-	-	-	-	-
	Experimente	3,63	2,68	0,45	0,012	0,0036	0,06	-	0,24	0,45	-	-	0,19

* conform EN 10295:2002 - Heat resistant steel castings [107, 125, 129]

** conform EN 10295:2002 - Heat resistant steel castings [107, 125, 127,130]

*** conform EN 1563:2011 - Founding-Spheroidal graphite cast iron [102, 107, 117, 125]

Specific oțelului inoxidabil EN 1.4848 cât și fontei cu grafit nodular Fgn EN-GSJ-450-10 (aliată cu Mo-Ni-Cu) este faptul că aceste aliaje utilizate în cadrul cercetărilor experimentale au fost aliate suplimentar cu elemente de aliere (față de compoziția standardizată) în vederea finisării structurii și obținerea unor valori superioare ale proprietăților de exploatare, conferind astfel cercetării o particularitate de noutate.

Oțelul inoxidabil En 1.4848 a fost elaborat în cadrul cadrul "S.C. UPRUC TPA" Srl Făgăraș. Oțelul EN 1.0503 (C45) cât și Fgn EN-GSJ-450-10 (aliată cu Mo-Ni-Cu), au fost elaborate în cadrul S.C. "Roman Autocamioane" S.A. Brașov.

2.3.2 Modul de lucru

Variantele experimentale de utilizare a energiei solare, respectiv a energie electrice folosite pentru studiul comportamentului la temperaturi scăzute al aliajelor speciale tratate termic, sunt prezentate în tabelul 2.6.

Tabelul 2.6 Variante experimentale de utilizare a energiei solare și electrice pentru studiul comportamentului la temperaturi scăzute al aliajelor speciale

Varianta experimentală	Material	Energia utilizată		Tratamentul termic aplicat
		Solară	Electrică	
V1	Oțel inoxidabil EN 1.4848	X	X	1. Călire de punere în soluție 2. Menținere criogenică (- 150°)
V2	Oțel C45 EN 1.0503	-	X	1. Călire +Revenire; 2. Menținere criogenică (- 15... -70°)
V3	Fgn Mo-Ni-Cu EN-GSJ-450-10	-	X	1. Călire izotermă 2. Menținere criogenică (- 70°)

2.3.2.1 *Tratamente termice efectuate cu ajutorul energiei solare respectiv energie electrică specifice oțelului inoxidabil EN 1.4848 (Varianta V1)*

Tratamentul termic aplicat oțelului EN 1.4848 aliat cu Co-W-Cu-Mo, s-a efectuat în două locații:

- tratamentele termic efectuate cu energie solară (loturile 1.a. și 1.b.), s-au desfășurat în cadrul Centrului Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES), Font-Romeu-Odeillo (Franța), utilizându-se cuptorul solar cu o putere de aproximativ 1 kW, cu ax vertical (Medium Size Solar Furnaces);

- tratamentele termice efectuate cu energie electrică (loturile 1.c. și 1.d.) s-au desfășurat în cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov, utilizându-se un cuptor cu rezistență electrică (cuptorul Nabertherm).

În tabelul 2.7 sunt prezentați parametrii tehnologici specifici variantei experimentale V1 aplicată oțelului inoxidabil EN 1.4848 (tratamentele termice s-au desfășurat cu utilizarea energiei solare folosind cuptorul solar, respectiv a energiei electrice folosind cuptorul electric).

Tabelul 2.7 Parametrii tehnologici specifici variantei experimentale V1 aplicată oțelului inoxidabil EN 1.4848

Material	Lot	Energia utilizată	Tratament termic			Menținere la temperaturi scăzute	
			t_A [°C]	τ_A [min]	mediu răcire	t_{crio} [°C]	τ_{crio} [min]
Oțel inox EN 1.4848	1.a.	Solară	1050	7	apă	-150	7
	1.b.	Solară			ulei		
	1.c.	Electrică			apă		
	1.d.	Electrică			ulei		

unde:

t_A este temperatura de austenitizare, [°C];

τ_A este timpul de menținere la temperatura de austenitizare, [min];

t_{crio} este temperatura de menținere la temperaturi scăzute, [°C];

τ_{crio} este timpul de menținere la temperaturi scăzute, [min];

În vederea efectuării încercărilor specifice Calorimetriei diferențiale (DSC - Scanare Calorimetrică Diferențială) s-a utilizat echipamentul de analiză termică "DSC 200 F3 Maia".

În cadrul acestei cercetări, s-a utilizat analiza calorimetrică diferențială (DSC) în vederea studierii transformărilor de fază în stare solidă la temperaturi scăzute (- 150°C) cât și a confirmării unui bun comportament la temperaturi scăzute a aliajelor analizate (cu posibile utilizări în industria aeronautică, alimentară, chimică, transporturi, etc.).

Parametrii de lucru folosiți în cadru determinărilor au fost:

- temperatura de lucru: - 150°C;
- viteza de răcire – respectiv încălzire – 20 K/min;
- atmosferă protectoare – N₂ gazos cu un debit constant de 20 ml/min;
- au fost folosite fișiere de calibrare.

2.3.2.2 *Tratamente termice efectuate cu ajutorul energiei electrice aplicate oțelului C45 (EN 1.0503) Varianta V2*

Tratamentul termic aplicat oțelului EN 1.0503 (C45) s-a desfășurat în cadrul Departamentului Știința Materialelor cu ajutorul cuptorului electric tip "UTTIS" București.

Menținerea la temperaturi scăzute cât și efectuarea încercărilor de reziliență s-au realizat în cadrul Laboratorului Central de încercări mecanice al "S.C. ROMAN Autocamioane" S.A Brașov,

În tabelul 2.8 sunt prezentați parametrii tehnologici specifici variantei experimentale V2 aplicată oțelului EN 1.0503 (C45).

Tabelul 2.8 Parametrii tehnologici specifici variantei experimentale V2 aplicată oțelului EN 1.0503 (C45): călire+revenire, urmată de o menținere la temperaturi scăzute [40]

Material	Lot	Energia utilizată	Tratament termic						Menținere la temperaturi scăzute	
			t _A [°C]	τ _A [min]	Mediu răcire	t _R [°C]	τ _R [min]	Mediu răcire	t _{crio} [°C]	τ _{crio} [min]
EN 1.0503 Oțel C45	A	Electrică	850	20	apă	600	15	aer	-15;-30;-45; -60; -70	10

unde:

t_A este temperatura de austenitizare, [°C];

τ_A este timpul de menținere la temperatura de austenitizare, [min];

t_R este temperatura de revenire, [°C];

τ_R timpul de menținere la temperatura de revenire, [min];

t_{crio} este temperatura de menținere la temperaturi scăzute, [°C];

τ_{crio} este timpul de menținere la temperaturi scăzute, [min].

2.3.2.3 *Tratamente termice efectuate cu ajutorul energiei electrice aplicate fontei cu grafit nodular (Fgn) EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (Varianta V3)*

Tratamentul termic aplicat fontei *Fgn EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (Varianta V3)* a fost de călire izotermă. Acesta s-a desfășurat în cadrul Departamentului Știința Materialelor cu ajutorul unui cuptor tip "UTTIS" București;

Menținerea la temperaturi scăzute cât și efectuarea încercărilor de reziliență s-a realizat în cadrul Laboratorului Central de încercări mecanice al "S.C. ROMAN Autocamioane" S.A Brașov, Schematic, întreaga activitate de cercetare specifică fontei este prezentată în figura 2.29.

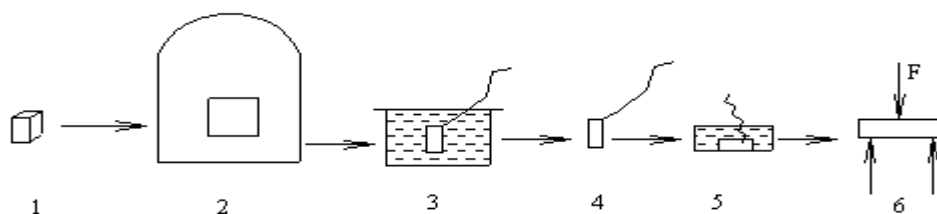


Fig. 2.29 Fluxul tehnologic al cercetărilor (specific Fgn Mo-Ni-Cu): 1 – epruvete supuse cercetării; 2 – tratament termic de austenitizare; 3 – menținerea în treaptă izotermă în baie de sare; 4 – răcire în aer; 5 – menținerea la temperaturi scăzute în instalația experimentală; 6 – determinarea valorilor rezilienței (KCU și KCV) [39]

Parametrii tehnologici utilizați în cazul tratamentului termic de călire izotermă urmat de o menținere la temperaturi scăzute, sunt prezentați în tabelul 2.9.

Tabelul 2.9 Parametrii tehnologici specifici variantei experimentale V3 aplicată fontei cu grafit nodular Fgn Mo-Ni-Cu: călire izotermă, urmată de o menținere la temperaturi scăzute [39]

Material	Lot	Energia utilizată	Parametrii tehnologici						Menținere la temperaturi scăzute	
			t_A [°C]	τ_A [min]	Mediu răcire	t_{iz} [°C]	τ_{iz} [min]	Mediu răcire	t_{crio} [°C]	τ_{crio} [min]
Fgn Mo-Ni-Cu EN-GSJ-450-10	A	Electrică	900	30	sare*	300	30; 40; 50; 60; 70	aer	-70	15
	B					400				

* călirea în treaptă izotermă s-a realizat în baie de săruri (55% KNO_3 + 45% $NaNO_3$)

unde:

t_A este temperatura de austenitizare, [°C];

τ_A este timpul de menținere la temperatura de austenitizare, [min];

t_{iz} este temperatura de menținere în treaptă izotermă, [°C];

τ_{iz} timpul de menținere în treaptă izotermă, [min];

t_{crio} este temperatura de menținere la temperaturi scăzute, [°C];

τ_{crio} este timpul de menținere la temperaturi scăzute, [min].

2.3.3 Rezultate experimentale

2.3.3.1 Contribuții privind comportarea la temperaturi scăzute (- 150°C) a oțelului inoxidabil EN 1.4848, tratat termic în cuptorul solar și electric (Varianta VI)

Încercările specifice Calorimetriei diferențiale (DSC - Scanare Calorimetrică Diferențială) la temperaturi scăzute (- 150°C) s-au realizat pe epruvete din oțel inoxidabil EN 1.4848 (Ø10 x 3 mm). Pentru realizarea încercărilor specifice, din fiecare epruvetă s-a prelevat o miniprobă care a fost introdusă în capsula specifică instalației "DSC 200 F3 Maia".

Rezultatele obținute în timpul desfășurării fiecărui experiment în parte, au fost interpretate cu ajutorul softului "NETZCH Proteus" cu care este dotat echipamentul. Au fost determinate peak-urile, atât pe curba de răcire cât și pe cea de încălzire cât și valorile entalpiilor de transformare. În figurile 2.30 și 2.31 sunt prezentate diagramele specifice DSC pentru probele tratate termic în cuptorul solar.

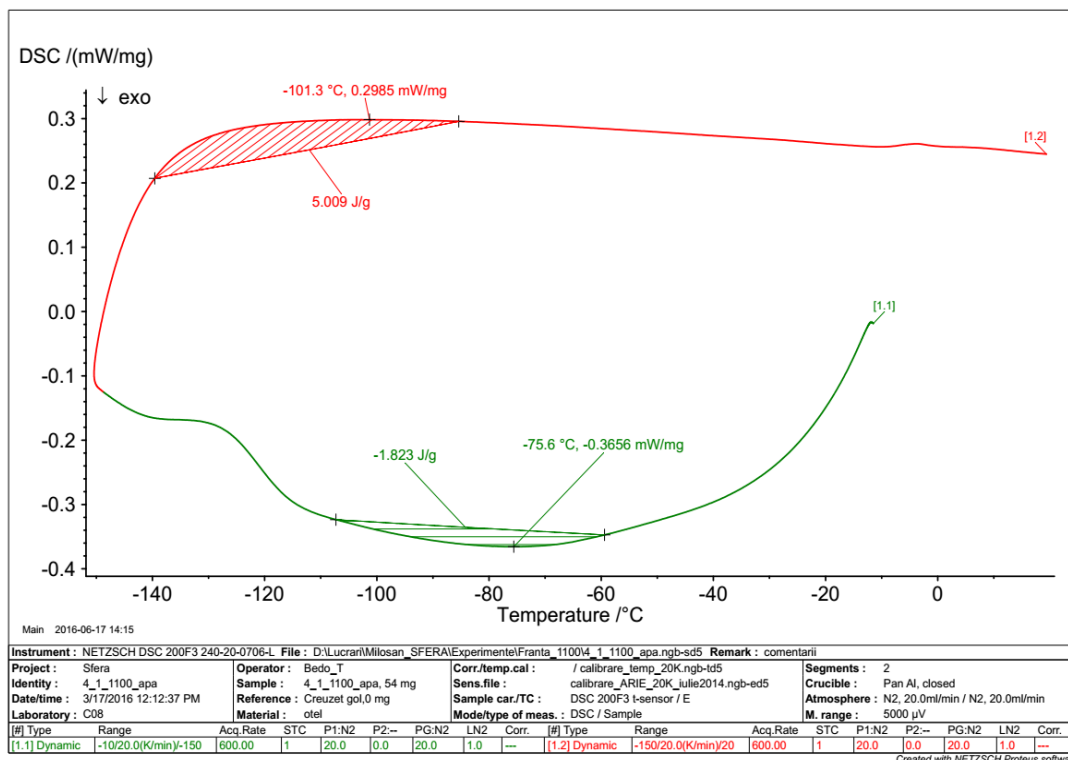


Fig. 2.30 Analiza DSC pentru proba V1.a. (încălzire în cuptorul solar la 1100°C urmată de răcirea în apă, oțel EN 1.4848)

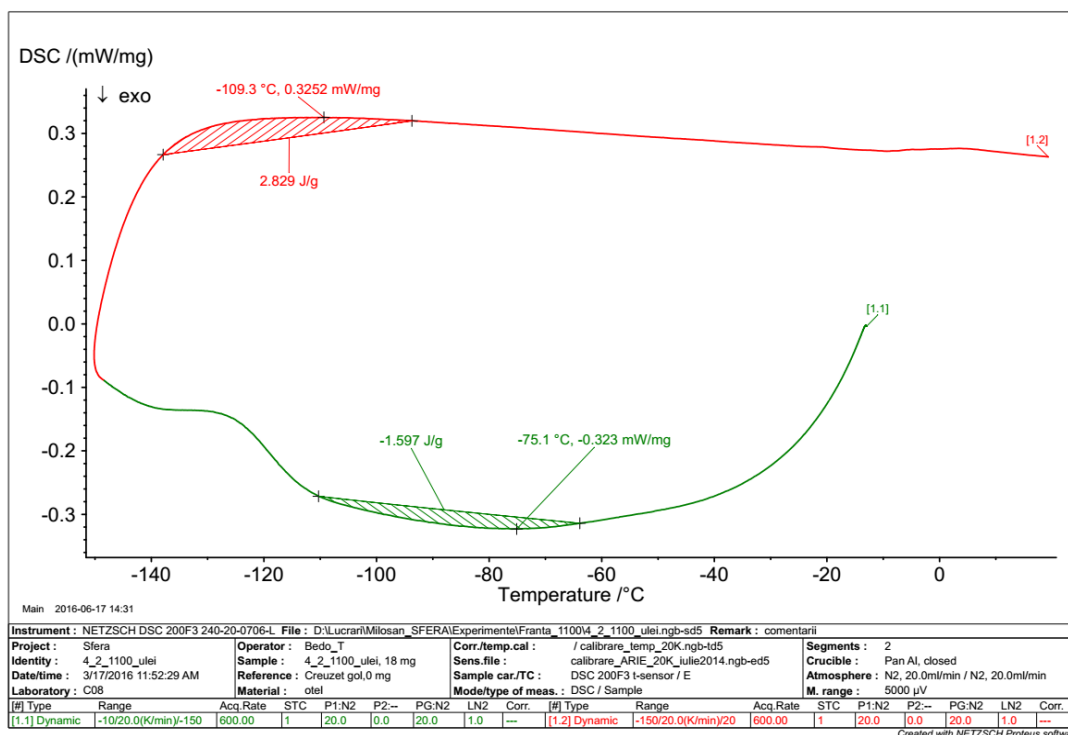


Fig. 2.31 Analiza DSC pentru proba V1b. (încălzire în cuptorul solar la 1100°C urmată de răcirea în ulei, oțel EN 1.4848)

În figurile 2.32 și 2.33 sunt prezentate diagramele specifice DSC pentru probele tratate termic în cuptorul electric.

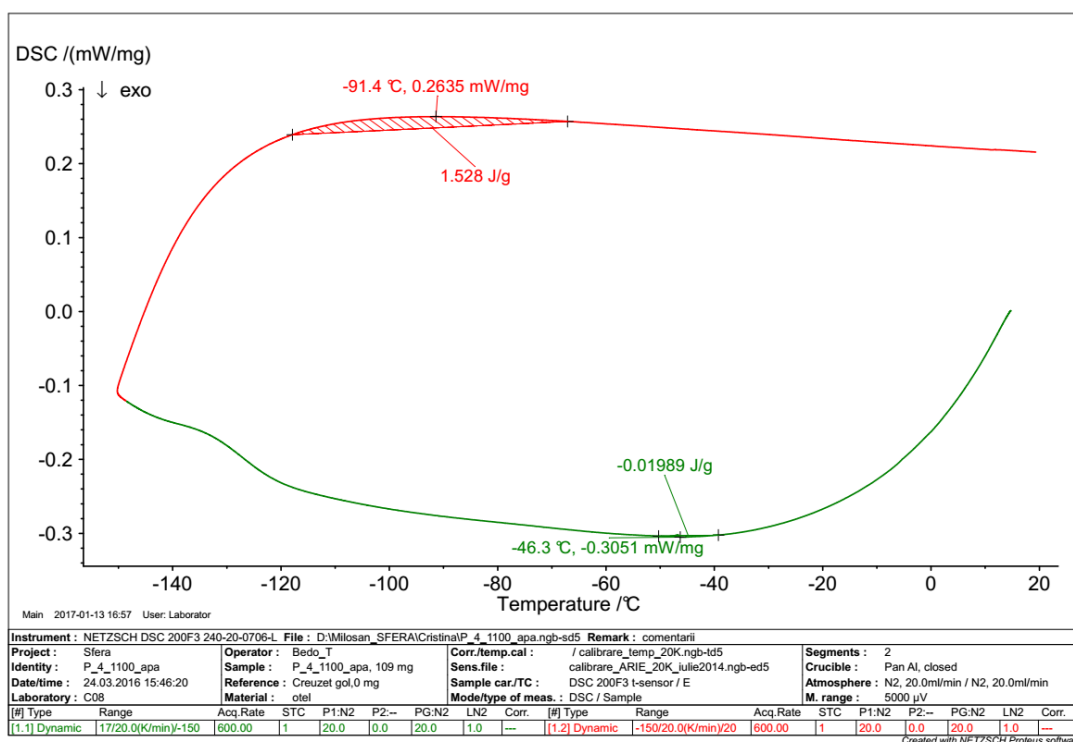


Fig. 2.32 Analiza DSC pentru proba V1.c. (încălzire în cuptorul electric la 1100°C urmată de răcirea în apă, oțel EN 1.4848)

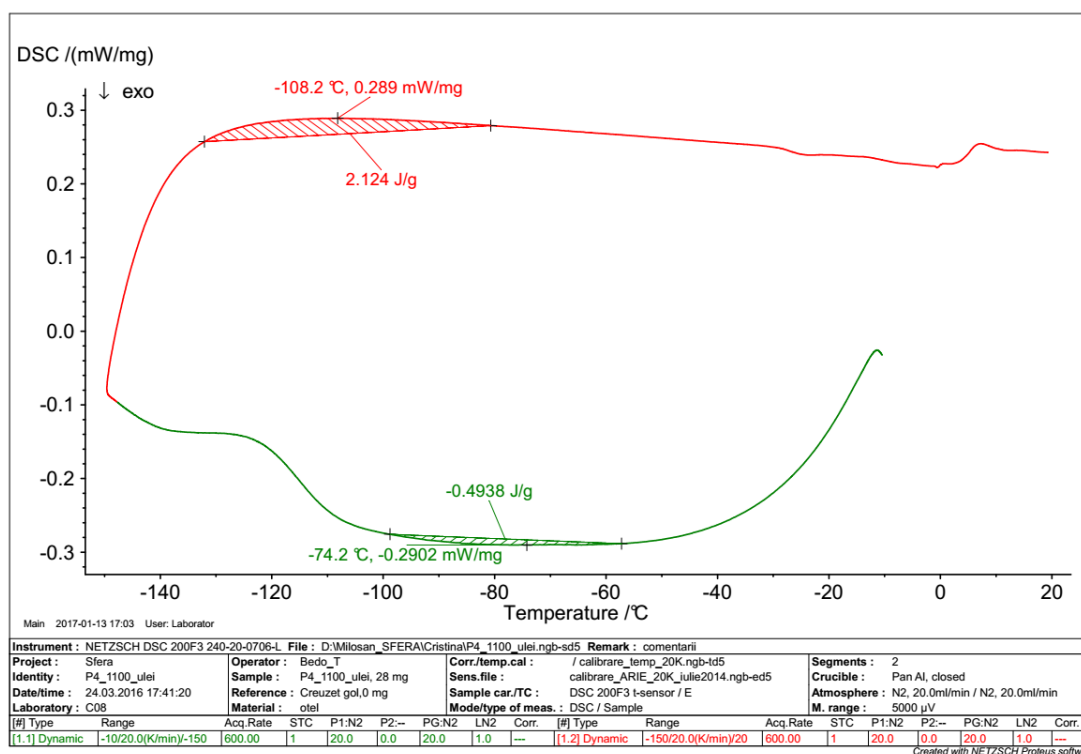


Fig. 2.33 Analiza DSC pentru proba V1.d. (încălzire în cuptorul electric la 1100°C urmată de răcirea în ulei, oțel EN 1.4848)

Aceste diagrame descriu stabilitatea austenitei în intervalul de temperatură corespunzător diagramelor trasate.

Peak-urile pun în evidență existența unor transformări ale austenitei (la încălzire și răcire) iar efectele termice asociate acestor picuri sunt o evaluare cantitativă a acestor transformări.

Analiza comparativă a rezultatelor este sistematizată în tabelul 2.10.

Tabelul 2.10 Analiza comparativă a rezultatelor specifice calorimetriei diferențiale (DSC)

Parametru		Răcire cu apă		Răcire cu ulei	
		Solar V1a	Electric V1c	Solar V1b	Electric V1d
Răcire	Peak [°C]	- 75,6	- 46,3	- 75,1	- 74,2
	Enthalpy [J/g]	- 1,823	- 0,019	- 1,597	- 0,493
Încălzire	Peak [°C]	- 101,3	- 91,4	- 109,3	- 108,2
	Enthalpy [J/g]	5,009	1,528	2,829	2,124

Variația peak-urilor și a entalpiei pentru analiza calorimetriei diferențiale (DSC) specifică oțelului EN 1.4848 este prezentată în tabelul 2.11.

Tabelul 2.11 Variația peak-urilor și a entalpiei pentru analiza calorimetriei diferențiale (DSC) specifică oțelului EN 1.4848

Parametru		Răcire cu apă		Răcire cu ulei	
		Solar V1a	Electric V1c	Solar V1b	Electric V1d
Răcire	Peak [°C]	→	→	→	→
	Enthalpy [J/g]	→	→	→	→
Încălzire	Peak [°C]	→	→	→	→
	Enthalpy [J/g]	→	→	→	→

Din analiza datelor prezentate în figurile 2.30 - 2.33 cât și din tabelele 2.10 și 2.11, se pot concluziona următoarele:

- indiferent de mediul de răcire (apă sau ulei), temperatura la care apare peak-ul scade la probele încălzite în cuptorul solar comparativ cu cele încălzite în cuptorul electric.

- concomitent cu scăderea temperaturii la care apare formarea vârfurilor (peak-urilor), se observă și o creștere a entalpiei fapt ce demonstrează că prin aplicarea tratamentului termic utilizând energia solară, stabilitatea materialului la temperaturi scăzute crește comparativ cu rezultatele obținute prin aplicarea tratamentului termic utilizând energia electrică. Apariția vârfurilor (peak-urilor) este semnul apariției unei transformări de fază în stare solidă.

- valorile relativ mici ale variațiilor observate pe curbele DSC, demonstrează faptul că oțelul analizat (EN 1.4848) nu prezintă nici un fel de transformări de fază în stare solidă până la

temperaturi negative de -75°C . Comportarea bună la temperaturi scăzute a acestui oțel prezentată în literatura de specialitate [70, 99] este confirmată de rezultatele acestei cercetări, explicația acestei bune comportări la temperaturi scăzute fiind faptul că acest oțel conține un procent ridicat de nichel (21,90%), element puternic austenitogen, care face ca în structură, faza austenitică să fie stabilă chiar și la temperaturi foarte joase, nichelul realizând coborârea mult sub zero a punctului de transformare M_s (punctul la care în structură apare martensita).

2.3.3.2 Rezultate experimentale privind comportarea la temperaturi scăzute (-70°C) a oțelului EN 1.0503 (C45), tratat termic în cuptorul electric (variante V2)

În vederea studierii comportamentului la temperaturi scăzute prin analiza rezilienței oțelului EN 1.0503 (C45) (vezi tabelul 2.5) s-au prelevat un număr de 12 epruvete crestate în U ($55 \times 10 \times 10$ cu adâncimea de 2mm), specifice capacității materialului de a se opune inițierii și propagării fisurii (KCU) [108]. Temperaturile la care s-au realizat studiul cu privire la influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței oțelului, au fost: $+20^{\circ}\text{C}$; -15°C ; -30°C ; -45°C ; -60°C respectiv -70°C [40]. În conformitate cu standardul EN 10045-1:1990 [108], timpul maxim admis între extragerea probei din *Instalația Experimentală Criogenică* și efectuarea încercării de reziliență, trebuie să fie de maxim 5 secunde, timp respectat în cadrul tuturor încercărilor efectuate în Laboratorul Central de încercări mecanice din cadrul S.C. "Roman Autocamioane" S.A. Brașov. Influența parametrilor tratamentului termic asupra energiei de rupere (W_r) la diferite temperaturi de încercare, specifice celor 6 epruvete crestate în U este prezentată în figura 2.34.

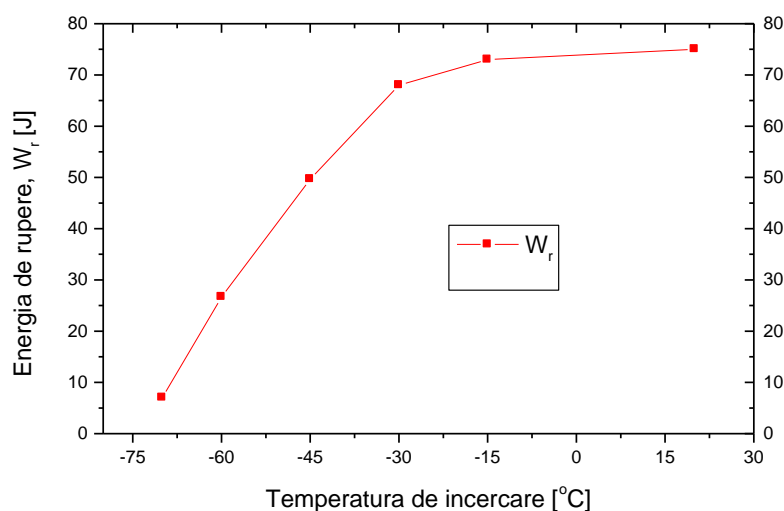


Fig. 2.34 Influența parametrilor tratamentului termic asupra energiei de rupere (W_r) la diferite temperaturi de încercare (oțelul EN 1.0503) [40]

Influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței KCU_2 la diferite temperaturi de încercare, specifice celor 6 epruvete crestate în U este prezentată în figura 2.35.

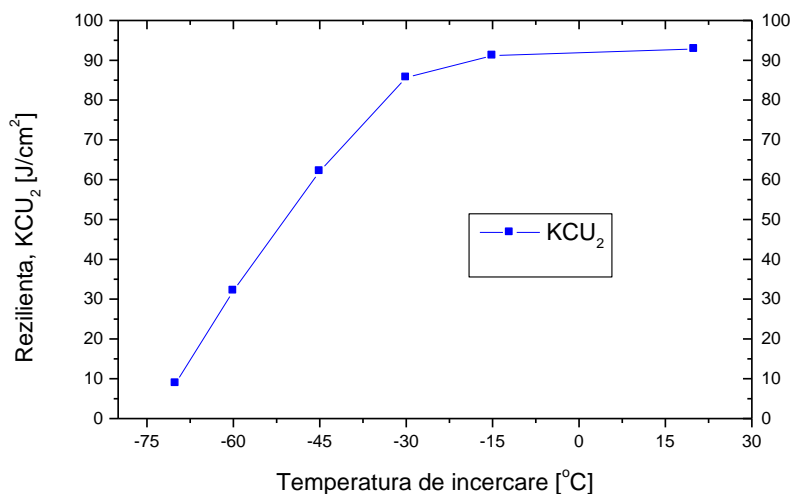


Fig. 2.35 Influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței (KCU_2) la diferite temperaturi de încercare (oțelul EN 1.0503) [40]

Valoarea rezilienței KCU_2 s-a determinat cu ajutorul relației [2]:

$$KCU_2 = \frac{W_r}{S_0} \text{ [J/cm}^2\text{]}, \quad (2.6)$$

unde: W_r este energia consumată la rupere, [J];

S_0 este suprafața de rupere a epruvetei [cm^2].

Analizând rezultatele obținute prin menținerea acestor epruvete la temperaturi scăzute, se remarcă faptul că până la temperaturi de -30°C valorile energiei de rupere, respectiv ale rezilienței rămân relativ apropiate de cele ale încercării la $+20^\circ\text{C}$, observându-se apoi o scădere pronunțată a valorilor mărimilor analizate. Acest fapt se explică prin aceea că odată cu scăderea valorii temperaturilor de menținere către -70°C , în structură se produc transformări de fază în stare solidă și anume austenita reziduală din material (A_{rez}) se transformă în martensită ceea ce conduce la scăderea valorilor energiei de rupere (W_r), respectiv ale rezilienței (KCU_2).

2.3.3.3 Rezultate experimentale privind comportarea la temperaturi scăzute (-70°C) a fontei cu grafit nodular EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu, tratată termic în cuptorul electric (Varianta V3)

În vederea studierii comportamentului la temperaturi scăzute a fontei cu grafit nodular EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (vezi tabelul 2.5) s-au utilizat un număr de 10 epruvete

crestate în V (55x10x10 cu adâncimea de 2mm), specifice pentru studiul capacității materialului de a se opune propagării fisurii (KCV) [108]. Temperaturile la care s-a realizat studiul cu privire la influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței fontei, au fost: + 20°C și - 70°C [39]. Și în acest caz s-a respectat timpul de 5 secunde de la scoaterea materialelor din *Instalația Experimentală Criogenică*, până la realizarea determinării de reziliență (KCV), în conformitate cu standardul EN 10045-1:1990 [108].

Cu ajutorul celor 10 de epruvete, s-a realizat un studiu comparativ cu privire la influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței fontei, încercări realizate la temperatura camerei, + 20°C (5 epruvete) respectiv la o temperatură scăzută, - 70°C (5 epruvete).

Influența parametrilor tratamentului termic asupra fontei cu grafit nodular EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (încercări la + 20°C) este prezentată în figura 2.36 [39].

Influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței fontei EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (încercări la - 70°C) este prezentată în figura 2.37.

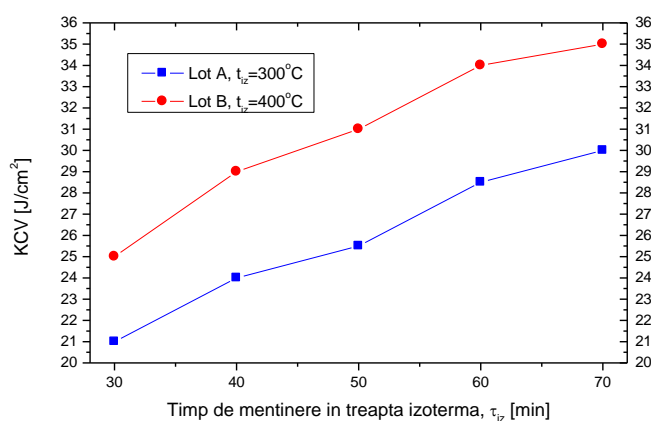


Fig. 2.36 Influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței fontei EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (încercări la + 20°C) [39]

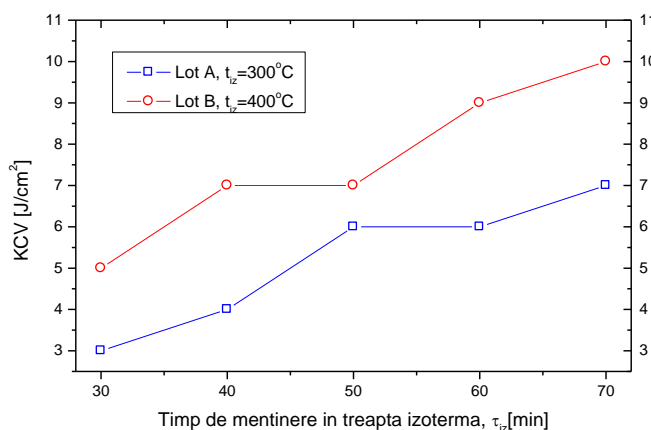


Fig. 2.37 Influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței fontei EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (încercări la - 70°C) [39]

În figura 2.38 este prezentat un studiu comparativ privind influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței fontei EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (încercări realizate la +20°C, respectiv -70°C).

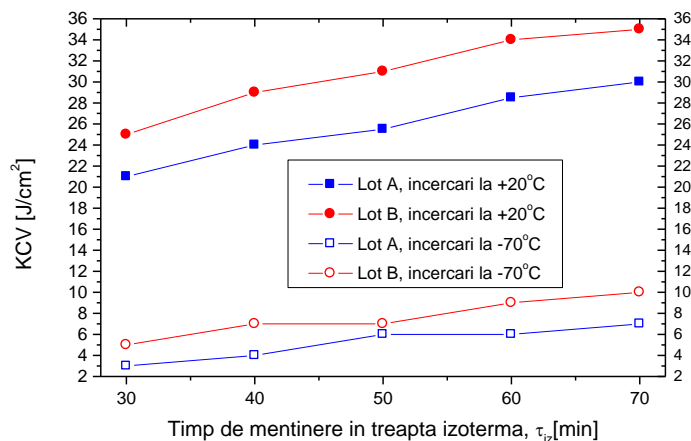


Fig. 2.38 Studiu comparativ privind influența parametrilor tratamentului termic asupra rezilienței fontei EN-GSJ-450-10 aliată cu Mo-Ni-Cu (încercări la +20°C respectiv -70°C) [39]

Analizând rezultatele prezentate în figurile 2.36, 2.37 și 2.38, se constată o evoluție normală a valorilor rezilienței la modificarea parametrilor regimului de tratament termic, remarcându-se următoarele:

- prin alierea cu Mo-Ni-Cu a acestui tip de fontă și tratarea ulterioară prin călire izotermă se obține o structură ferito-bainitică care conferă materialului valori satisfăcătoare chiar și la temperaturi mai scăzute (-70°C) [39].

- creșterea temperaturii treptei de menținere izotermă de la 300°C (lot A) la 400°C (lot B), duce la creșterea valorilor rezilienței. În cazul pieselor menținute la $t_{iz} = 300^\circ\text{C}$ (lot A), structura este constituită din ferită bainitică inferioară, austenită reziduală și martensită, constituenți ce determină valori mai scăzute ale rezilienței comparativ cu epruvetele menținute izoterm la 400°C (Lot B), când structura este constituită din ferită bainitică superioară, austenita îmbogățită în carbon și dispare martensita, ceea ce duce la obținerea unor valori superioare ale rezilienței;

- se observă de asemenea și o caracteristică generală pentru toate loturile studiate și anume faptul că duratele mici de menținere la transformarea izotermă ($\tau_{iz} = 30, 40, 50$ min.), favorizează valori mai scăzute ale rezilienței, aceasta se explică prin faptul că odată cu scurtarea duratei de menținere în treapta izotermă, urmată de o răcire în aer până la temperatura ambiantă, în structură crește proporția de martensită (apărută prin transformarea la răcire a austenitei subrăcite), constituent ce determină acest comportament.

- odată cu creșterea duratei menținerii la aceeași temperatură a treptei izoterme ($\tau_{iz} = 60$, 70 min.), se observă o creștere a valorilor rezilienței, fapt explicat prin obținerea unui procent din ce în ce mai mare în structură a feritei bainitice cu scăderea procentului de martensita, ceea ce favorizează creșterea valorilor rezilienței.

- la temperatura de -70°C , scad valorile rezilienței comparativ cu determinările realizate la temperatura camerei ($+20^{\circ}\text{C}$). La temperatura de -70°C , se intuiește faptul că micșorarea valorilor rezilienței KCV se datorează scăderii pronunțate a stabilității austenitei și transformarea acesteia în martensită “ε” producând variația valorilor proprietăților mecanice, iar în particular producând scăderea valorilor rezilienței [41].

2.4 Cercetări privind comportamentul tribologic al aliajelor speciale tratate termic utilizând energia solară și electrică

Tribologia, ca știință relativ nouă, s-a conturat începând cu anul 1960, etimologia cuvântului provenind din limba greacă (tribos=frecare, logos=știință) [15, 110].

Conceptul de tribologie are în vedere interacțiunea a două sau mai multor corpuri materiale care interacționează între ele prin una sau mai multe suprafețe de contact cu sau fără mișcare relativă macroscopică, realizând transmiterea unor forțe normale sau tangențiale [14, 15, 26, 69, 110].

Structura unui tribosistem este alcătuită din două corpuri solide (corpul de bază și contrapiesa), materialul de separație (lubrifianțul atunci când este cazul) și mediul în care lucrează ansamblul tribologic [26]. Pe suprafața de separație a solidelor sau în interiorul unor pelicule de fluid care sunt aderente și fixate pe suprafețele solidelor, apar forțe tangențiale care se opun mișcării sau tendinței de mișcare, acestea numindu-se forțe de frecare [15]. Frecarea exterioară se desfășoară pe interfața solidelor, iar frecarea interioară se desfășoară în interiorul peliculei de fluid, fiind o măsură a vâscozității fluidului [12]. Fiind un proces de cele mai multe ori nedorit, frecarea ca fenomen complex, se caracterizează prin consum energetic pentru aplatizarea asperităților, de rupere a microjoncțiunilor, de învingere a interacțiunilor moleculare la nivelul microsuprafețelor de contact [14, 26].

Fiind un proces care însoțește frecarea, uzura este procesul de desprindere de material și de modificare a stării inițiale a suprafețelor componentelor tribosistemului. Uzura, ca rezultat al procesului de uzare, îi este caracteristic: deteriorarea suprafețelor (sub diferite moduri),

degradarea sau reducerea dimensiunilor pieselor respective, ca urmare a produselor desprinse de pe suprafețe [14, 15, 26].

2.4.1 Metode de caracterizare a comportamentului tribologic

În cadrul cercetărilor efectuate referitor la comportamentul tribologic, s-au studiat atât epruvete tratate termic cu energie solară cât și în cuptoare încălzite cu energie electrică. Indicatorii considerați utili și analizați pentru aprecierea comportamentului tribologic al materialelor studiate, au fost:

- 1) coeficientul de frecare dinamic " μ " (util în aprecierea rezistenței la uzare a materialelor);
- 2) coeficientul de uzare, " k ";
- 3) profilul urmei de uzare;
- 4) pierderile uzării abrazive, " P_{uz} ".

Cu ajutorul *nanoindentării* [14, 26], s-au determinat proprietățile mecanice: nanoduritatea prin indentare (H_{IT}), (HV) și modulul de elasticitate (E_{IT}), proprietăți cu ajutorul cărora s-au putut realiza predicții referitoare la:

- 5) rezistența la uzare, " H/E ";
- 6) rezistența la deformare plastică, " H^3/E^2 ";
- 7) corelația dintre coeficientul de uzare " k " și nanoduritatea prin indentare " H_{IT} ".

Cu ajutorul tuturor acestor indicatori, s-a reușit aprecierea și interpretarea corectă a comportamentului tribologic al materialelor analizate.

2.4.1.1 Uzura - metodă de caracterizare a comportamentului tribologic

Uzura (pierderea de material) se poate exprima [15] prin cântărire (uzura gravimetrică, U_g), măsurarea grosimii stratului pierdut (uzura liniară, U_h) sau ca volum de material pierdut (uzura volumetrică, U_v).

Volumul de uzură crește cu timpul (uzura este cumulativă) și este invers proporțional cu duritatea materialului testat. De asemenea, depinde direct de regimul de ungere, de temperatura de funcționare și de încărcare, fiind determinat conform lui Archard [14, 26], cu ajutorul relației (2.7):

$$V = KA_v l = Kl \frac{W}{H} [\text{m}^3], \quad (2.7)$$

unde:

V = volumul de uzură [m^3];

K = coeficient de proporționalitate

A_r = aria reală de contact între suprafețe [m^2];

l = distanța de alunecare [m];

W = sarcina [N];

H = duritatea materialului mai moale [Pa].

Desprinderea de material (caracteristică uzurii) poate fi cauzată de acțiuni mecanice, atacuri chimice (coroziune), solicitări termice, etc.

În general, se acceptă clasificarea propusă de F.T. Barwell [69] privitoare la cele patru tipuri fundamentale de uzură (atât uscată cât și în prezența lubrifianților):

- uzura adezivă sau de aderență, care pare să se datoreze aderării suprafețelor în momentul când suprafețele reale de contact ajung la distanțe la care se manifestă forțele de atracție moleculară;

- uzura de abraziune sau abrazivă, se datorește efectului de așchiere și de zgâriere, exercitat de particule dure care, provenind din diferite surse, au ajuns între suprafețele de frecare;

Volumul de material uzat prin abraziune (U_V) poate fi calculat conform [15] cu relația 2.8.

$$U_V = K_U \cdot \frac{N \cdot L_f}{HB} \text{ [mm}^3\text{]}, \quad (2.8)$$

unde:

U_V = volumul de material uzat prin abraziune [mm^3];

K_U = coeficient de uzură dependent de materialele care participă la uzură, are valori cuprinse între 10^{-2} ... 1;

N = sarcina normală [N];

L_f = lungimea de frecare [mm];

HB = duritatea corpului mai moale (uzual $HB \approx 3 \cdot \sigma_c$).

Se remarcă faptul că atunci când $K_U = 1$, uzura apare de la prima deplasare a suprafețelor.

- uzura de coroziune sau prin coroziune, care se datorește reacțiilor chimice dintre agenții agresivi existenți în lubrifianț sau mediul de frecare și materialul corpurilor conjugate în cupla de frecare;

- uzura de oboseală sau prin oboseală, care este o uzură complexă și la baza căreia stau fenomenele de deformare plastică, de compresiune, ecrusare, producere de tensiuni reziduale, etc.

Uzura ca rezultat al procesului de uzare, se poate exprima prin uzură liniară, volumetrică sau gravimetrică [69, 106], utilizând următorii indicatori: viteza de uzare (se raportează uzura la unitatea de timp) și intensitatea de uzare (se raportează uzura la unitatea de lungime).

Indicatori utili în aprecierea gradului de uzare sunt [69, 110]:

1. *Intensitatea volumetrică de uzare*, care reprezintă raportul dintre volumul materialului uzat și lungimea de frecare. Aceasta este calculată cu relația (2.9):

$$I_v = \frac{\Delta V}{L_f} \left[\frac{mm^3}{km} \right], \quad (2.9)$$

unde:

ΔV este volumul materialului uzat, [mm³];

L_f este lungimea de frecare, [km].

2. *Intensitatea gravimetrică de uzare*, care reprezintă raportul dintre masa materialului uzat și lungimea de frecare, calculată cu relația (2.10) [14, 26]:

$$I_g = \frac{\Delta G}{L_f} \left[\frac{g}{km} \right], \quad (2.10)$$

unde:

ΔG este masa de material uzat, [g].

3. *Coefficientul de uzare*, care reprezintă raportul dintre volumul de material uzat și produsul dintre lungimea de frecare și forța normală transmisă, calculat cu relația (2.11) [14, 26]:

$$k = \frac{\Delta V}{PL_f} \left[\frac{mm^3}{Nm} \right], \quad (2.11)$$

unde:

P este forța normală transmisă, [N].

Fiind una dintre metodele de caracterizare a comportamentului tribologic al materialelor, indiferent de domeniul de utilizare al acestora (metalurgia extractivă, industria materialelor de construcții, industria petrolieră, industria auto, etc..) uzura abrazivă este o proprietate de exploatare importantă care caracterizează aliajele speciale (oțelul inoxidabil, respectiv fonte cu

grafit nodular, Fgn cu structură ferită bainitică), fiind una din direcțiile prioritare de cercetare în activitatea autorului [43-49].

2.4.1.2 Nanoindentarea, metodă de predicție a rezistenței la uzare și la deformare plastică a materialelor

Duritatea reflectă rezistența la deformare plastică atunci când un indenter (penetrator) este forțat în masa materialului de la suprafața probei [14, 26, 110]. În cazul în care sunt studiate diferite repere cu pereți subțiri sau când se studiază comportamentul mecanic al unui strat subțire, datorită grosimii reduse a acestuia, se utilizează *nanoindentarea*.

Prin încercarea de nanoindentare, se permite măsurarea adâncimii de pătrundere (h) a unui penetrator sub o anumită forță aplicată (F), pe parcursul unui ciclu de încercare (încărcare-descărcare), furnizând graficele curbelor încărcării comparativ cu adâncimea de penetrare [14, 26]. În mod dinamic, sunt măsurate forța aplicată (F) și adâncimea de penetrare (h) pe tot parcursul unui ciclu încărcare - descărcare. Duritatea și modulul de elasticitate sunt calculate direct cu ajutorul unui soft specializat, pe baza curbei sarcină - deplasare (adâncime) [69]. Pe baza rezultatelor obținute prin nanoindentare, se realizează o predicție a rezistenței la uzare și la deformare plastică a materialelor. Se remarcă faptul că, prin nanoindentare, se furnizează date suplimentare atunci când se analizează comportamentul tribologic al materialelor. Modul de determinare a durității straturilor superficiale prin nanoindentare este prezentat în figura 2.40.

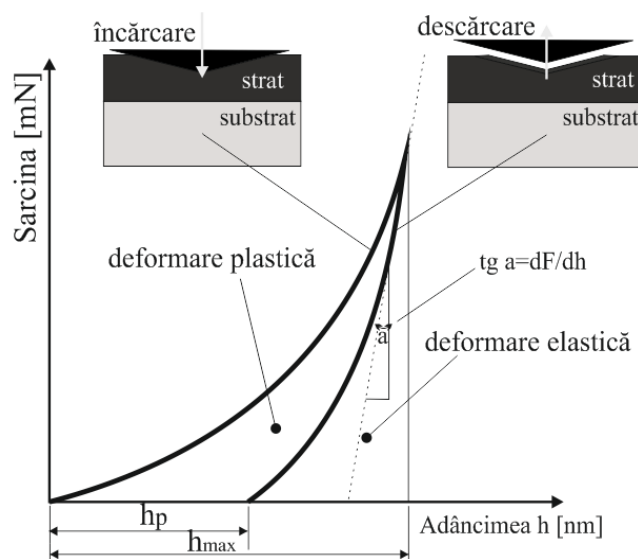


Fig. 2.40 Reprezentarea curbelor de sarcină încărcare-descărcare la nanoindentare:

h_{\max} – adâncimea maximă; h_p – deformația plastică remanentă [14, 26]

Pentru a se evita obținerea unui rezultat eronat în cadrul determinării durității prin nanoindentare, o parte a literaturii de specialitate recomandă ca o regulă de bază ca adâncimea de indentare să fie mai mică de 10% din grosimea totală a stratului analizat [14, 26].

Duritatea obținută prin indentare (H_{IT}) este definită ca raportul dintre sarcina de indentare și aria de contact proiectată pe planul suprafeței piesei [14, 26], conform relației (2.12):

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p}, \quad (2.12)$$

unde:

F_{\max} este sarcina maximă aplicată asupra indenterului;

A_p reprezintă aria proiecției suprafeței de contact, rezultantă în urma aplicării sarcinii F_{\max} .

Modulul de elasticitate obținut în urma indentării (E_{IT}) este calculat cu ajutorul pantei tangentei la curba de descărcare, după metoda Oliver&Pharr [14, 26]. Acest modul, în general are valori similare cu modulul lui Young (pot exista diferențe datorită “prăbușirii” (“sink-in”) sau a “acumulării” de material (“pile-up”), cauzate de acțiunea indenterului). Modulul de elasticitate se calculează cu relația (2.13), [14, 26]:

$$E_{IT} = \frac{1 - (\nu_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (\nu_i)^2}{E_i}}, \quad (2.13)$$

unde:

s, i - sunt indicii care se referă la proprietățile specimenului (probei) și a indenterului;

ν reprezintă coeficientul lui Poisson;

E_r reprezintă modulul de elasticitate redus (E^*), calculat cu relația (2.14), [14, 26]:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi \cdot S}}{2\sqrt{A_p}}, \quad (2.14)$$

unde:

S reprezintă rigiditatea de descărcare elastică ($S = \tan \alpha = dF/dh$);

A_p reprezintă aria de contact proiectată, în cazul unui indenter de tip Berkovich (utilizat în cadrul cercetărilor experimentale efectuate în cercetare și prezentate în această lucrare) [14, 26]. A_p are valoarea dată de relația (2.15), [14, 26]:

$$\sqrt{A_p} = 4,950 \cdot h_c, \quad (2.15)$$

unde:

h_c reprezintă adâncimea de contact (adâncimea de penetrare, corespunzătoare contactului materialului cu indentorul).

2.4.2 Aparatura și materialele utilizate

2.4.2.1 Aparatura utilizată în cadrul cercetărilor

În funcție de perioada de timp în care acest proces a fost studiat, cercetările s-au desfășurat pe următoarele aparate/instalații:

1) Tribometru rotativ utilizat pentru determinarea comportamentului tribologic

Pentru determinarea comportamentului tribologic s-a utilizat un tribometru rotativ produs de firma CSM Instruments (fig. 2.41) aflat în cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov. Pe post de cuplă de frecare în contact cu stratul analizat s-a utilizat o bilă din nitrură de siliciu cu diametrul 6 mm [14, 26].



Fig. 2.41 Tribometru rotativ utilizat pentru determinarea comportamentului tribologic al probelor [14, 26]

Aria profilului urmei de uzare a fost determinată cu ajutorul unui profilometru de tip Taylor-Hobson Surtronic 25. Raza urmei de uzare, respectiv aria profilului urmei de uzare sunt valori folosite în determinarea volumului de material pierdut (ΔV) (aria înmulțită cu

circumferința cercului), valoare folosită la calcularea coeficientului de uzură (vezi rel. 2.11). Razele urmelor de uzură (inclusiv ceilalți parametri ai determinărilor) apar în raportul generat de către softul aparatului, în format PDF pentru fiecare determinare efectuată.

2) Instalație experimentală de încercare dinamică a uzurii abrazive

Instalația experimentală de încercare dinamică a uzurii abrazive (fig. 2.42) aflată în cadrul Departamentului Știința Materialelor, este de tip știft cilindric fix/disc antrenat, caracteristic mașinii de tip placă cu epruvetă fixă, fiind o cuplă de grad IV, compusă din cuple de frecare cu contact pe suprafețe plane [110].

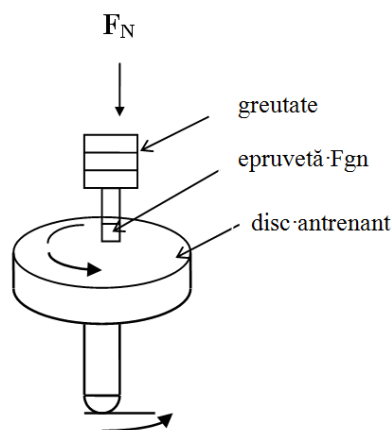


Fig. 2.42 Schema instalației experimentale de încercare dinamică a uzurii abrazive [43]

Caracteristicile instalației experimentale sunt: dimensiunea discului este de $\varnothing 250\text{mm}$, viteza de rotație a discului $v_{\text{rot}} = 200 \text{ rot/min}$, poziția epruvetei pe disc = $1/2 R$, secțiunea epruvetei “S” este de 1256 mm^2 , rugozitatea discului este de $0,8 \mu\text{m}$, sarcina unitară $P_{\text{unitar}} = FN/S$ este de $0,0318 \text{ N/mm}^2$.

Discul este realizat din oțel turnat cu 12 % Mn (T105Mn120), rectificat și călit cu duritatea de 550 HB [46-49].

Epruveta și discul de uzare se învârtesc în același sens, epruveta având o mișcare excentrică, imprimată de un excentric atașat motorului. La partea superioară a axului în care este fixată epruveta, sunt plasate discuri strikethrough, care realizează o apăsare de 40 N a epruvetei pe discul de uzare.

3) Modul pentru nanoindentare (determinarea durtății și a modulului de elasticitate)

Determinarea durtății și a modulului de elasticitate Young s-a efectuat utilizând un modul pentru nanoindentare, produs de către CSM Instruments (NHT-2, figura 2.43) aflat în cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov.

Parametrul de control a fost stabilit a fi sarcina maximă aplicată indenterului (250mN). Pe fiecare probă analizată s-au efectuat o serie de 5 măsurători, cu o diferență de poziționare a indenterului de 0,05 mm între acestea.

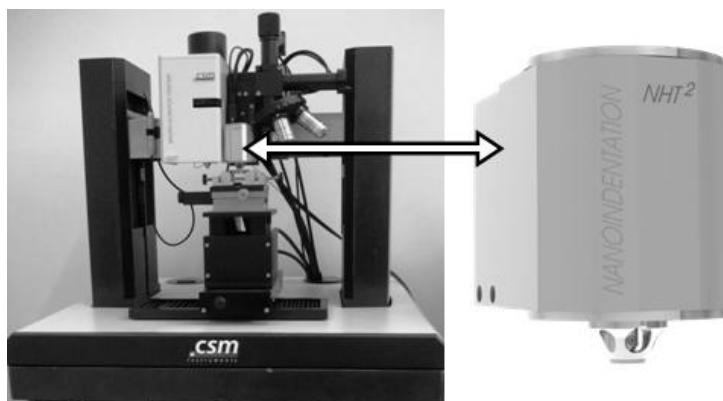


Fig. 2.43 Platforma compactă (stg.), modulul pentru nanoindentare (dr.) [14, 26]

Sarcina maximă a aparatului este de 500mN, iar sarcina minimă aplicată indenterului este sub 0,05mN.

2.4.2.2 Materialele utilizate în cadrul cercetării

Materialele utilizate în cadrul cercetărilor efectuate sunt prezentate în tabelul 2.12.

Tabelul 2.12 Materialale utilizate în cadrul cercetărilor experimentale

Aliaje studiate		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu
Oțel inoxidabil En 1.4136	Standard*	0.5-0.9	≤ 2	≤ 1	≤ 0.045	≤ 0,030	-	27-30	-	2-2.5	
	Experiment	0,73	1,50	0,56	0,030	0,030	-	26	1,50	2,05	0,30
Oțel inoxidabil En 1.4848	Standard**	0.3-0.5	1-2.5	≤ 2	≤ 0.040	≤ 0.030	-	24-27	11-14	≤0.5	-
	Experiment	0,32	1,10	0,50	0,030	0,025	-	25.60	20.90	0.70	0,14
Fgn aliată cu Ni-Cu EN -GJS-450-10	Standard***	3,25-3,7	2,4-3,0	0,1-0,3	≤ 0,08	≤ 0,02	0,04-0,07	-	-	-	-
	Experiment	3,48	2,88	0,40	0,012	0,003	0,05	-	0,54	-	0,42

* conform EN 10295:2002 - Heat resistant steel castings [107, 125, 130]

** conform EN 10295:2002 - Heat resistant steel castings [107, 125, 127, 129]

*** conform EN 1563:2011 - Founding-Spheroidal graphite cast iron [102, 107, 117, 125]

Specific oțelurilor inoxidabile EN 1.4136 și EN 1.4848, cât și fontei cu grafit nodular (Fgn) aliată cu Ni-Cu, este faptul că aceste aliaje utilizate în cadrul cercetărilor experimentale au fost aliate suplimentar cu elemente de aliere (față de compoziția standardizată) în vederea finisării structurii și obținerea unor valori superioare ale proprietăților de exploatare, conferind astfel cercetării o particularitate de noutate.

Structura în stare turnată a oțelului inoxidabil marca EN 1.4136, este formată din ferită (Fe α) și carburi complexe de tipul M₂₃C₆ (CrFeMo)₂₃C₆. Carburile pot fi dispuse în principal în lanțuri sau în formații cu caracter eutectic la limitele grăunților de ferită, existând de asemenea și aglomerări de particule de carburi mici, situate în interiorul grăunților de ferită.

Datorită alierii suplimentare cu Ni (1,5%), în stare turnată, acest oțel poate să conțină și un procent scăzut de austenită (Fe γ) [89, 93, 127].

Duritatea oțelului în stare brut turnată este de 33 HRC \approx 327 HV₁₀₀ (valoarea durității reprezintă media aritmetică a șapte determinări efectuate pe material).

Structura în stare turnată a oțelului inoxidabil EN 1.4848, este formată din austenită (Fe γ) și carburi poliedrice (K) care pot fi de tipul (Cr, Fe)₂₃C₆, (Fe,Cr₄)C, acestea putând fi dispuse sub formă de rețea (în șiruri) cât și carburi izolate. [89, 93, 127].

Duritatea oțelului în stare brut turnată este de 22 HRC \approx 248 HV₁₀₀ (valoarea durității reprezintă media aritmetică a șase determinări efectuate pe material).

Structura în stare turnată a fontei cu grafit nodular, Fgn EN -GJS-450-10 aliată cu Ni-Cu este perlito-feritică cu o duritate de aproximativ 199 HB (duritatea reprezintă media aritmetică a șase determinări efectuate pe material).

2.4.3 Modul de lucru

Variantele experimentale de utilizare a energiei solare, respectiv a energiei electrice folosite în studiul comportamentului tribologic al aliajelor speciale tratate termic, sunt prezentate în tabelul 2.13.

Tabelul 2.13 Variante experimentele de utilizare a energiei solare și electrice în studiul comportamentului tribologic al aliajelor speciale

Varianta experimentală	Material	Energia utilizată		Tratamentul termic aplicat
		Solară	Electrică	
V1	Oțel inoxidabil EN 1.4136 EN 1.4848	X	-	Călire de punere în soluție
V2	Fgn Ni-Cu EN -GJS-450-10	-	X	Călire izotermă

2.4.3.1 Variantă experimentală de utilizare a energiei solare în studiul comportamentului tribologic al oțelurilor inoxidabile EN 1.4136 respectiv EN 1.4848 (Varianta V1)

Tratamentele termice efectuate cu energie solară, specifice oțelurilor inoxidabile EN 1.4136 aliat cu Ni-Cu respectiv EN 1.4848 aliat cu Mo-Cu, conform variantei tehnologice V1, s-au desfășurate în cadrul Centrului Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES), Font-Romeu-Odeillo (Franța), utilizându-se un cuptor solar cu o putere de aproximativ 1 kW, cu ax vertical (Medium Size Solar Furnaces).

Epruvetele utilizate în experiment din cele două marci de oțel: En 1.4136 și En 1.4848 au avut toate aceeași dimensiune și anume: diametrul $\varnothing 10$ mm și grosimea de 5 mm (fig. 2.44).

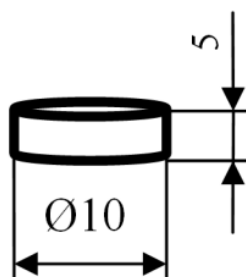


Fig. 2.44 Epruvete din oțel inoxidabil pentru determinarea comportamentului tribologic

Epruvetele (câte două din fiecare marcă de oțel) au fost supuse unui tratament termic de "călire de punere în soluție" (vezi fig. 2.12) specific variantei tehnologice V1, conform datelor prezentate tabelul 2.14.

Tabelul 2.14 Parametrii tehnologici specifici variantei experimentale V1 aplicată oțelurilor inoxidabile EN 1.4136 și EN 1.4848

Material	Lot	Energia utilizată	Tratament termic			
			τ_i [min]	t_A [°C]	τ_A [min]	mediu răcire
EN 1.4136	A	Solară	20	1050	7	apă
	B		33		21	
EN 1.4848	A		20		7	
	B		33		21	

unde:

τ_i este timpul de încălzire în cuptorul solar până la temperatura de austenitizare, [min];

t_A este temperatura de austenitizare, [°C];

τ_A este timpul de menținere la temperatura de austenitizare, [min];

Ciclogramele de încălzire specifice variantei tehnologice (V1) au fost determinate cu ajutorul unui termocuplu de tip "k" poziționat la partea inferioară a epruvetelor. Temperatura a fost măsurată de termocuplu prin contact cu epruveta, iar achiziția datelor s-a realizat cu un sistem Data Logger EL-GFX-DTC with Graphic Screen (vezi fig. 2.10). În figurile 2.45 și 2.46, sunt prezentate ciclogramele specifice variantei tehnologice V1 conform loturilor A și B.

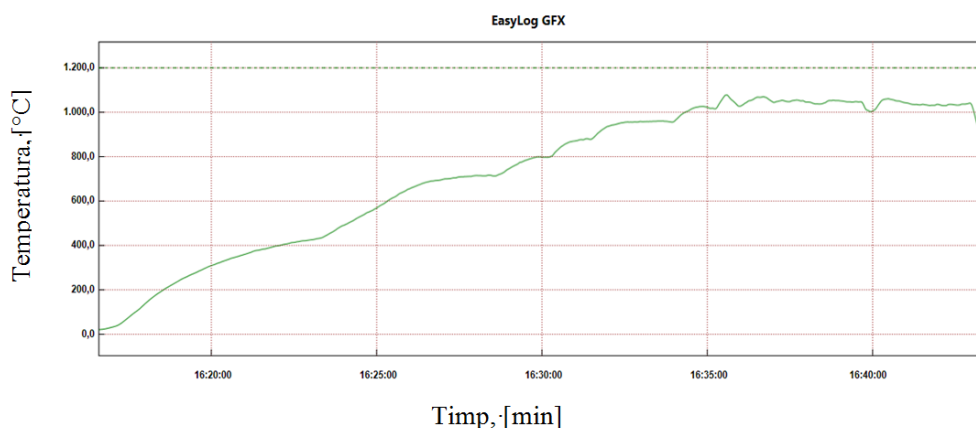


Fig. 2.45 Diagrama specifică a tratamentului termic de "călire de punere în soluție" aplicat epruvetelor din oțel inoxidabil, Lot A: $\tau_i = 20$ min., $\tau_A = 7$ min

Conform datelor prezentate în figura 2.45, epruvetele din lotul A au fost încălzite într-un cuptor solar cu o viteză de încălzire cu valori între 0,5 și 1,5 °C/s. Valoarea radiației solare (Direct Normal Irradiance-DNI) a variat între 850 și 925 W/m². Timpul de încălzire până la temperatura de austenitizare a fost de aproximativ 20 de minute, iar temperatura de austenitizare a fost de 1050°C. La această temperatură epruvetele s-au menținut un timp de $\tau_A = 7$ minute, după care au fost răcite brusc, prin agitare în apă.

Diagrama specifică a tratamentului termic de "călire de punere în soluție" aplicat epruvetelor din lotul B este prezentată în figura 2.46.

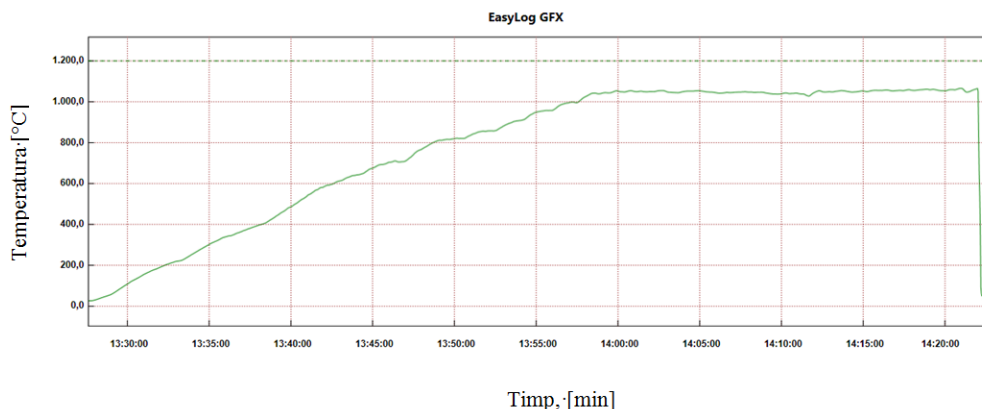


Fig. 2.46 Diagrama specifică a tratamentului termic de "călire de punere în soluție" aplicat epruvetelor din oțel inoxidabil, Lot B: $\tau_1 = 33$ min., $\tau_A = 21$ min

Conform datelor prezentate în figura 2.46, epruvetele din lotul B au fost încălzite într-un cuptor solar cu o viteză de încălzire cu valori între 0,3 și 0,6 °C/s, iar valoarea radiației solare (Direct Normal Irradiance-DNI) a variat între 850 și 925 W/m². Timpul de încălzire până la temperatura de austenitizare a fost de aproximativ 33 de minute, iar temperatura de austenitizare a fost de 1050°C. La temperatura de austenitizare, epruvetele s-au menținut un timp de $\tau_A = 21$ minute, după care au fost răcite brusc, prin agitare în apă.

2.4.3.2 Variantă experimentală de utilizare a energiei electrice în studiul comportamentului tribologic al Fgn EN -GJS-450-10 aliată cu Ni- Cu (Varianta V2)

Pentru determinarea comportamentului tribologic aplicat fontei cu grafit nodular Fgn EN -GJS-450-10 aliată cu Ni - Cu (Varianta V2), s-au prelevat un număr de 28 epruvete (fig. 2.47) [47].

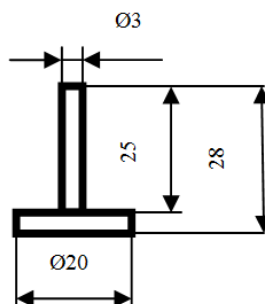


Fig. 2.47 Epruvetă Fgn EN -GJS-450-10 (Varianta V2), pentru determinarea comportamentului tribologic [43]

Epruvetele au fost supuse unui tratament termic de călire izotermă (fig. 2.48).

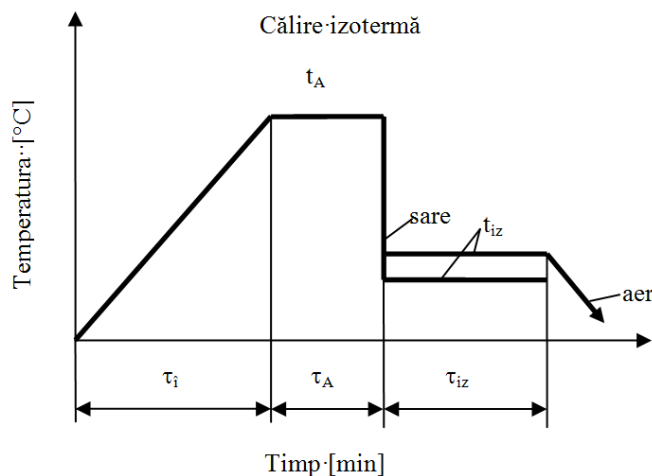


Fig. 2.48 Tratamentul termic de călire izotermă aplicat fontei cu grafit nodular de tip Fgn EN-GJS-450-10 aliată cu Ni -Cu (Varianta V2)

Conform datelor prezentate în figura 2.48, parametrii tratamentului termic de călire izotermă a epruvetelor din fontă în cuptorul electric, au fost:

- timpul de încălzire până la temperatura de austenizare, $\tau_i = 60$ [min];
- temperatura de austenizare la călirea clasică izotermă: $t_A = 900$ [°C], loturile A și B;
- timpul de menținere la temperatura de austenizare, $\tau_A = 30$ [min], pentru ambele loturi;
- menținerea izotermă s-a realizat în baie de sare (55 % KNO_3 + 45 % $NaNO_3$) cu temperatura de menținere de: $t_{iz} = 300^\circ C$ (lotul A) și $400^\circ C$ (lotul B);
- timpul de menținere în treaptă izotermă a fost: $t_{iz} = 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60$ [min], pentru ambele loturi;
- răcirea ulterioară s-a realizat în aer.

Tratamentele s-au desfășurat în cadrul Departamentului Știința Materialelor cu ajutorul unui cuptor tip "UTTIS" București.

2.4.4 Rezultate experimentale

2.4.4.1 Contribuții privind studiul coeficientul de frecare dinamic specific oțelurilor inoxidabile EN 1.4136 și EN 1.4848 (varianta tehnologică VI)

Cercetările cu privire la comportamentul tribologic al oțelurilor inoxidabile EN 1.4136 și EN 1.4848 s-a realizat în cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate

metalice, ceramice și compozite aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov.

După efectuarea tratamentului termic, epruvetele (câte două din fiecare marcă de oțel) au fost curățate ultrasonic în baie de etanol pentru îndepărtarea substanțelor de pe suprafață acestora și a nu influența rezultatele cercetării [14]. Pentru o analiză corectă și pentru o uniformizare a rezultatelor, cantitatea de material îndepărtată de pe suprafața probelor a fost raportată la distanța parcursă de către cupla de frecare (sfera de oțel) pe perioada determinării în cauză.

Studiul comportamentului tribologic specific oțelurilor inoxidabile s-a efectuat cu ajutorul tribometrului rotativ (vezi fig. 2.41).

Parametrii tribologici:

Modulul tribometric: Versiunea 4.4.K

- viteza liniară: 10.00 [cm/s];
- sarcina aplicată cuplei de frecare: 5 [N];
- distanța D (stop condit.): 20 [m];
- frecvența de achiziție: 10 [hz];
- raza urmei de uzare: 3,5 [mm].

Partener static în determinări:

- cupla de frecare: bilă Si₃N₄ cu diametru de 6 mm;
- s-a curățat înaintea determinărilor cu: Etanol.

Epruvetele:

- realizate din oțel inoxidabil: EN 1.4136 și EN 1.4848 (vezi fig. 2.44);
- s-au curățat înaintea determinărilor cu: Isopropanol.

Mediu de lucru:

- Temperatura : 24.00 [<deg>C];
- Umiditatea relativă: 32.00 [%].

Pentru fiecare marcă de oțel în parte (EN 1.4136 respectiv EN 1.4848) s-au realizat determinări specifice loturilor A ($\tau_A = 7$ min) respectiv B ($\tau_A = 21$ min).

Valorile coeficientului de frecare dinamic și a coeficientului de frecare static, în funcție de parametrii tehnologici aplicați sunt prezentate în tabelul 2.15.

Tabelul 2.15 Valorile coeficienților de frecare statici și dinamici specifici oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848

Marca Oțel	Proba	Lot	τ_A [min]	Coeficienți de frecare dinamici, μ			
				μ_{\min}	μ_{\max}	μ_{mediu}	Abaterea standard
EN 1.4136	1	A	7	0,216	0,802	0,585	0,106
	2	B	21	0,128	0,580	0,304	0,161
EN 1.4848	3	A	7	0,107	0,744	0,633	0,047
	4	B	21	0,164	0,857	0,658	0,169

În figurile 2.49 și 2.50 este prezentată variația coeficientului de frecare funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului inoxidabil EN 1.4136.

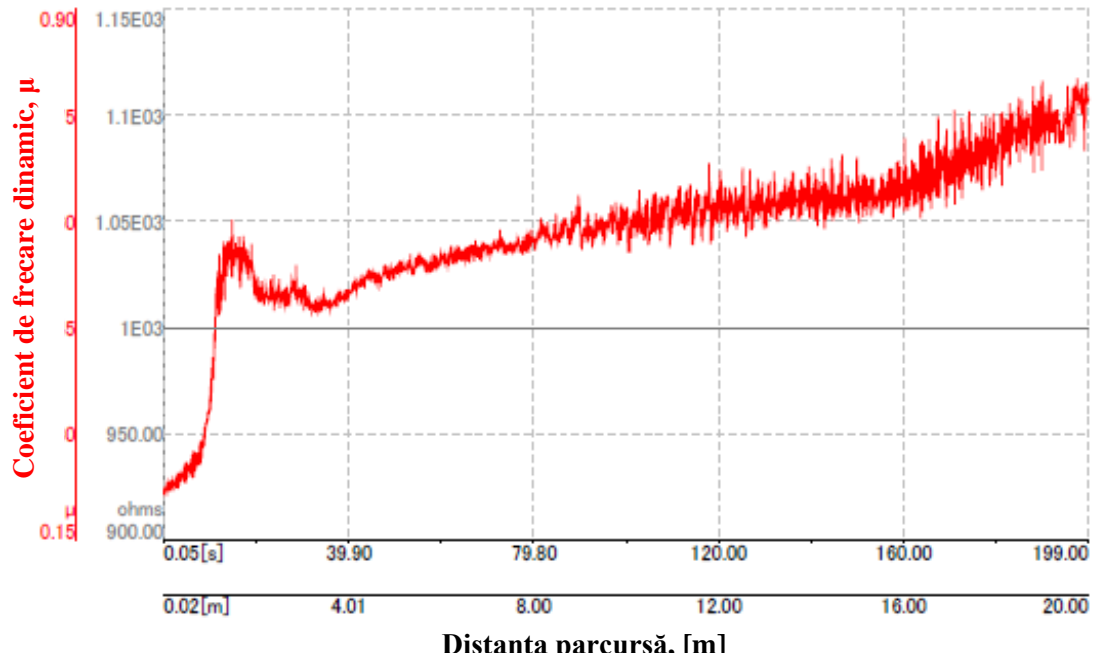


Fig. 2.49 Variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului EN 1.4136 (Lot A; $\tau_A = 7$ minute)

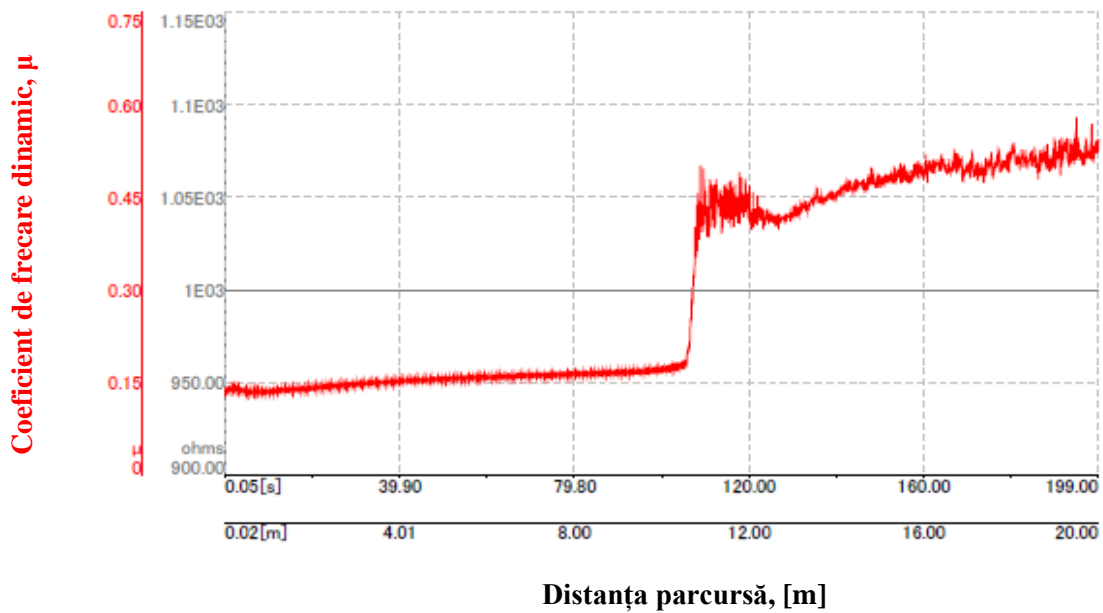


Fig. 2.50 Variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului EN 1.4136 (Lot B; $\tau_A = 21$ minute)

În figurile 2.51 și 2.52 este prezentată variația coeficientului de frecare funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului inoxidabil EN 1.4848.

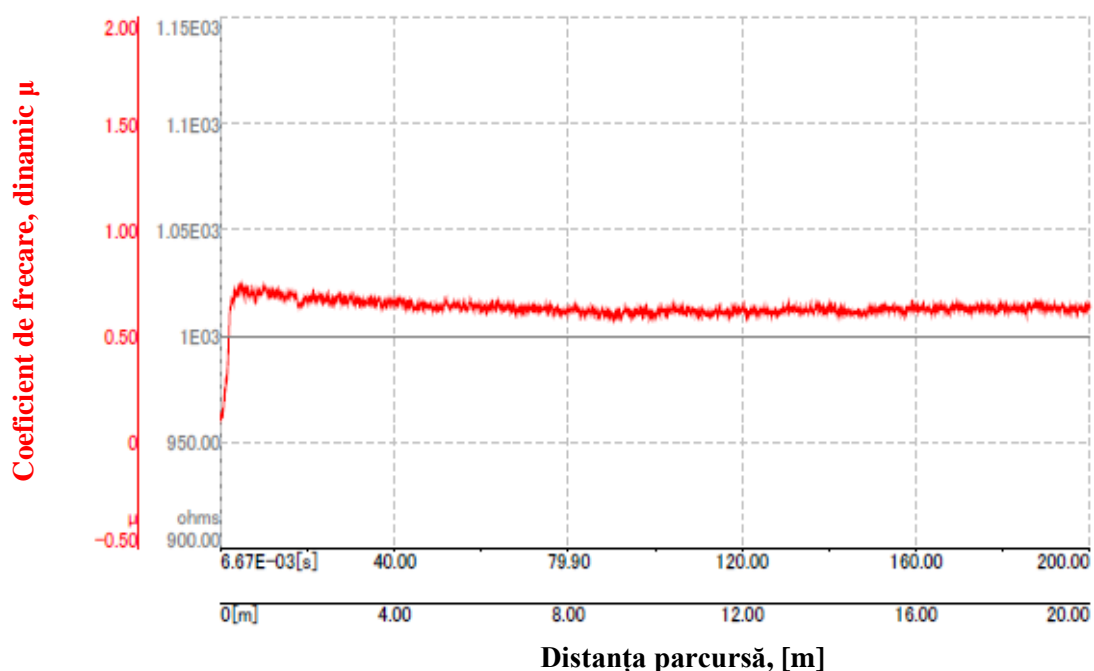


Fig. 2.51 Variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului EN 1.4848 (Lot A; $\tau_A = 7$ minute)

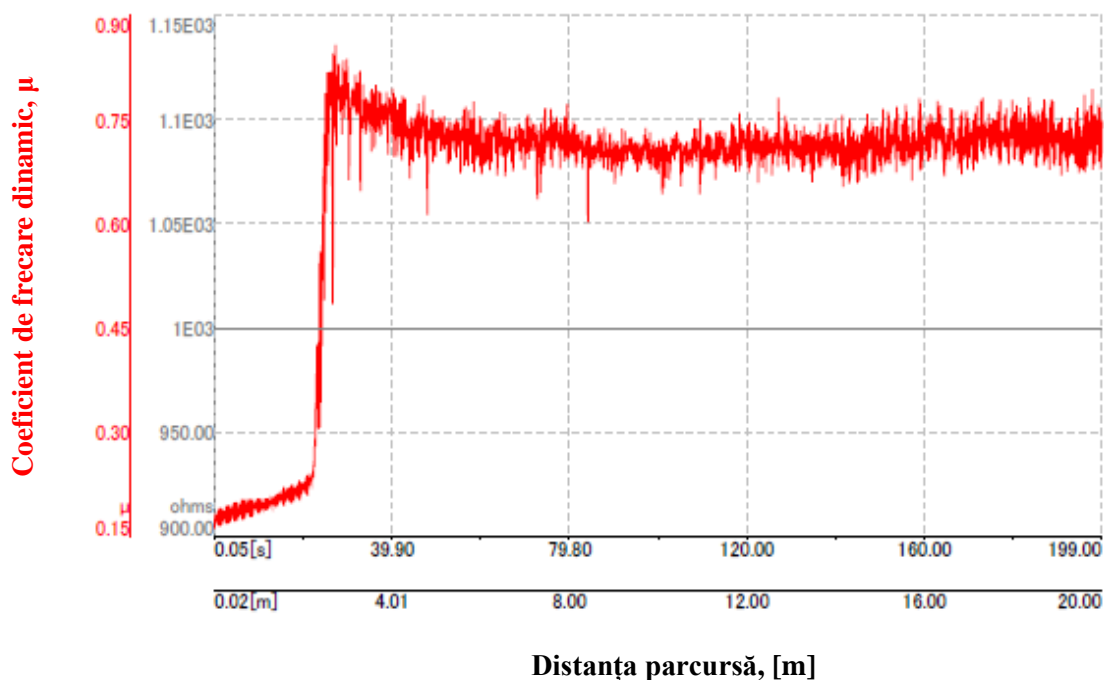


Fig. 2.52 Variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului EN 1.4848 (Lot B; $\tau_A = 21$ minute)

În figurile 2.53- 2.57, sunt prezentate prin comparație, variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă pentru oțelurile inoxidabile EN 1.4136 respectiv EN 1.4848, la timpuri de menținere la austenitizare $\tau_A = 7$ minute (lot A) și $\tau_A = 21$ minute (lot B), la o raza de lucru a cuplei de frecare de 3,5 mm.

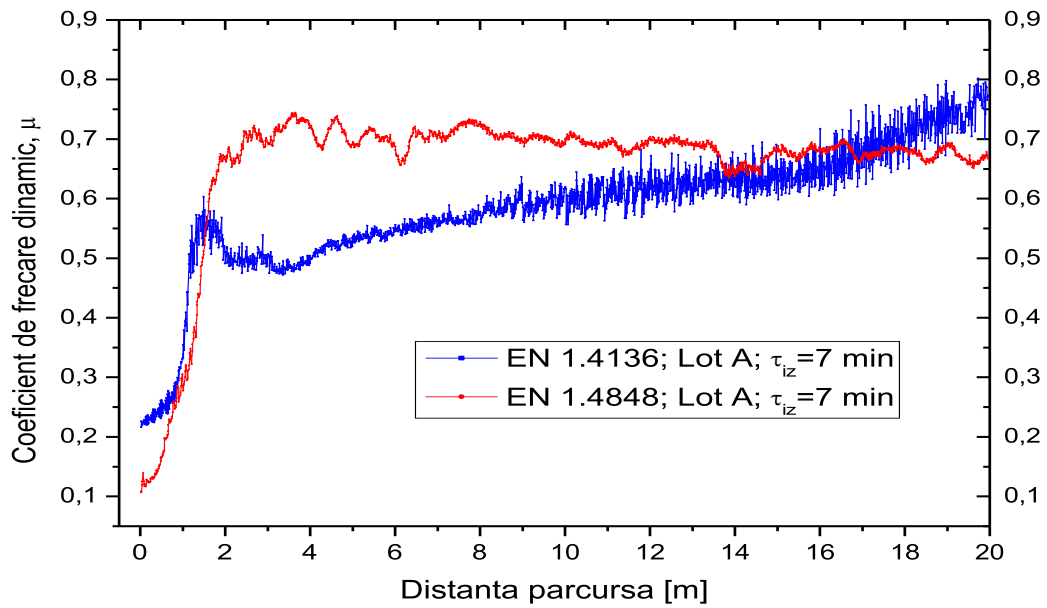


Fig. 2.53 Comparație privind variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 (Lot A; $\tau_A = 7$ min)

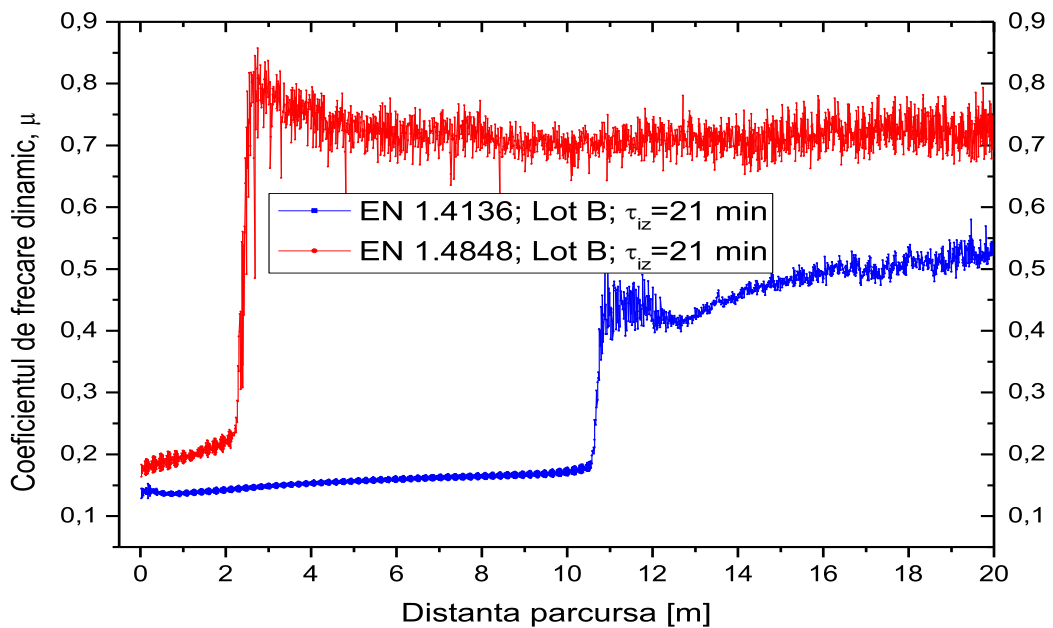


Fig. 2.54 Comparație privind variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 (Lot B; $\tau_A = 21$ min)

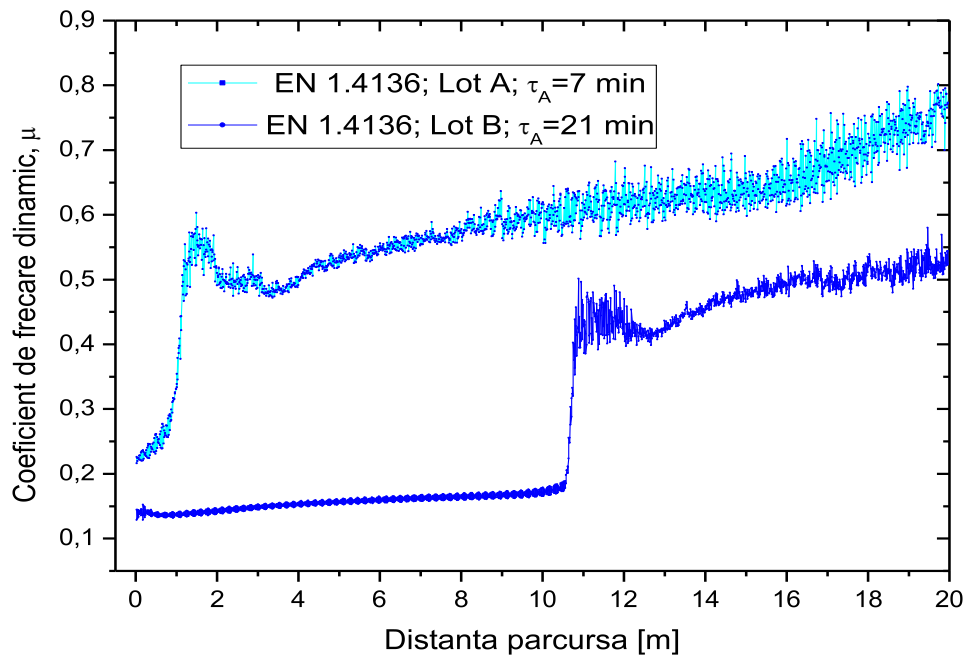


Fig. 2.55 Comparație privind variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului EN 1.4136
(Lot A; $\tau_A = 7$ min; Lot B; $\tau_A = 21$ min)

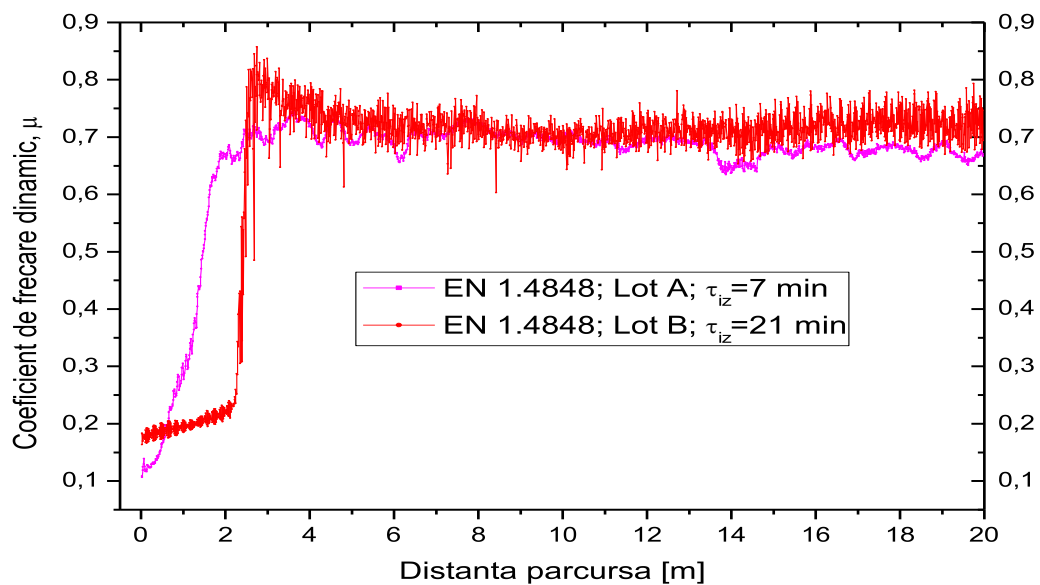


Fig. 2.56 Comparație privind variația coeficientului de frecare dinamic funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelului EN 1.4848
(Lot A; $\tau_A = 7$ min; Lot B; $\tau_A = 21$ min)

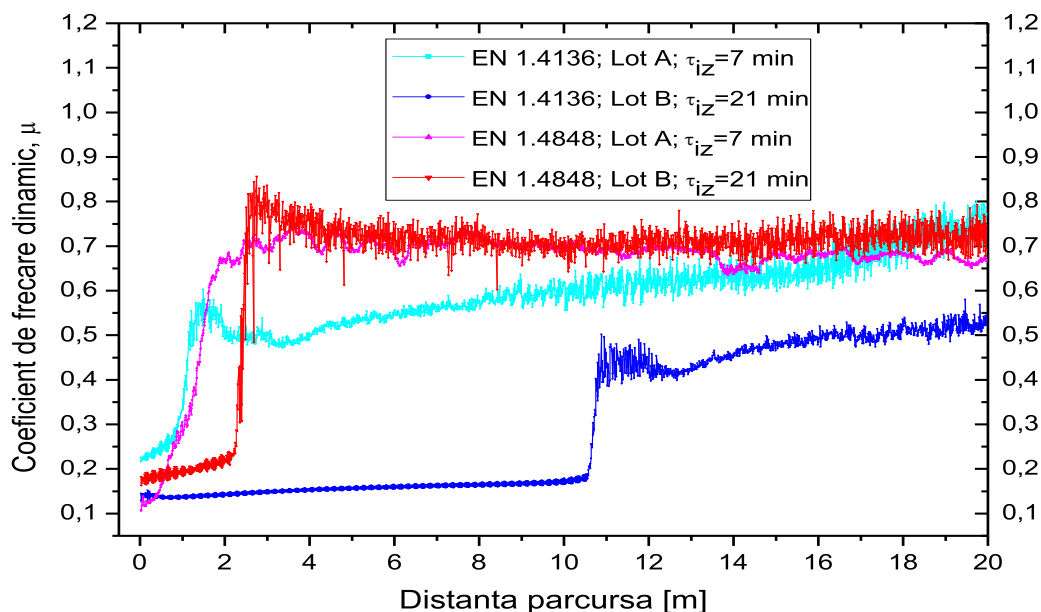


Fig. 2.57 Comparație privind variația coeficientului de frecare dinamic în funcție de distanța parcursă în timpul experimentelor în cazul oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 (lot A; $\tau_A=7$ min; lot B; $\tau_A=21$ min)

Analizând datele prezentate în tabelul 2.15. și în figurile 2.49 - 2.57, se pot trage următoarele concluzii referitoare la evoluțiile coeficientului de frecare dinamic pe parcursul testelor de uzare:

- epruvetele din oțelul EN 1.4136, lot A ($\tau_A = 7$ min) au o valoare mai scăzută a coeficientului de uzare dinamic (μ) comparativ cu epruvetele din oțelul EN 1.4848 (lot A). Această valoare este mai scăzută pentru o distanță de aproximativ 17 metri din distanța totală de 20 metri a deplasării cuplei de uzare în cadrul experimentelor (vezi fig. 2.53);

- epruveta din oțelul EN 1.4848, lot B ($\tau_A = 21$ min) are o creștere bruscă a coeficientului de uzare dinamic (μ) chiar de la începutul experimentelor, comparativ cu valoarea scăzută a aceluiași coeficient, în cazul epruvetei oțelului EN 1.4136, lot B. Mai mult de jumătate din distanța totală de 20 metri specifici deplasării experimentale a cuplei de uzare, epruveta oțelului EN 1.4136 (lot B) are valoarea coeficientului de uzare $\mu < 0,2$ (vezi fig. 2.54), ceea ce indică o rezistență mai bună la uzare a acestui oțel, comparativ cu oțelul EN 1.4848 (lot B);

- epruveta din oțelul EN 1.4136, lotul B ($\tau_A = 21$ min) are valoarea coeficientului de uzare dinamic, $\mu_{\text{mediu}} = 0,304$, mult mai scăzută decât valoarea lotului A ($\tau_A = 7$ min) a aceluiași oțel, $\mu_{\text{mediu}} = 0,585$, fapt remarcat în tabelul 2.15 și figura 2.55;

- valorile coeficienților de frecare pentru ambele loturi (A și B) ale oțelului EN 1.4848., au aproximativ aceleași valori $\mu_{\text{mediu}} = 0,633$ (lot A) respectiv $\mu_{\text{mediu}} = 0,658$ (lot B), fapt remarcat în tabelul 2.15 și figura 2.56;

- oțelul inoxidabil EN 1.4136 are valoarea mai scăzută a coeficientului de frecare dinamic pentru ambele loturi de încercare (Lot A; $\tau_A = 7$ min; Lot B; $\tau_A = 21$ min) comparativ cu valorile similare în cazul oțelului inoxidabil EN 1.4848, acest influență fiind datorată constituenților structurali mai duri (vezi tabelul 2.15 și figura 2.57).

După tratamentul termic de "călire de punere în soluție", structurile celor două oțeluri inoxidabile pot avea următoarea alcătuire:

- structura oțelului inoxidabil EN 1.4136, poate fi alcătuită din ferită ($Fe\alpha$), carburi complexe de tipul $M_{23}C_6$ ($CrFeMo$) $_{23}C_6$ și un procent scăzut de martensită (provenit de la transformarea austenitei la răcirea rapidă în apă). Carburile (de dimensiuni mai reduse decât la structura brut turnată) pot fi dispuse atât în lanțuri sau în formații cu caracter eutectic la limitele grăunților de ferită cât și în aglomerări de particule de carburi fine, complexe, situate în interiorul grăunților de ferită. Această structură realizează o durificare a materialului, duritatea medie a acestuia fiind de aproximativ 46,9 HRC \approx 470 HV₁₀₀ pentru lotul A ($\tau_A = 7$ min) și 49,1 HRC \approx 500 HV₁₀₀ pentru lotul B ($\tau_A = 21$ min). Și în acest caz, valoarea durității reprezintă media aritmetică a șapte determinări efectuate pe material fiecare epruvetă în parte. Durificarea mai pronunțată în cazul lotului B ($\tau_A = 21$ min) poate fi explicată datorită timpului de menținere mai mare care în acest caz favorizează o precipitare mai însemnată a carburilor de crom în ferită (comparativ cu procesul de precipitare a carburilor în cazul lotului A, $\tau_A = 7$ min), ceea ce explică valorile specifice coeficientului de frecare dinamic (vezi fig. 2.55) cât și comportarea la uzare a fiecărui lot în parte [64, 89, 93, 127];

- structura oțelului inoxidabil EN 1.4848, poate fi alcătuită din austenită înalt aliată cu Cr și ferita δ ($Fe\delta$) precipitată interdendritic. Această structură conduce la valori mai scăzute ale durității, duritatea medie fiind de aproximativ 33 HRC \approx 327 HV₁₀₀ pentru lotul A ($\tau_A = 7$ min) și 35 HRC \approx 345 HV₁₀₀ pentru lotul B ($\tau_A = 21$ min); (valoarea durității reprezintă media aritmetică a șapte determinări efectuate pe material) [70, 95, 99]. Valorile mai scăzute ale durității oțelului EN 1.4848 comparativ cu cele ale oțelului EN 1.4136, explică obținerea unor valori mai mari ale coeficientului de frecare dinamic (vezi fig. 2.53 și 2.54) ceea ce induce implicit o mai scăzută rezistență la uzare a oțelului EN 1.4848 comparativ cu cele ale oțelului EN 1.4136;

- comportamentul mai bun la uzare al oțelului EN 1.4136 decât cel al oțelului EN 1.4848. este confirmat și de valorile medii ale coeficientului de frecare dinamic (μ) care sunt cuprinse între 0,304 (lot B) și 0,585 (lot A) în timp ce valorile aceluiasi parametru pentru oțelul EN 1.4848 sunt cuprinse între 0,633 (lot A) și 0,658 (lot B);

- valorile experimentale ale coeficientului de frecare dinamic prezentate în cadrul tezei, sunt în concordanță cu cercetările din acest domeniu [64, 89, 93, 115, 119, 127].

2.4.4.2 Contribuții privind studiul coeficientului de uzură specific oțelurilor inoxidabile EN 1.4136 și EN 1.4848 (varianta tehnologică V1)

Cercetările cu privire la comportamentul tribologic al epruvetelor din oțelurile inoxidabile EN 1.4136 și EN 1.4848 s-au realizat în cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov.

Studiul comportării la uzare (uzare abrazivă) în cazul acestor oțeluri inoxidabile s-a efectuat cu ajutorul unui tribosistem bilă-disc, de tipul CSM Instruments (vezi fig. 2.41).

Bilele utilizate au fost din nitrură de siliciu având diametrul de 6 mm [14, 26]. În timp ce piesa se află în mișcare de rotație pe suportul special, forțele de frecare care apar între probă și bilă sunt măsurate cu ajutorul unui senzor LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Acest senzor este un traductor electromecanic care transformă deplasarea într-un semnal electric corespunzător care măsoară forța tangențială și furnizează apoi (cunoscând forța de apăsare normală) coeficientul dinamic de frecare. În acest caz frecvența de achiziție a datelor a fost de 5Hz.

Parametrii tehnologici sunt aceiași ca la determinarea indicelui de frecare dinamic (vezi paragraful 2.4.4.1). Sarcina aplicată a fost tot de 5 [N], iar distanța pe care s-a realizat încercarea a fost de 20 m.

Viteza de uzare medie este calculată în funcție de volumul de material pierdut în timpul testelor de uzare. Această metodă permite determinarea atât a comportamentului la uzare cât și a coeficienților dinamici de frecare.

Determinarea secțiunii urmei de uzare s-a realizat cu ajutorul unui profilometru Taylor-Hobson.

În figurile 2.58 - 2.61, sunt prezentate profilele urmelor de uzare pentru cele 2 oțeluri studiate (EN 1.4136 și EN 1.4848) pentru epruvetele lotului A (cu timpul de menținere la austenitizarea tratamentul termic de "călire de punere în soluție", de: $\tau_A=7$ minute) respectiv pentru lotul B ($\tau_A=21$ minute).

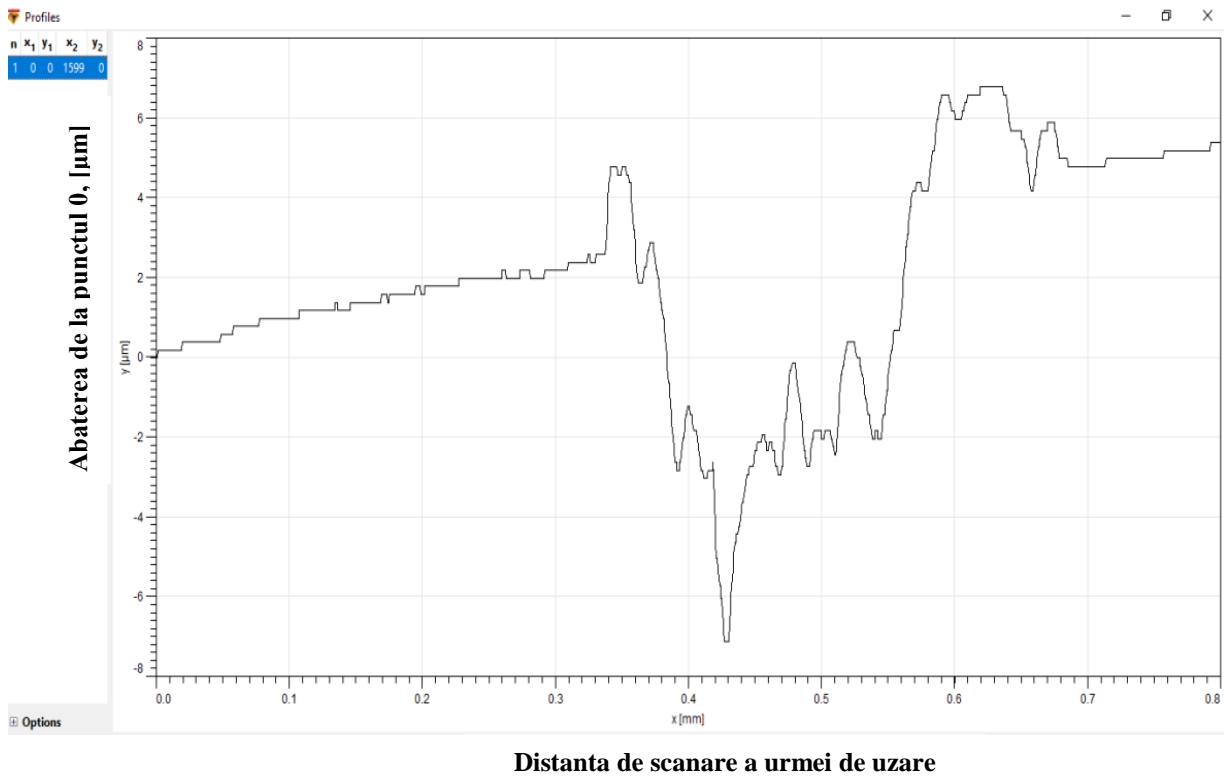


Fig. 2.58 Profilul urmei de uzare în cazul epruvetei din oțel EN 1.4136, Lot A: $\tau_A=7$ min (abaterea de la suprafața plană a piesei, funcție de distanța de scanare a urmei de uzare)

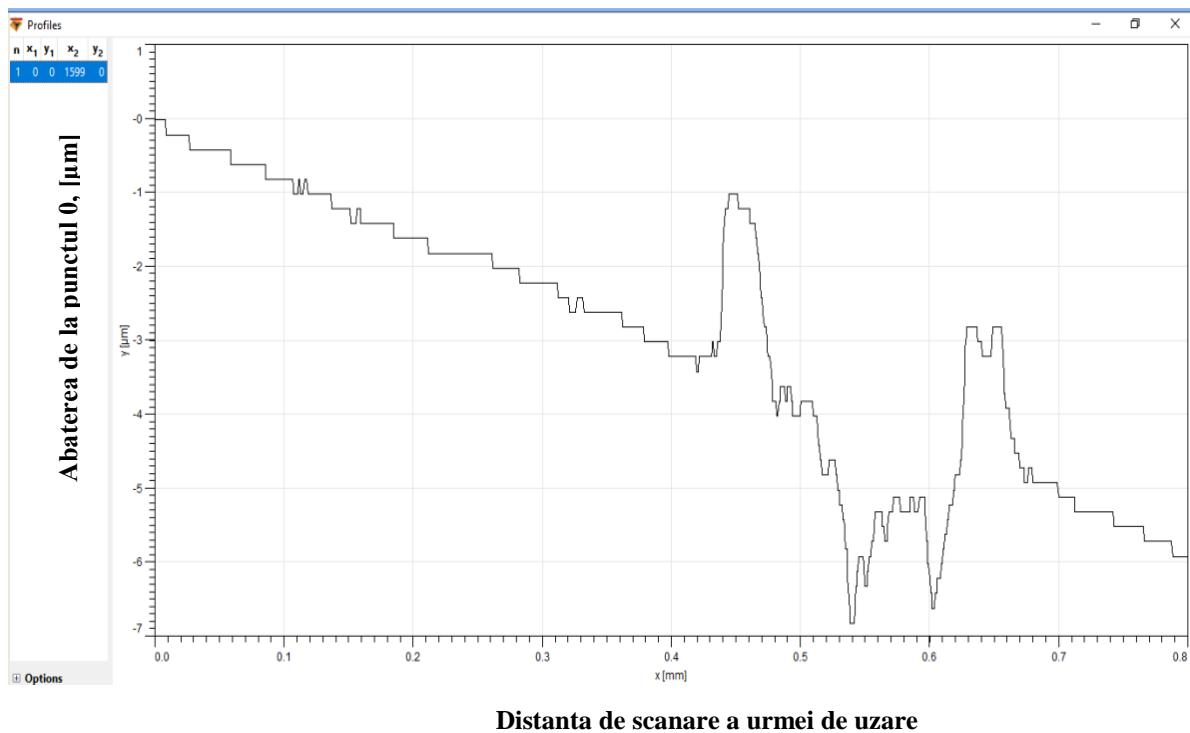
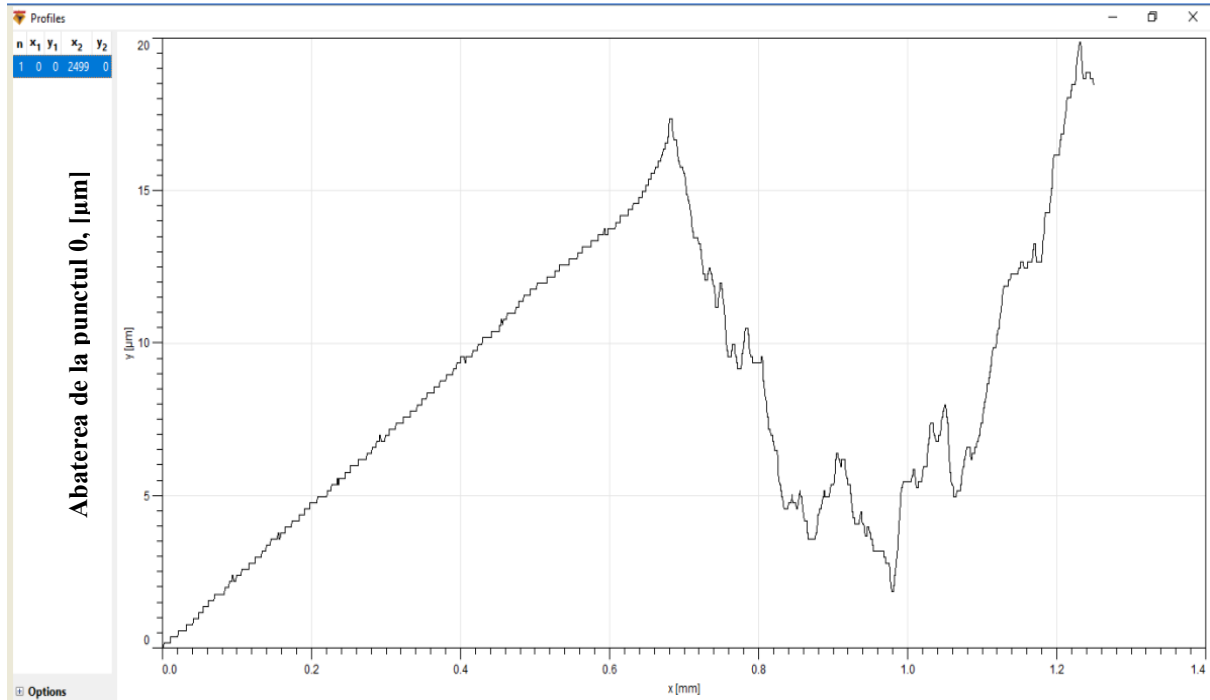
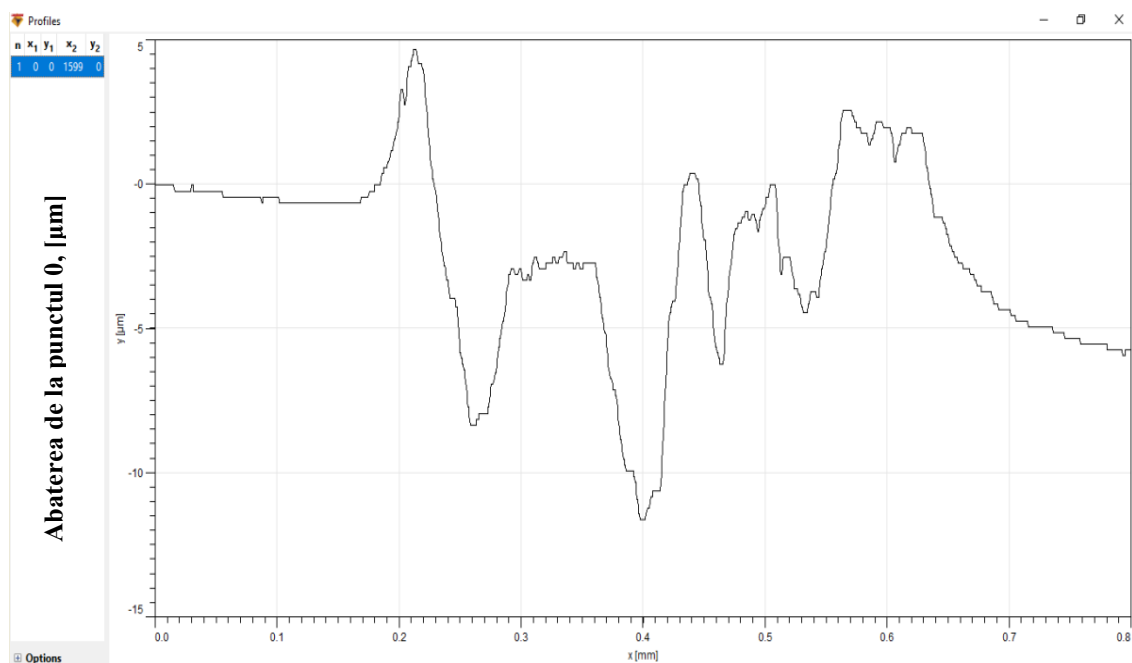


Fig. 2.59 Profilul urmei de uzare în cazul epruvetei din oțel EN 1.4136, Lot B: $\tau_A=21$ min (abaterea de la suprafața plană a piesei, funcție de distanța de scanare a urmei de uzare)



Distanța de scanare a urmei de uzare

Fig. 2.60 Profilul urmei de uzare în cazul epruvetei din oțel EN 1.4848, Lot A: $\tau_A=7$ min (abaterea de la suprafața plană a piesei, funcție de distanța de scanare a urmei de uzare)



Distanța de scanare a urmei de uzare

Fig. 2.61 Profilul urmei de uzare în cazul epruvetei din oțel EN 1.4848, Lot B: $\tau_A=21$ min (abaterea de la suprafața plană a piesei, funcție de distanța de scanare a urmei de uzare)

Analizând profilele urmelor de uzare specifice epruvetelor celor două mărci de oțeluri, se remarcă o observație generală și anume: toate probele se uzează în urma testului, fapt semnalat de adânciturile prezente în fiecare profil al urmei de uzare ale epruvetelor. Cele mai mari abateri de la punctul "0" prin comparație, sunt observate la epruveta din oțelul EN 1.4848.lot B ($\tau_A=21$ min) care are valori de aproximativ $-12 \mu\text{m}$ (vezi fig. 3.61.).

Cu ajutorul profilometrului Taylor-Hobson și a softului acestuia, sunt calculate toate secțiunile urmei de uzare rezultând volumul de material uzat (ΔV) specific epruvetelor analizate, ținând cont de sarcina aplicată și distanța testului. Cu datele obținute în cadrul experimentelor și cu ajutorul relației (2.11) s-a determinat coeficientul de uzare "k". Datorită posibilității de apariție a uzurii neuniforme pe fiecare probă în parte s-a determinat aria profilului de uzare în cel puțin 3 puncte distincte. Valorile medii ale acestuia sunt prezentate în tabelul 2.16.

Tabelul 2.16 Valorile medii ale coeficientului de uzură funcție de parametrii tehnologici

Marca oțel	Proba	Lot	τ_A [min]	Coeficient de uzură, k_{mediu} [mm ³ /Nm] x 10 ⁻⁴
EN 1.4136	1	A	7	1,1625
	2	B	21	0,7108
EN 1.4848	3	A	7	3,992
	4	B	21	5,269

Variația coeficientului de uzură (k_{mediu}) în funcție de parametrii tehnologici ai experimentelor, este prezentată în figura 2.62.

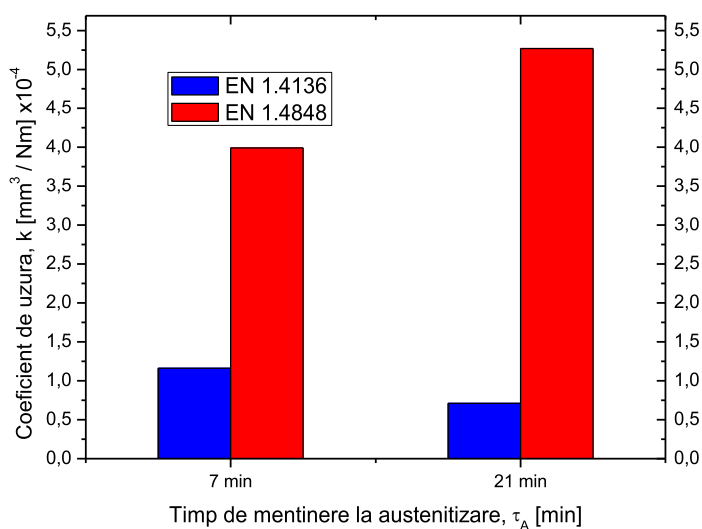


Fig. 2.62 Variația coeficientului de uzură în funcție de parametrii tehnologici ai experimentelor

Analizând rezultatele prezentate în tabelul 2.16 și figura 2.62, se remarcă o observație generală și anume: epruvetele din oțelul EN 1.4136 au un coeficient de uzură mai redus decât epruvetele din oțelul EN 1.4848, rezultând faptul că oțelul EN 1.4136 are o rezistență la uzare mai bună decât oțelul EN 1.4848. Se remarcă faptul că valorile coeficient de uzură (k_{mediu}) specifice epruvetelor din oțelul EN 1.4136 sunt cuprinse între limitele 0,7108 și 1,1625 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$, în timp ce valorile coeficient de uzură (k_{mediu}) specifice epruvetelor din oțelul EN 1.4848, sunt cuprinse între limitele 3,992 și 5,269 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$. Această diferență de valori se datorează componentei structurale specifice fiecăruia oțel în parte (vezi paragraful 2.4.4.1).

Rezistența ridicată la uzare a oțelului EN 1.4136 este confirmată și de producători industriali [119], fapt prezentat în figura 2.63.

Din datele prezentate în figura 2.63 se remarcă comportamentul excelent privind rezistența la uzare în medii acide al oțelului EN 1.4136 folosit în construcția pompelor. Datorită specificului mediului în care pot fi utilizate, materialele folosite la construirea pompelor, trebuie să poseze valori superioare atât în ce privește rezistența la coroziune cât și la uzare prin frecare.

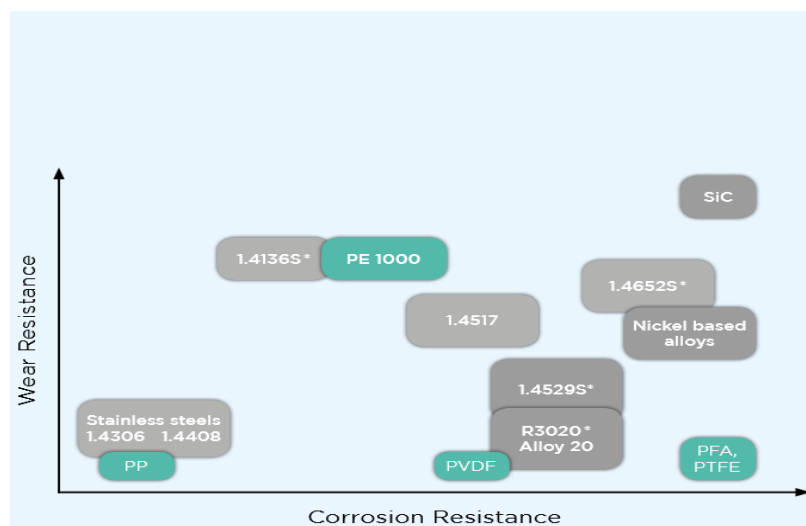


Fig. 2.63 Aplicații ale materialelor în atmosferă acidă [119]

Comparativ cu alte mărci de oțeluri, aliaje de nichel, cât și alte materiale plastice (PP, PVDF, PFA, PTFE), oțelul EN 1.4136S (S=special, aliat suplimentar cu Ni), prezintă valori superioare atât în ce privește rezistența la uzare prin frecare cât și rezistența la coroziune, fiind un material de bază în fabricarea pompelor.

2.4.4.3 Contribuții privind tehnici avansate de testare pentru determinarea caracteristicilor tribomecanice. Nanoindentarea

Nanoindentarea oferă informații despre duritatea (H_{IT}) și modulul de elasticitate (E_{IT}), folosind tehnici avansate de testare, asigurând astfel o soluție în determinarea caracteristicilor tribomecanice ale suprafeței unui material, fără nici un compromis [7]. Pe baza rezultatelor obținute prin nanoindentare (tehnică de caracterizare mecanică relativ non-distructivă) s-au putut obține informații valoroase în înțelegerea comportamentului mecanic al materialelor analizate. S-au realizat predicții [14, 26], care au completat cu date importante, caracterizarea materialelor cercetate, cu privire la:

- rezistența la uzare, prin determinarea raportului " H/E ";
- rezistența la deformare plastică, prin determinarea raportului " H^3/E^2 ";
- corelația dintre coeficientul de uzare " k " și nanoduritatea prin indentare " H_{IT} ".

În determinările microdurității și ale modulului de elasticitate în cazul aliajelor analizate (EN 1.4136 și EN 1.4848) s-a folosit un modul pentru nanoindentare, produs de către CSM Instruments - NHT-2 (vezi figura 2.43.) aflat în cadrul Centrului de Cercetare C08: Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov.

Prin încercarea de nanoindentare s-a măsurat adâncimea de pătrundere (h) a unui penetrator sub o forță aplicată cunoscută (F), pe parcursul unui ciclu de încercare (încărcare-descărcare), furnizându-se graficele curbelor încărcării corespunzător cu adâncimea de penetrare [14, 26]. Forța aplicată (F) și adâncimea de penetrare (h) pe tot parcursul unui ciclu încărcare-descărcare sunt măsurate în mod dinamic.

Nanoduritatea și modulul de elasticitate au fost calculate direct cu ajutorul unui soft specializat, pe baza curbei sarcină-deplasare (adâncime) specifică fiecărei încercări [14, 26, 32, 65-68]. Pe fiecare epruvetă analizată, s-au efectuat o serie de 5 măsurători, cu o diferență de poziționare a indentorului de 0,05 mm între acestea.

Parametrii specifici acestor determinări au fost:

Modulul pentru nanoindentare: NHT-2

- sarcina maximă de apăsare a indentorului: 250 [mN];
- viteza de încărcare: 500 [mN/min];
- viteza de descărcare: 500 [mN/min];
- frecvența de achiziție: 10.0 [hz].

Indentor:

- Tip: Berkovich, piramidă cu trei fețe;
- Material: diamant.

Epruvetele:

- realizate din oțel inoxidabil: EN 1.4136 și EN 1.4848.

Mediu de lucru:

- Temperatura: 24.00 [$^{\circ}$ C];
- Umiditatea relativă: 32.00 [%].

În figurile 2.64 - 2.66 este prezentată variația adâncimii de penetrare a indentorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare, curbele de sarcină încărcare/descărcare, cât și amprentele de indentare specifice oțelului EN 1.4136, corespunzătoare lotului A (cu timpul de menținere la austenitizarea tratamentului termic de "călire de punere în soluție", de: $\tau_A=7$ minute).

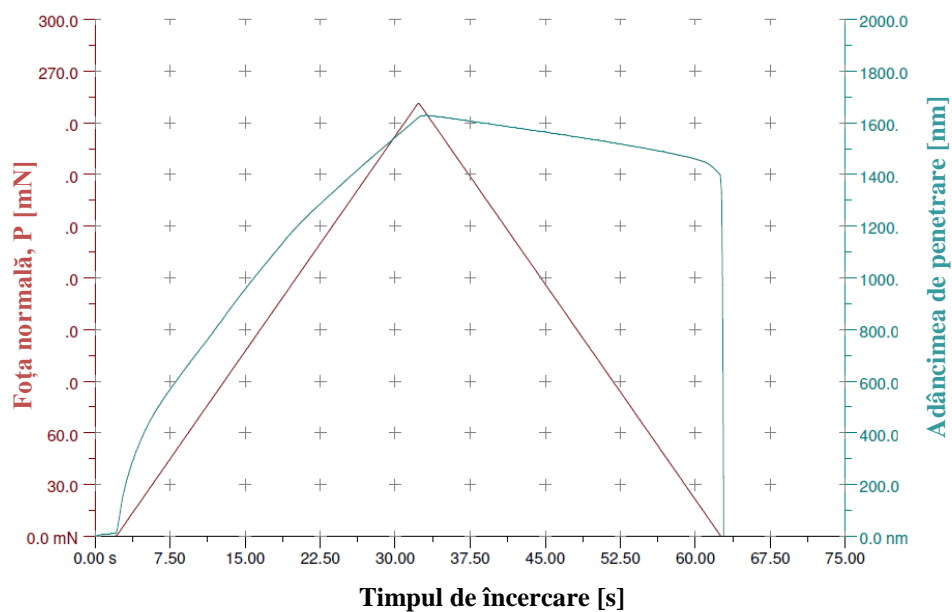


Fig. 2.64 Variația adâncimii de penetrare a indentorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare (oțel EN 1.4136, Lot A: $\tau_A=7$ min.)

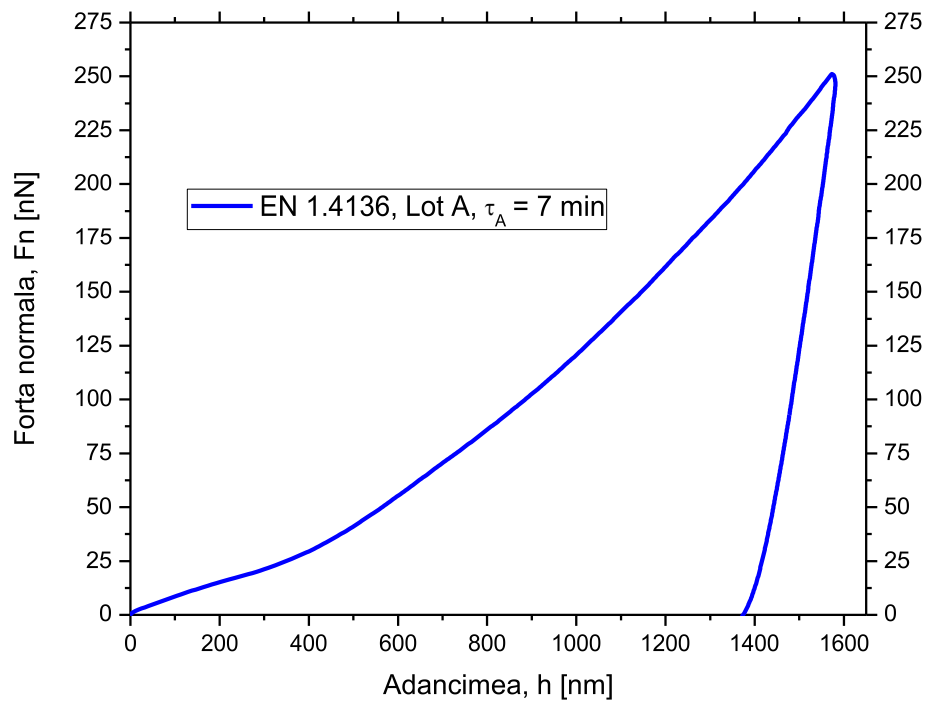


Fig. 2.65 Curba de sarcină încărcare/descărcare (oțel EN 1.4136, Lot A: $\tau_A = 7$ min.)

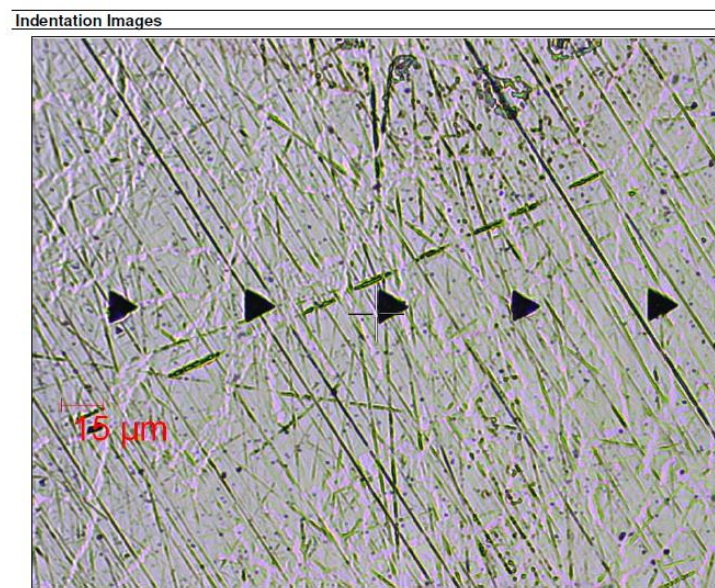


Fig. 2.66 Amprente de indentare (oțel EN 1.4136, Lot A: $\tau_A = 7$ min.)

În figurile 2.67 - 2.69, este prezentată variația adâncimii de penetrare a indentorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare, curbele de sarcină încărcare/descărcare cât și amprentele de indentare în cazul oțelului EN 1.4848, corespunzătoare

lotului A (cu timpul de menținere la austenitizarea tratamentului termic de "călire de punere în soluție", de: $\tau_A=7$ minute).

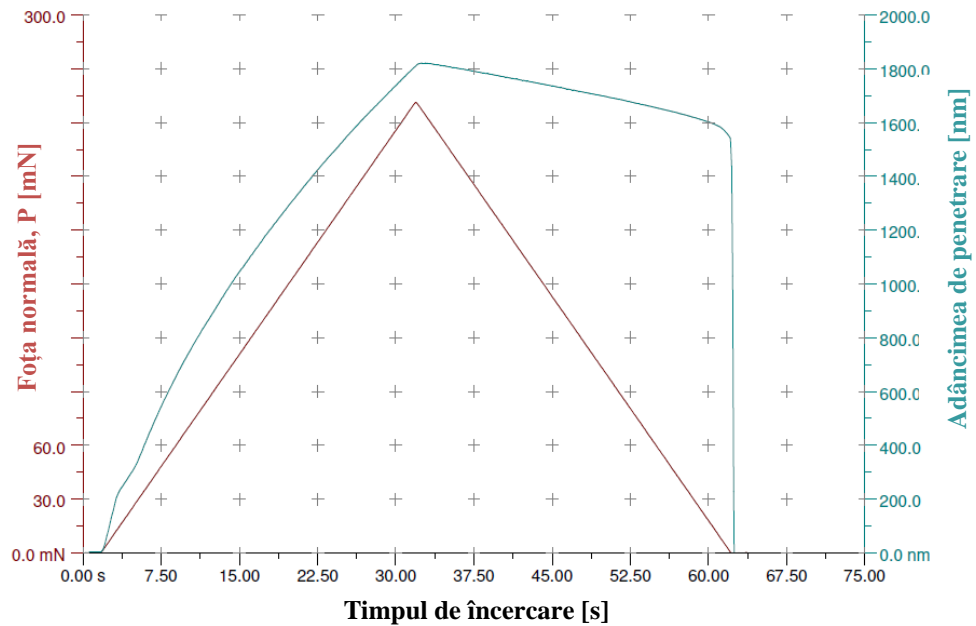


Fig. 2.67 Variația adâncimii de penetrare a indentorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare (oțel EN 1.4848, Lot A: $\tau_A=7$ min.)

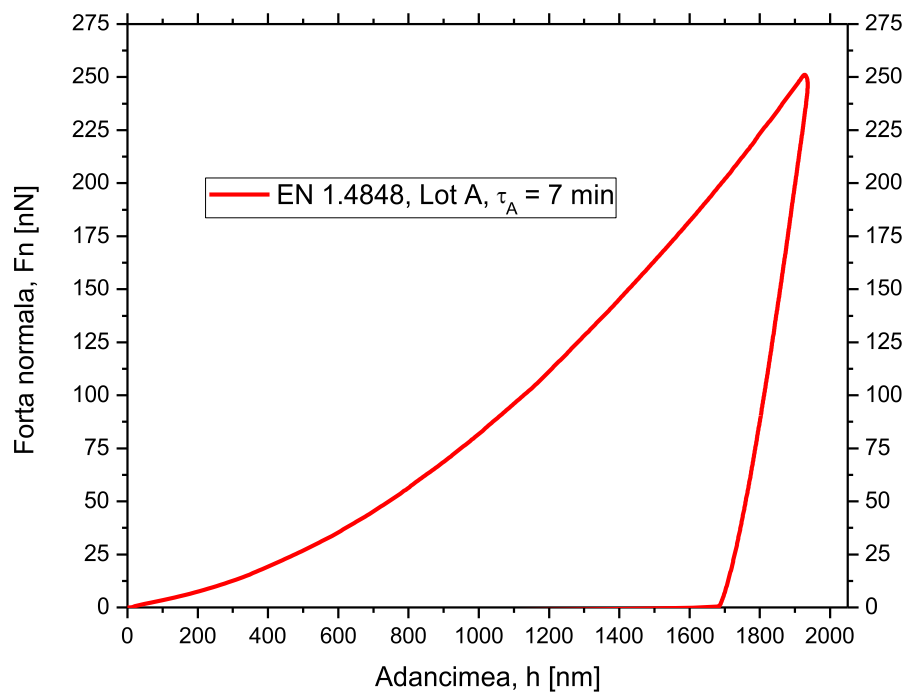


Fig. 2.68 Curba de sarcină încărcare/descărcare (oțel EN 1.4848, Lot A: $\tau_A=7$ min.)

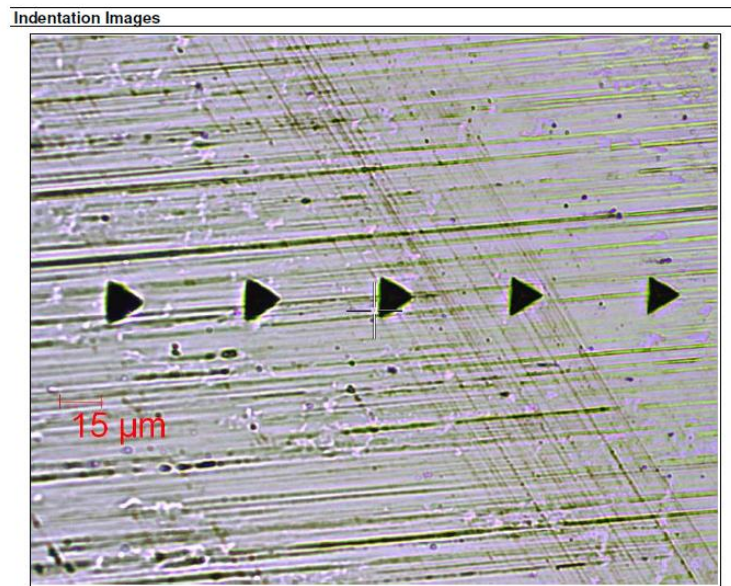


Fig. 2.69 Amprente de indentare (oțel EN 1.4848, Lot A: $\tau_A = 7$ min.)

În figura 2.70 se prezintă comparativ curba de sarcină încărcare/descărcare pentru ambele oțeluri studiate (EN 1.4136, EN 1.4848, Lot A: $\tau_A = 7$ min.)

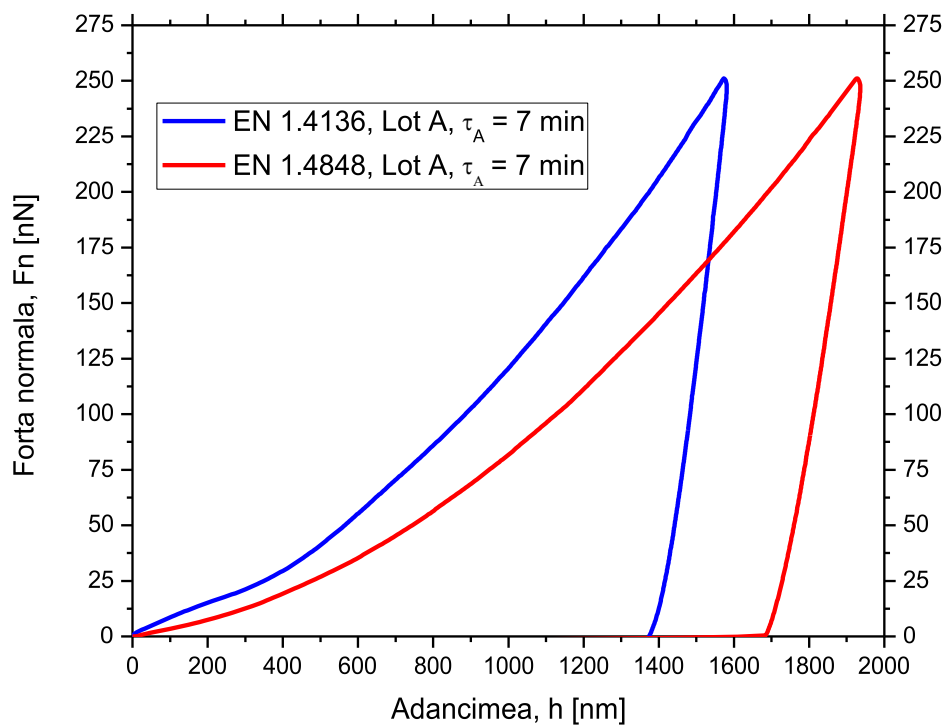


Fig. 2.70 Curba de sarcină încărcare/descărcare pentru ambele oțeluri studiate (EN 1.4136, EN 1.4848, Lot A: $\tau_A = 7$ min.)

Analizând rezultatele prezentate în figurile 2.64 - 2.70, se remarcă o observație generală și anume: epruvetele din oțelul EN 1.4136 au o adâncime de pătrundere a indentorului mai mică decât cea specifică oțelului EN 1.4848, ceea ce demonstrează faptul că EN 1.4136 are o duritate mai ridicată decât oțelul EN 1.4848, acest lucru explicându-se prin componența structurală a acestora (vezi paragraful 2.4.4.1).

În figurile 2.71 - 2.73 este prezentată variația adâncimii de penetrare a indentorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare, curbele de sarcină încărcare/descărcare cât și amprentele de indentare specifice oțelului EN 1.4136, corespunzătoare lotului B (cu timpul de menținere la austenitizarea tratamentului termic de "călire de punere în soluție", de: $\tau_A=21$ minute).

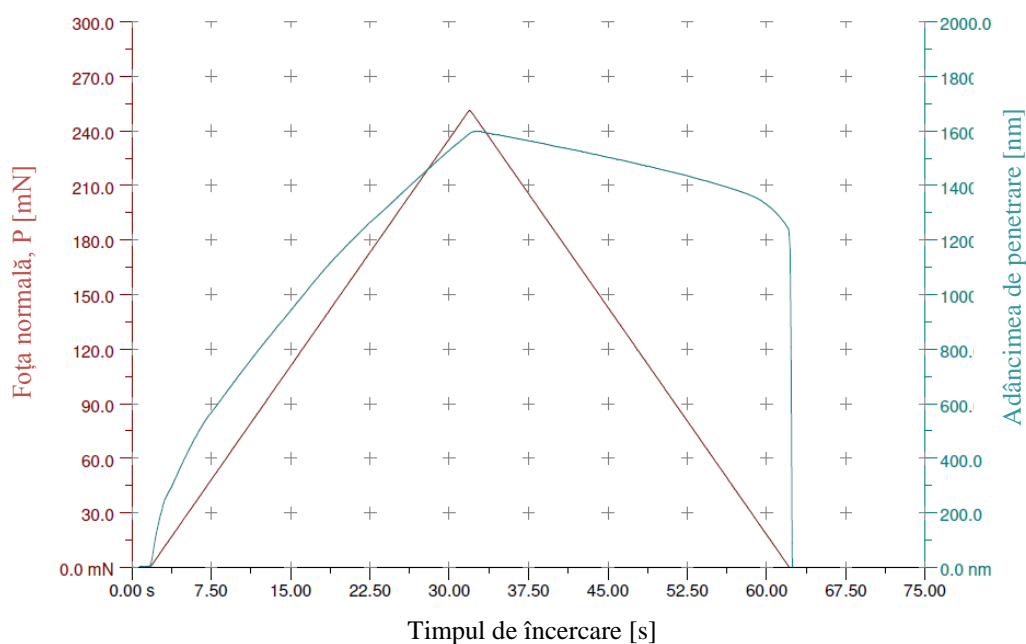


Fig. 2.71 Variația adâncimii de penetrare a indentorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare (oțel EN 1.4136, Lot B: $\tau_A=21$ min.)

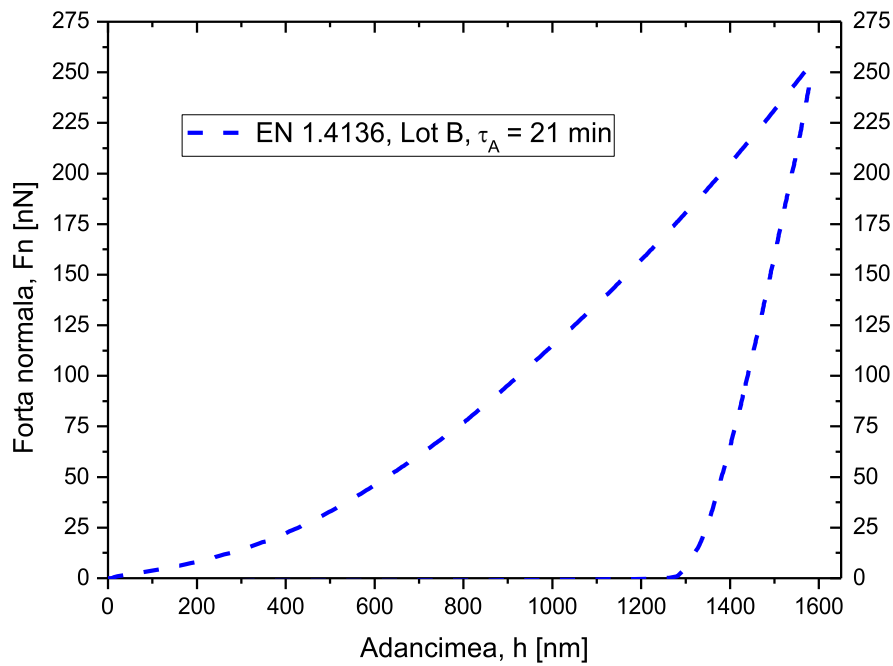


Fig. 2.72 Curba de sarcină încărcare/descărcare (oțel EN 1.4136, Lot B: $\tau_A = 21$ min.)

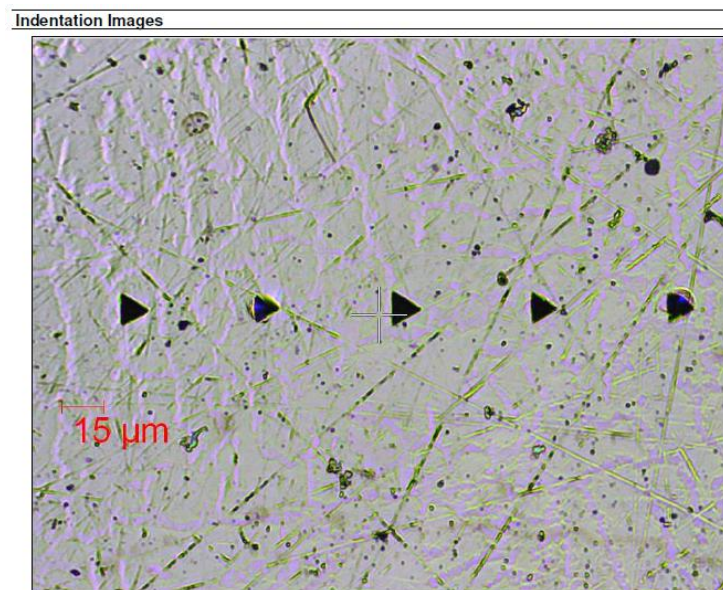


Fig. 2.73 Amprente de indentare (oțel EN 1.4136, Lot B: $\tau_A = 21$ min.)

În figurile 2.74 - 2.76, este prezentată variația adâncimii de penetrare a indectorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare, curbele de sarcină încărcare/descărcare cât și amprențele de indentare specifice oțelului EN 1.4848, corespunzătoare lotului B (cu timpul de menținere la austenitizarea tratamentului termic de "călire de punere în soluție", de: $\tau_A = 21$ minute).

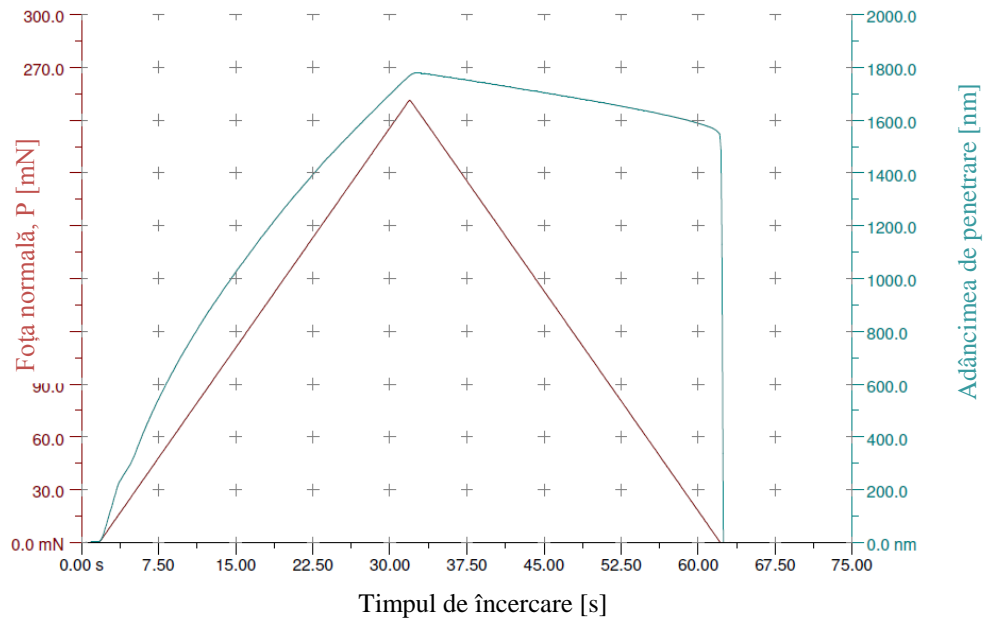


Fig. 2.74 Variația adâncimii de penetrare a indentorului în funcție de forța de apăsare normală și de timpul de încercare (oțel EN 1.4848, Lot B: $\tau_A = 21$ min.)

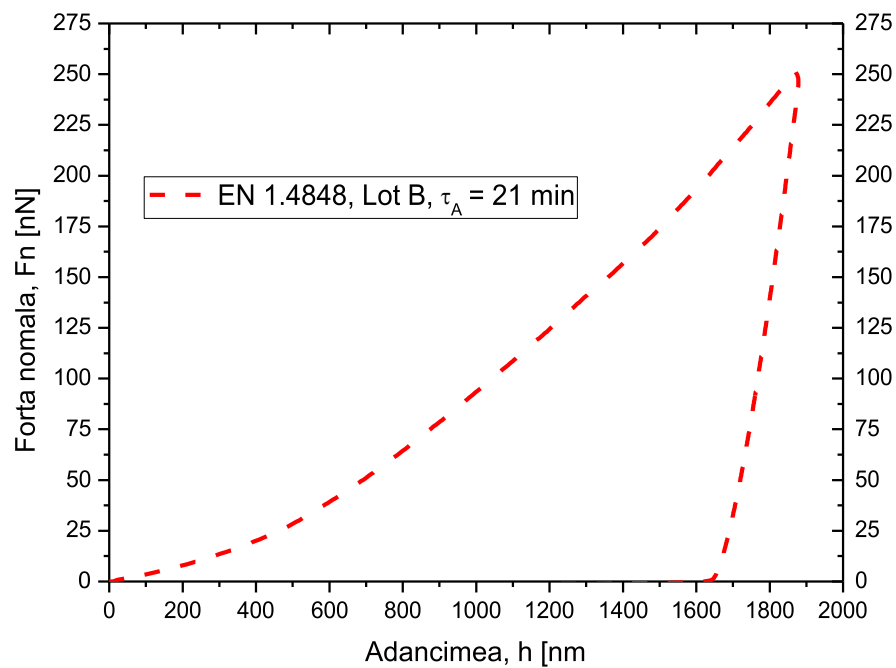


Fig. 2.75 Curba de sarcină încărcare/descărcare (oțel EN 1.4848, Lot B: $\tau_A = 21$ min.)

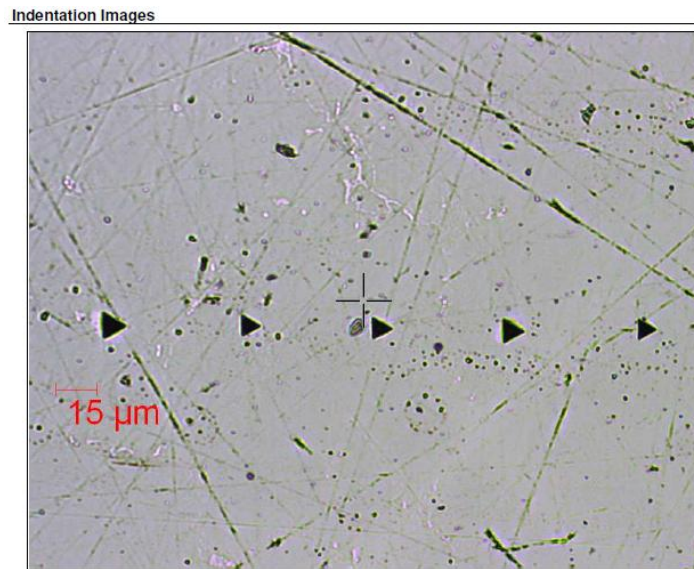


Fig. 2.76 Amprente de indentare (oțel EN 1.4848, Lot B: $\tau_A = 21$ min.)

În figura 2.77, se prezintă comparativ curbele de sarcină încărcare/descărcare pentru ambele oțeluri studiate (EN 1.4136, EN 1.4848, Lot B: $\tau_A = 21$ min.)

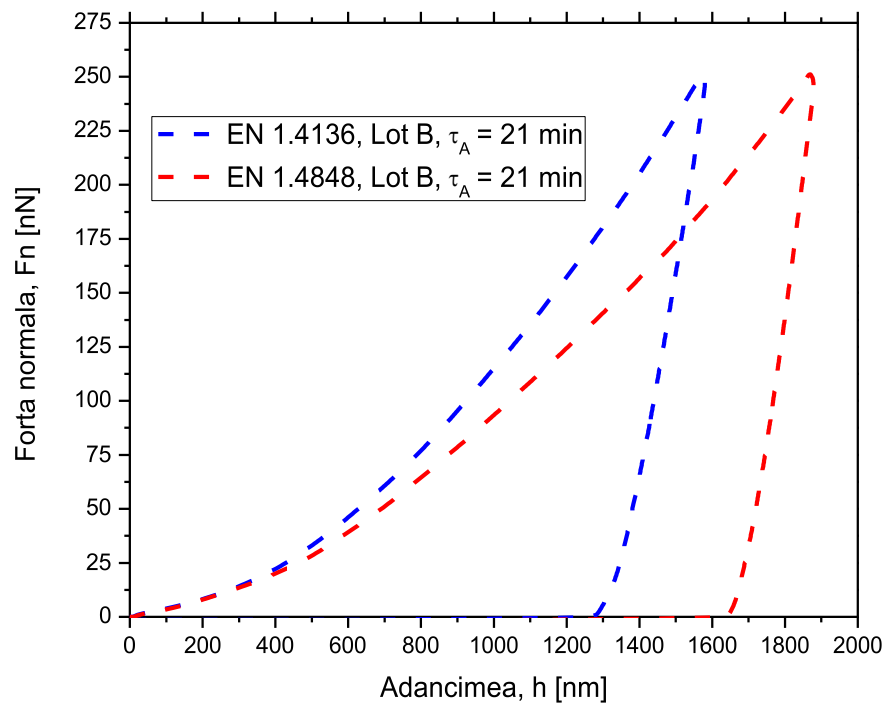


Fig. 2.77 Curba de sarcină încărcare/descărcare pentru ambele oțeluri studiate (EN 1.4136, EN 1.4848, Lot B: $\tau_A = 21$ min)

Analizând rezultatele prezentate în figurile 2.71 - 2.77, se remarcă aceeași observație generală ca și la lotul A de epruvete și anume: epruvetele din oțelul EN 1.4136 au o adâncime de pătrundere a indentorului mai mică decât cea specifică oțelului EN 1.4848, ceea ce demonstrează faptul că EN 1.4136 are o duritate mai ridicată decât oțelul EN 1.4848. Această diferență de valori se datorează componenței structurale a fiecăruia dintre oțelurile studiate (vezi paragraful 2.4.4.1).

Variația durității obținută prin indentare (H_{IT}) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifice oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848, pentru ambele loturi (A și B) este prezentată în figura 2.78.

Se remarcă faptul că pentru oțelurile studiate (EN 1.4136 și EN 1.4848) și pentru ambele loturi de epruvete (Lot A: $\tau_A = 7$ min., Lot B: $\tau_A = 21$ min.) valorile durității obținută prin indentare (H_{IT}) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării sunt superioare pentru oțelul EN 1.4136, comparativ cu cele din oțelul EN 1.4848.

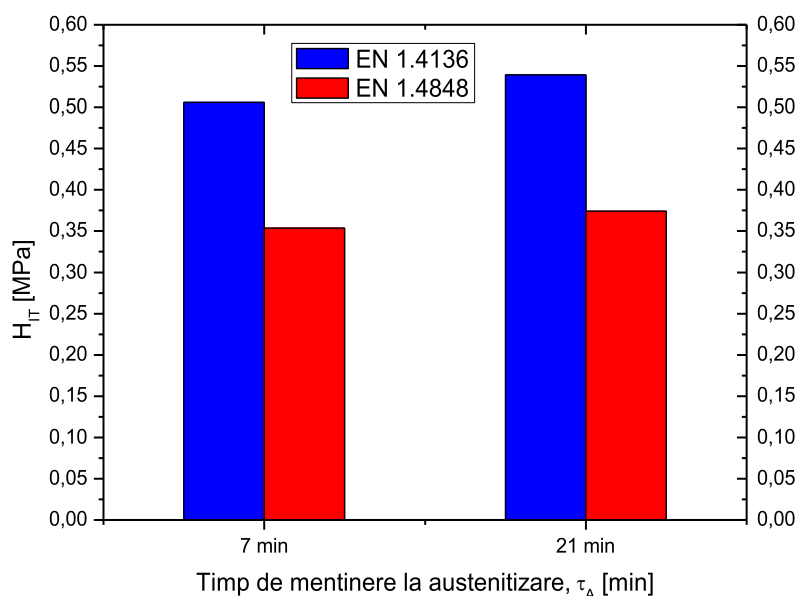


Fig. 2.78 Variația durității obținută prin indentare (H_{IT}) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifice oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 (Lot A: $\tau_A = 7$ min, Lot B: $\tau_A = 21$ min.)

Această diferență de valori se datorează componenței structurale a fiecăruia dintre oțelurile studiate (vezi paragraful 2.4.4.1.).

Variația durității Vickers în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifice oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848, pentru ambele loturi (A și B) este prezentată în figura 2.79.

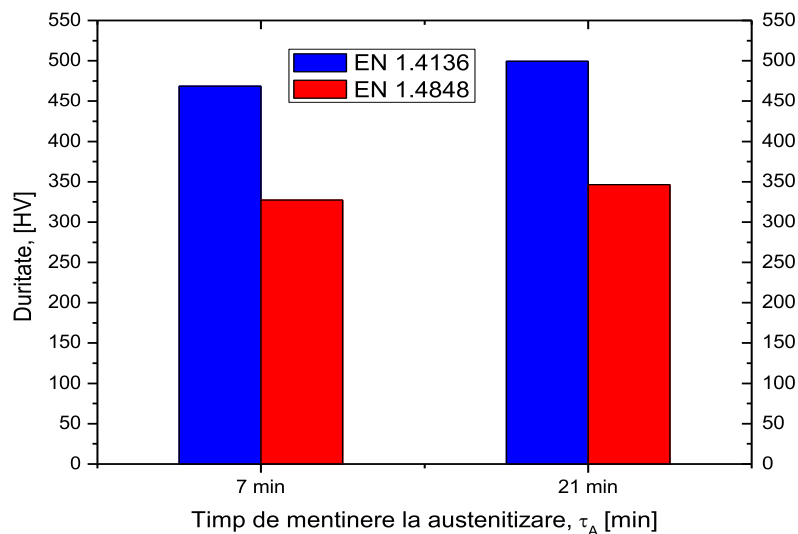


Fig. 2.79 Variația durității (HV) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifice oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 (Lot A: $\tau_A=7$ min, Lot B: $\tau_A=21$ min.)

Se remarcă faptul că și valorile durității determinate prin metoda Vickers sunt superioare pentru epruvetele din oțelul EN 1.4136 comparativ cu cele din oțelul 1.4848. Și în acest caz, acest fapt se explică prin componența structurală a fiecărui oțel în parte (vezi paragraful 2.4.4.1).

O predicție privind rezistența la uzare (H/E) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifice oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 pentru ambele loturi (A și B) este prezentată în figura 2.80.

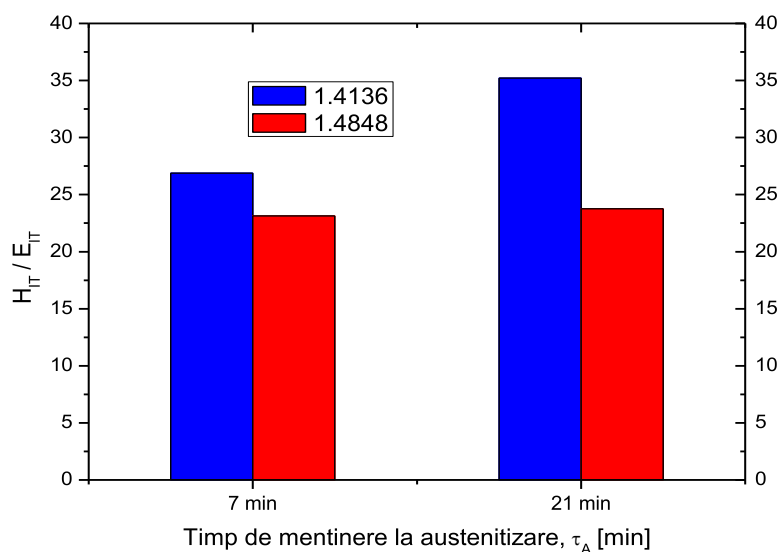


Fig. 2.80 Predicție privind rezistența la uzare (H/E) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifice oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 (Lot A: $\tau_A=7$ min, Lot B: $\tau_A=21$ min.)

Conform datelor furnizate de figura 2.80, se remarcă și în acest caz faptul valorile rezistenței la uzare (H/E) sunt superioare pentru epruvetele din oțelul EN 1.4136 comparativ cu cele din oțelul 1.4848. Și în acest caz, acest fapt se explică prin componența structurală a fiecărui oțel în parte (vezi paragraful 2.4.4.1).

O predicție privind rezistența la deformare plastică (H^3/E^2) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifici oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 pentru ambele loturi (A și B) este prezentată în figura 2.81.

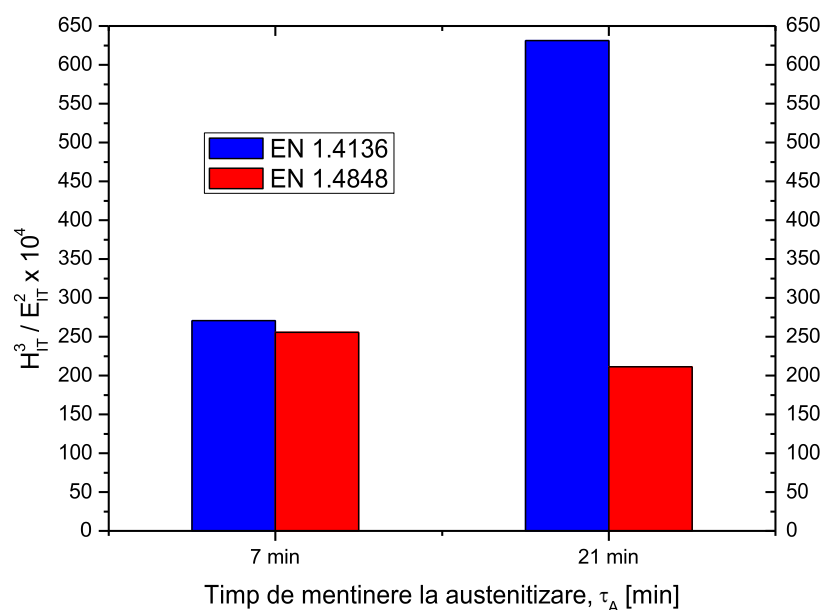


Fig. 2.81 Predicție privind rezistența la deformare plastică (H^3/E^2) în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifici oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 (Lot A: $\tau_A=7$ min, Lot B: $\tau_A=21$ min.)

Conform datelor furnizate de figura 2.81, se remarcă și în acest caz faptul că valorile rezistenței la deformare plastică (H^3/E^2) sunt superioare pentru epruvetele din oțelul EN 1.4136 comparativ cu cele din oțelul 1.4848. Și în acest caz, acest fapt se explică prin componența structurală a fiecărui oțel în parte (vezi paragraful 2.4.4.1.), ceea ce duce la obținerea unor valori mai bune pentru rezistența la deformare plastică (H^3/E^2) comparativ cu rezultatele obținute pe epruvetele oțelului EN 1.4848.

Determinarea corelației dintre coeficientul de uzare " k " și nanoduritatea prin indentare " H_{IT} " în funcție de parametrii tehnologici ai încercării specifici oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 pentru ambele loturi (A și B) se realizează pe baza datelor prezentate în tabelul 2.17 și figurile 2.82 și 2.83.

Tabelul 2.17 Coeficientul de uzură " k_{mediu} " și nanoduritatea prin indentare " $H_{\text{IT-mediou}}$ " în funcție de parametrii tehnologici specifici oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848

Marca Oțel	Proba	Lot	τ_A [min]	Coeficient de uzură, k_{mediu} [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$	Duritate indentare $H_{\text{IT-mediou}}$ [GPa]
EN 1.4136	1	A	7	1,1625	5,058
	2	B	21	0,7108	5,392
EN 1.4848	3	A	7	3,992	3,922
	4	B	21	5,269	3,559

În figurile 2.82 și 2.83, este prezentată dependența dintre coeficientul de uzură " k_{mediu} " și nanoduritatea prin indentare " $H_{\text{IT-mediou}}$ " în funcție de parametrii tehnologici specifici oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848

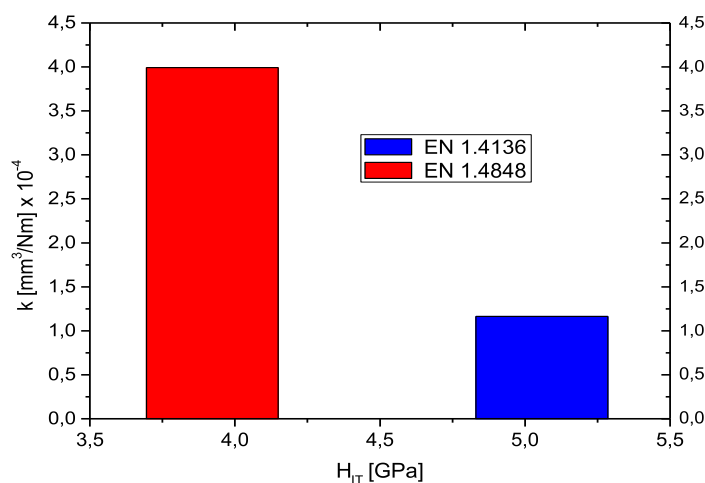


Fig. 2.82 Dependența dintre coeficientul de uzură " k " și nanoduritatea prin indentare " H_{IT} " în funcție de parametrii tehnologici specifici oțelurilor (Lot A: $\tau_A = 7$ min)

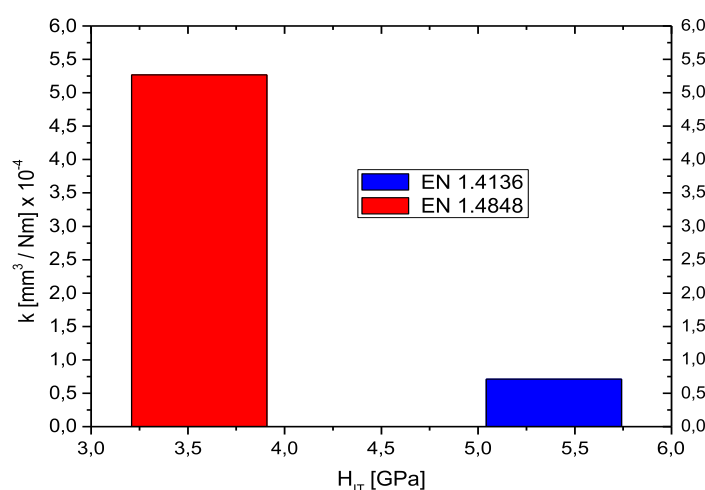


Fig. 2.83 Dependența dintre coeficientul de uzură " k " și nanoduritatea prin indentare " H_{IT} " în funcție de parametrii tehnologici specifici oțelurilor (Lot B: $\tau_A = 21$ min)

Analizând datele specifice valorilor coeficientul de uzare "k" și nanodurității prin indentare " H_{IT} " prezentate în figurile 2.82 și 2.83, se remarcă următoarele faptul că oțelul (EN 1.4136) cu valorile mai mari ale durității prin indentare (H_{IT}) are valori mai mici ale coeficientului de uzură (k), comparativ cu valorile obținute în cazul oțelului EN 1.4848, astfel:

a) pentru lotul A ($\tau_A = 7$ min) există următoarele dependențe:

- oțelul EN 1.4136 care are valoarea durității prin indentare (H_{IT}) = 5,058 [GPa] are valoarea coeficientului de uzură (k) = 1,163 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$;

- oțelul EN 1.4848 care are valoarea durității prin indentare (H_{IT}) = 3,922 [GPa] are valoarea coeficientului de uzură (k) = 3,992 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$;

b) pentru lotul B ($\tau_A = 21$ min) există următoarele dependențe:

- oțelul EN 1.4136 care are valoarea durității prin indentare (H_{IT}) = 5,392 [GPa] are valoarea coeficientului de uzură (k) = 0,711 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$;

- oțelul EN 1.4848 care are valoarea durității prin indentare (H_{IT}) = 3,559 [GPa] are valoarea coeficientului de uzură (k) = 5,269 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$.

Se remarcă o dependență invers proporțională între valorile durității prin indentare (H_{IT}) și valorile coeficienților de uzură (k), remarcată la ambele mărci de oțeluri și anume: odată cu creșterea valorilor durității prin indentare (H_{IT}), scade valoarea coeficienților de uzură (k), această dependență invers proporțională fiind în concordanță cu literatura de specialitate [14, 26, 32, 65-68].

În cazul cercetărilor experimentale mai sus prezentate, se remarcă faptul că oțelul EN 1.4136, prezintă valori mai scăzute ale coeficientului de uzură și mai ridicare ale valorilor durității prin indentare (H_{IT}) pentru ambele loturi (A și B) în comparație cu aceiași parametrii specifici oțelului EN 1.4848. Și în acest caz observațiile mai sus prezentate se explică prin componența structurală a fiecărui oțel în parte (vezi paragraful 2.4.4.1).

2.4.4.4 Contribuții privind studiul coeficientului de uzură specific fontei cu grafit nodular EN -GJS-450-10 aliată cu Ni-Cu (variante tehnologică V2)

După efectuarea tratamentului termic, toate cele 28 epruvete realizate din fontă cu grafit nodular EN -GJS-450-10, au fost împărțite în 2 loturi (A și B), au fost curățate în apă fierbinte, uscate și cântărite cu o acuratețe de $\pm 0,1$ mg (Gi). Pe rând au fost fixate în instalația experimentală (vezi fig. 2.42) și au fost apăsate pe discul rotitor (oțel turnat cu 12 % Mn: T105Mn120, rectificat și călit cu duritatea de 550 HB) cu o sarcină unitară $P_{\text{unitar}} = F_N / S$ de $0,0318 \text{ N/mm}^2$.

Viteza de rotație a discului a fost $v_{rot} = 200 \text{ rot/min}$, iar poziția epruvetei pe disc a fost $= 1/2 R$, rugozitatea discului fiind de $0,8 \mu\text{m}$.

În fig. 2.84 este prezentat schematic procesul de uzare de abraziune dintre epruveta din Fgn călită izoterm și discul rotitor din oțel Mn.

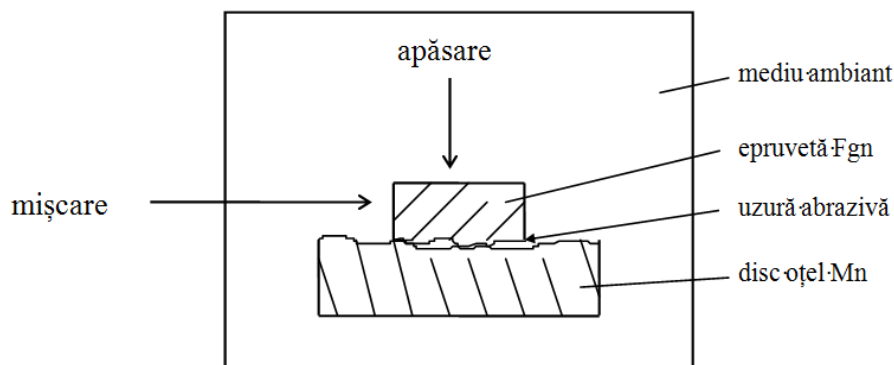


Fig. 2.84 Schema procesului de uzare abrazivă specifică epruvetelor din Fgn [43]

Fiecare probă a fost supusă încercării timp de 1 oră după care toate probele s-au cântărit din nou.

Rezultatele obținute la încercarea de uzură abrazivă sunt exprimate prin diferența de greutate [9, 20, 22, 27, 30, 70, 79, 82, 97], realizată în urma celor două cântăriri (înainte și după uzură) conform relației (2.16):

$$P_{uz} = \frac{G_i - G_f}{G_i} \cdot 100[\%], \quad (2.16)$$

unde:

P_{uz} - pierderi datorate uzării abrazive a Fgn, [%];

G_i - greutatea probei determinată inițial, înainte de încercarea la uzare, [g];

G_f - greutatea probei determinată la final, după încercarea de uzare, [g];

Influența parametrilor tratamentului termic aplicat (temperatura și timpul de menținere în treaptă izotermă) asupra pierderilor prin uzare realizate pe fonta studiată este prezentată în figurile 2.85, 2.86 și 2.87.

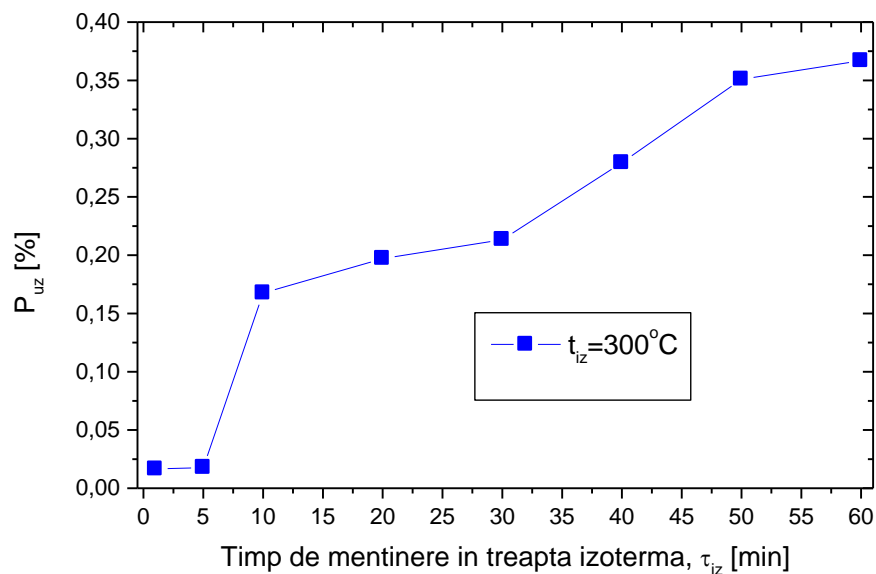


Fig. 2.85 Dependența valorilor pierderilor prin uzare, P_{uz} , funcție de timpul de menținere în treaptă izotermă, la temperatura $t_{iz} = 300^\circ\text{C}$ [43]

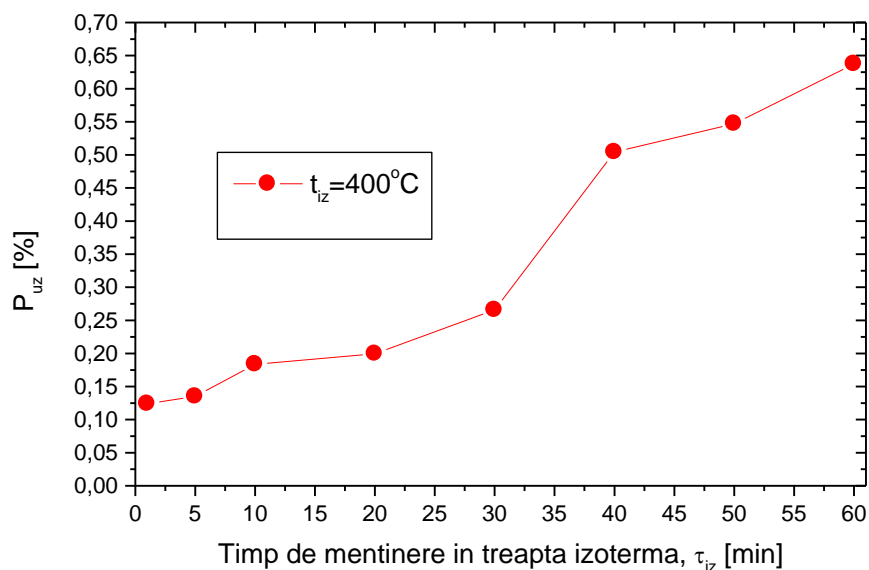


Fig. 2.86 Dependența valorilor pierderilor prin uzare, P_{uz} , funcție de timpul de menținere în treaptă izotermă, la temperatura $t_{iz} = 400^\circ\text{C}$ [43]

Prin comparație datele prezentate în figurile 2.85 și 2.86 sunt prezentate în figura 2.87.

Din analiza rezultatelor prezentate în figurile 2.85 - 2.87, se pot concluziona următoarele:

- valorile pierderilor prin uzare sunt mult mai mici pentru temperaturi de menținere în treaptă izotermă mai scăzute ($t_{iz} = 300^\circ\text{C}$) comparativ cu temperaturile mai ridicate de menținere

($t_{iz}=400^{\circ}\text{C}$), acest fapt explicându-se prin componența structurii care la temperatura de menținere în treaptă izotermă ($t_{iz} = 300^{\circ}\text{C}$) are o structură alcătuită din ferită bainitică inferioară, martensită și relativ puțină austenită reziduală, constituenți care asigură o bună comportare la uzare, în timp ce în epruvetele menținute în treaptă izotermă superioară ($t_{iz} = 400^{\circ}\text{C}$) în structură apare ferită bainitică superioară și dispare martensita, constituenți mai puțin duri, care favorizează creșterea valorilor pierderilor prin uzare;

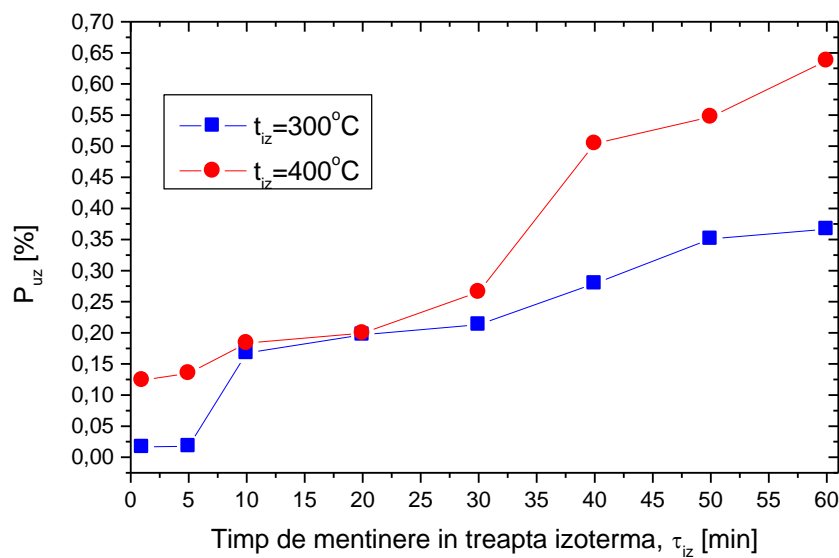


Fig. 2.87 Studiu comparativ privind dependența valorilor pierderilor prin uzare, P_{uz} , funcție de timpul de menținere în treaptă izotermă, pentru temperaturile $t_{iz} = 300$ și 400°C [43]

- pentru fiecare temperatură de menținere în treaptă izotermă în parte, o mare importanță o are timpul de menținere în treapta izotermă (τ_{iz}), astfel odată cu creșterea acestuia de la 5 la 60 min, cresc și pierderile prin uzare, aceasta se datorează structurii finale a epruvetei care conține o cantitate mai mare de A_{rez} și ferită-bainitică, în detrimentul martensitei.

- cele mai mici pierderi prin uzare sunt obținute la timpii cei mai scurți de menținere izotermă ($\tau_{iz} = 5$ min), caracteristică generală pentru ambele temperaturi de menținere în treaptă izotermă ($t_{iz} = 300$ și 400°C). Acest fapt poate fi explicat prin componența structurală obținută în toate cazurile la timpii de menținere scurți, când majoritatea cantității de austenită (care nu este îmbogățită în carbon și posedă o stabilitate scăzută) se transformă la răcirea ulterioară în aer în martensită cu efect direct asupra rezistenței la uzare.

2.5 Concluzii

Analizând datele prezentate în cadrul acestui capitol, se remarcă următoarele concluzii:

✓ referitor la cercetările experimentale privind duritatea aliajelor speciale tratate termic utilizând energia solară comparativ cu utilizarea energiei electrice, se remarcă următoarele:

- microduritatea oțelului inoxidabil EN 1.4848 crește în cazul variantei V2 de tratament termic (călire la 900°C + revenire la 625°C) comparativ cu varianta V1 de călire (călire la 1050°C). Acest fapt se explică prin aceea că, în cazul probelor obținute prin varianta V2 (călire + revenire înaltă), structura conține pe lângă austenită (F_{ey}), ferita δ (ca și la varianta V1) și frecvente precipitări intermetalice în zona limitelor de grăunte cât și în austenită, aceste carburi (K), duc la obținerea unor valori superioare ale microdurității [64, 89, 93];

- în cazul în care s-a utilizat la călire un mediu de răcire mai activ (apa în comparație cu uleiul) acesta duce la o finisare a structurii, ceea ce induce obținerea unor valori superioare ale proprietăților, în cazul nostru duce la obținerea unor valori superioare ale microdurității.

- în cazul s-au analizat rezultatele tratamentului termic cu energie solară asupra valorilor microdurității fontei cu grafit nodular (EN -GJS-450-10) aliată cu Ni-Cu-Cr, se remarcă faptul că epruvetele tratate termic conform variantei V3 (călire urmată de revenire în domeniul bainitic) și menținute la temperatura de revenire, $t_R = 300^\circ \text{C}$, au cele mai bune valori ale microdurității, deoarece structura finală a acestor epruvete este constituită din ferită bainitică inferioară, austenită reziduală și martensită, constituenți ce sunt caracterizați prin valori mari ale durității (comparativ cu probele la care menținute s-a realizat la temperatura de revenire, $t_R = 400^\circ \text{C}$);

- pentru toate probele, valorile durității sunt sensibil mai mari atunci când tratamentul termic s-a realizat în cuptorul electric comparativ cu efectuarea tratamentului termic în cuptorul solar, acest fapt poate fi explicat prin constanța gradientului de încălzire și menținere a temperaturii pe parcursul desfășurării tratamentului termic, știut fiind faptul că un inconvenient în realizarea tratamentelor termice cu ajutorul energiei solare este păstrarea constantei a gradientului de încălzire (DNI poate varia odată cu apariția norilor).

✓ referitor la cercetările experimentale privind comportamentul la temperaturi scăzute al aliajelor speciale tratate termic utilizând energia solară comparativ cu utilizarea energiei electrice, se remarcă următoarele:

- comportamentul bun la temperaturi scăzute al oțelului analizat (EN 1.4848) se datorează procentului ridicat din compoziția chimică a nichelului (21,90%), element puternic austenitogen, care face ca în structură, faza austenitică să fie stabilă chiar și la temperaturi foarte joase,

nichelul realizând coborârea mult sub zero a punctului de transformare M_s (punctul la care în structură apare martensita), rezultatele obținute fiind în conformitate cu confirmate literatura de specialitate [89, 93, 127].

✓ referitor la cercetările experimentale privind comportamentul tribologic al oțelurilor EN 1.4136 și EN 1.4848 tratate termic utilizând energia solară, se remarcă următoarele:

- epruvetele din oțelul EN 1.4136 au un coeficient de uzură mai redus decât epruvetele din oțelul EN 1.4848, rezultând faptul că oțelul EN 1.4136 are o rezistență la uzare mai bună decât oțelul EN 1.4848. Se remarcă faptul că valorile coeficient de uzură (k_{mediu}) specifice epruvetelor din oțelul EN 1.4136 sunt cuprinse între limitele 0,7108 și 1,1625 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$, în timp ce valorile coeficient de uzură (k_{mediu}) specifice epruvetelor din oțelul EN 1.4848, sunt cuprinse între limitele 3,992 și 5,269 [mm^3/Nm] $\times 10^{-4}$. Această diferență de valori se datorează componenței structurale a fiecăruia dintre oțelurile studiate, astfel, după tratamentul termic de "călire de punere în soluție", structurile celor două oțeluri inoxidabile pot avea următoarea alcătuire:

a) structura oțelului inoxidabil EN 1.4136, poate fi alcătuită din ferită ($\text{Fe}\alpha$), carburi complexe de tipul M_{23}C_6 (CrFeMo) $_{23}\text{C}_6$ și un procent scăzut de martensită (provenit de la transformarea austenitei la răcirea rapidă în apă). Carburile (de dimensiuni mai reduse decât la structura brut turnată) pot fi dispuse atât în lanțuri sau în formații cu caracter eutectic la limitele grăunților de ferită cât și în aglomerări de particule de carburi fine, complexe, situate în interiorul grăunților de ferită. Această structură realizează o durificare a materialului, duritatea medie a acestuia fiind de aproximativ 46,9 HRC \approx 470 HV₁₀₀ pentru lotul A ($\tau_A = 7$ min) și 49,1 HRC \approx 500 HV₁₀₀ pentru lotul B ($\tau_A = 21$ min). Durificarea mai pronunțată în cazul lotului B ($\tau_A = 21$ min) poate fi explicată datorită timpului de menținere mai mare care în acest caz favorizează o precipitare mai însemnată a carburilor de crom în ferită (comparativ cu procesul de precipitare carburilor în cazul lotului A, $\tau_A = 7$ min), ceea ce explică valorile specifice coeficientului de frecare dinamic (vezi fig. 2.55) cât și comportarea la uzare a fiecărui lot în parte [89, 93, 127];

b) structura oțelului inoxidabil EN 1.4848, poate fi alcătuită din austenită înalt aliată cu Cr și ferita δ ($\text{Fe}\delta$) precipitată interdendritic. Această structură conduce la valori mai scăzute ale durității, duritatea medie fiind de aproximativ 33 HRC \approx 327 HV₁₀₀ pentru lotul A ($\tau_A = 7$ min) și 35 HRC \approx 345 HV₁₀₀ pentru lotul B ($\tau_A = 21$ min) [89, 93, 127]. Valorile mai scăzute ale durității oțelului EN 1.4848 comparativ cu cele ale oțelului EN 1.4136, explică obținerea unor valori mai mari ale coeficientului de frecare dinamic (vezi fig. 2.53 și 2.54) ceea ce induce implicit o mai scăzută rezistență la uzare a oțelului EN 1.4848 comparativ cu cele ale oțelului EN 1.4136.

- un timp de menținere la austenitizare mai îndelungat ($\tau_A = 21$ minute, lotul B) comparativ cu un timp de menținere la austenitizare mai scăzut ($\tau_A = 7$ minute, lotul A), duce la obținerea unor valori mai scăzute ale coeficientului de frecare dinamic și implicit a unei rezistențe la uzare superioare, fapt remarcat la ambele mărci de oțeluri. Acesta se explică prin faptul că un timp de menținere mai îndelungat la austenitizare ($\tau_A = 21$ minute, lotul B), generează declanșarea fenomenului de producere a carburilor de crom, ceea ce duce la durificarea structurii și obținerea unor valori mai scăzute ale coeficientului de frecare dinamic (μ), fiind în concordanță cu cercetările din domeniu [89, 93, 115, 119, 127];

- comparativ cu alte mărci de oțeluri, aliaje de nichel, cât și alte materiale plastice (PP, PVDF, PFA, PTFE), oțelul EN 1.4136S prezintă valori superioare atât în ce privește rezistența la uzare cât și rezistența la coroziune, fiind un material de bază în fabricarea pompelor, turbinelor, supapelor, rulmenți, cuțite cu destinații speciale, etc [89, 93, 115, 119].

CAP. 3. PRELUCRAREA PRIN ANALIZĂ STATISTICĂ, MODELARE MATEMATICĂ ȘI OPTIMIZARE A DATELOR EXPERIMENTALE

În acest capitol se analizează probleme legate de identificarea rezultatelor anormale din cadrul cercetării experimentale, realizându-se o analiză statistică a ecuației de regresie (modelare matematică prin experiment clasic) în vederea obținerii unor relații matematice (relații care corespund unui grad statistic de încredere ridicat) și ulterior optimizarea acestora.

Tot în cadrul acestui capitol se prezintă și două instrumente software originale, scrise în C++ (testate și corectate de autor), care răspund unor cerințe de modelare și optimizare cu grad mare de generalitate.

Prin modul de abordare a problematicii complexe impusă de asigurarea competitivității produselor industriale, aceste rezultate se pot utiliza atât în domeniului de cercetare experimentală cât și în activitatea didactică.

Utilizarea în industrie a modelării matematice și a optimizării rezultatelor experimentale, reprezintă un mod eficient de testare și evaluare a datelor obținute din diferite domenii de activitate, fiind în același timp și un proces care poate oferi multiple avantaje ce pot duce la obținerea unor rezultate deosebite și în domeniul cercetării [17, 73, 83, 85, 86, 121].

Modelul matematic al unui proces se definește ca fiind sistemul de ecuații și inecuații apt să descrie în mod corect interdependențele din variabilele procesului [85, 86]. Modelarea matematică reprezintă procesul de dezvoltare a unui model matematic [73], rezultând în final un model matematic al procesului analizat pe baza căruia, se pot lua decizii tehnico-economice.

În cazul în care în activitatea curentă sau de cercetare se utilizează modelarea și simularea a unui proces sau a unei activități, trebuiesc luate în calcul o serie de aspecte specifice acestora [83, 121]:

- prețul ridicat al pachetelor software pentru modelare și simulare este o realitate, deoarece realizarea unui soft performant, necesită investiții al unor companii specializate (personal specializat în domeniu), iar uneori timpul necesar până la punerea la punct al softului poate fi îndelungat;

- în vederea utilizării unor software specializate, personalul care-l deservește trebuie să aibă o pregătire specială;

- pentru păstrarea unui grad de încredere rezonabil în softul utilizat, trebuie ca sistemul analizat, în evoluția lui să nu se îndepărteze de parametrii inițiali introduși în model, deoarece orice modificare substanțială pe parcursul procesului a datelor de intrare, duce la diminuarea conformării cu realitatea a modelului de simulare;

- un model de simulare performant poate permite oricând actualizarea informațiilor specifice sistemului (procesului) analizat.

3.1 Îndepărtarea rezultatelor anormale din datele experimentale

Modelarea matematică este utilizată într-o arie largă de domenii economice, atât în domeniul științelor naturii cât și în domeniul ingineriei industriale și economice [6, 71, 85, 86].

Prin aplicarea modelării matematice, rezultă un model matematic al datelor de intrare (al datelor ce se doresc a fi analizate), model care este folosit în luarea deciziilor atât tehnice cât și economice.

Conform literaturii de specialitate [85, 86], în general, elaborarea unui model matematic se realizează parcurgând următoarele etape:

1. Formularea modelului matematic;
2. Stabilirea funcției de performanță;
3. Stabilirea ecuațiilor modelului matematic;
4. Verificarea modelului.

Datele experimentale care se doresc a fi utilizate în modelarea matematică, pot conține și rezultate anormale (erori, rezultate disparate, aberante, etc.) care dacă nu sunt identificate și îndepărtate pot duce la obținerea unor modele matematice care să nu corespundă cu realitatea și de aceea se utilizează diferite criterii de validare a datelor experimentale, criterii care se încadrează în domeniul prelucrării statistice a datelor experimentale.

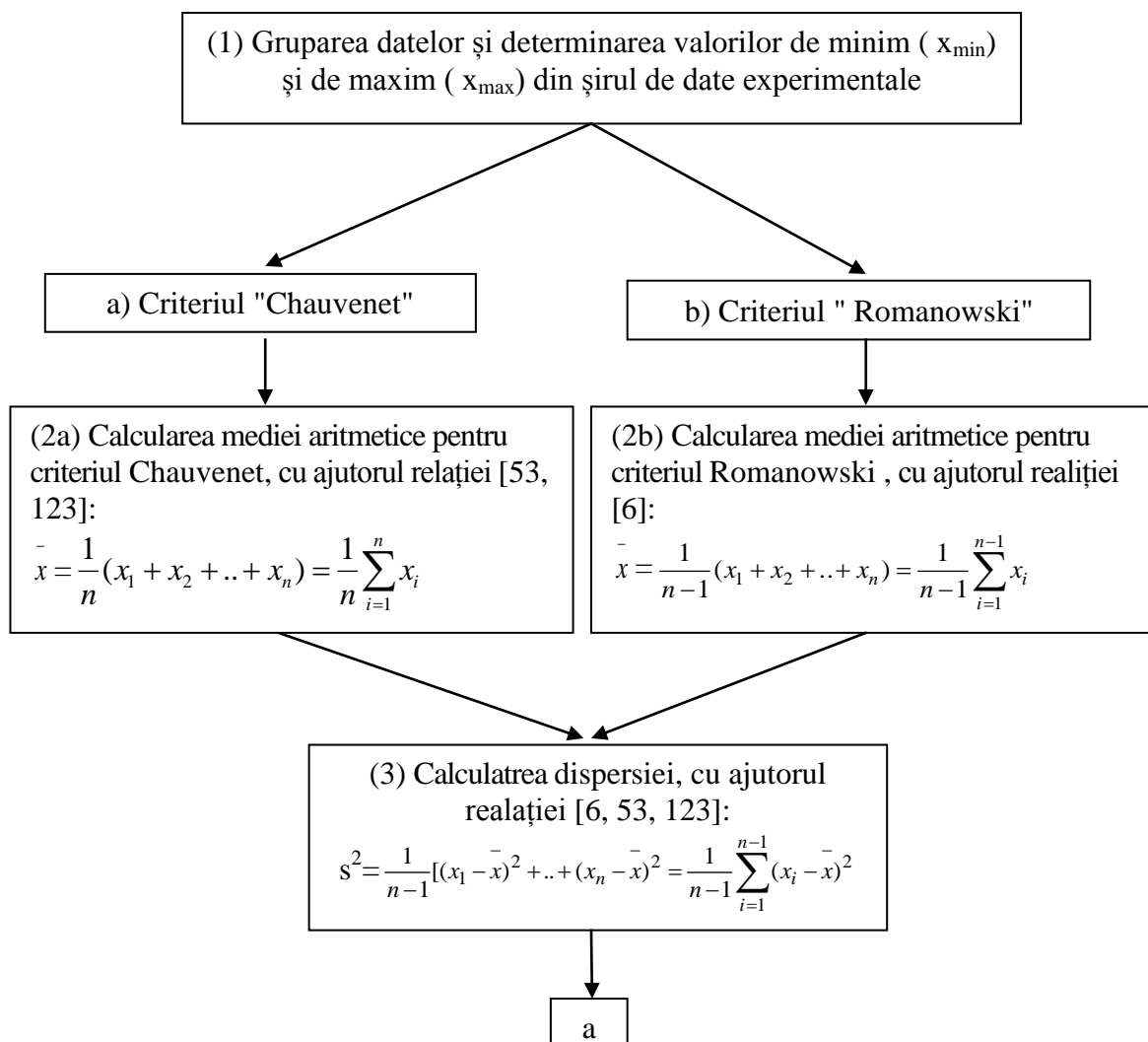
Conform lui Bevington [6], erorile sunt definite ca fiind diferența dintre o valoare calculată sau observată și valoarea reală și de aceea erorile trebuiesc îndepărtate pentru a avea date corecte cu care să se poată interpreta corect evoluția unui proces. Îndepărtarea rezultatelor anormale este o etapă importantă în prelucrarea statistică a datelor experimentale și de aceea, înainte de a fi utilizate la modelarea matematică, rezultatelor experimentale li se aplică diferite criterii de îndepărtarea rezultatelor aberante, cum ar fi: Romanowski, Chauvenet, Grubbs, Irwin,

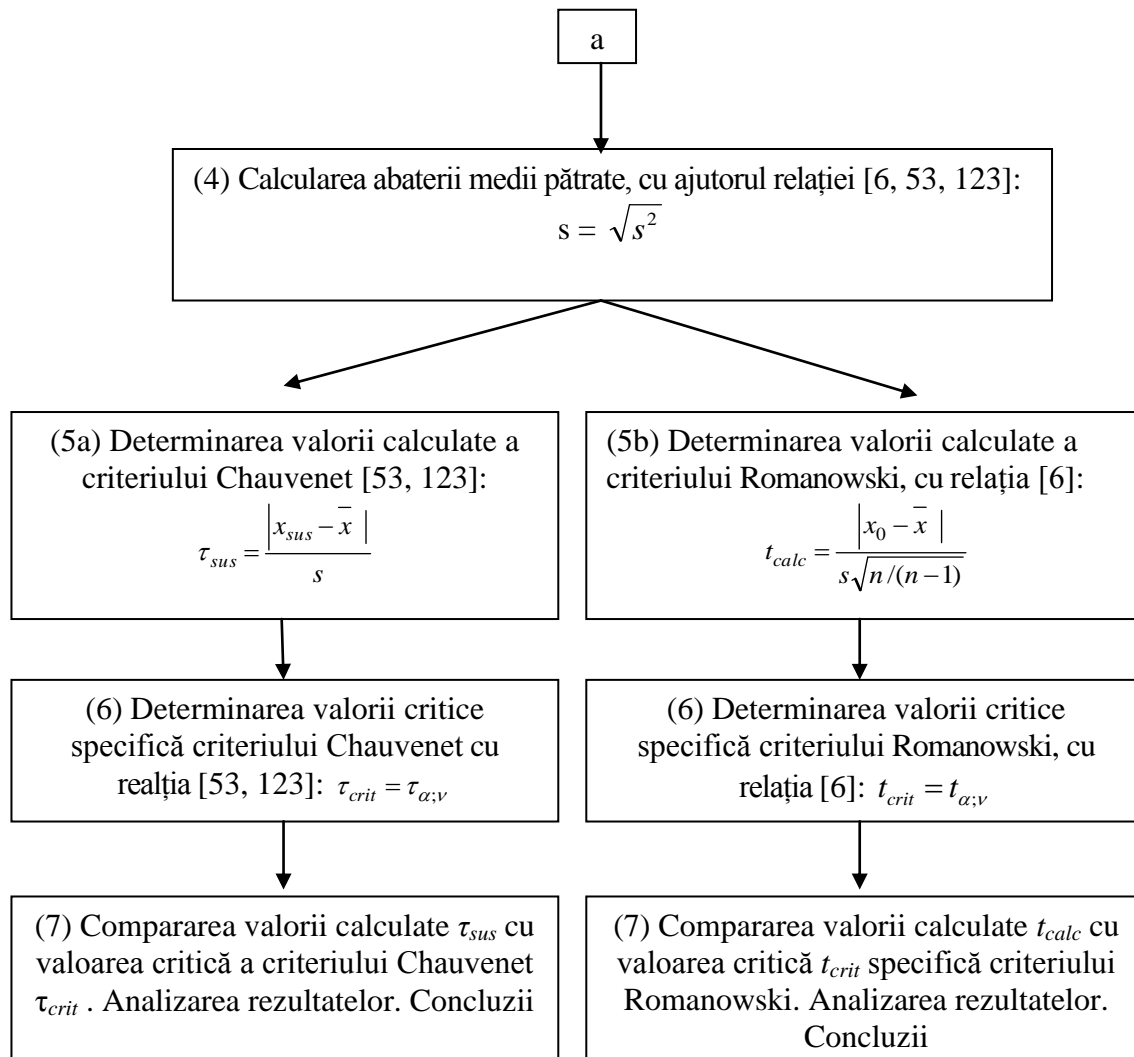
etc., fiecare dintre acestea fiind diferențiate de anumite particularități [1, 3, 6, 10, 53, 71, 72, 85, 87, 123].

În vederea îndepărtării rezultatelor anormale din cercetările experimentale, înaintea realizării modelării matematice am folosit de la caz la caz unul dintre criteriile amintite [50-54]. Astfel conform [53] s-au analizat rezultatele valorilor durtății (HB) specifice unei fonte cu grafit nodular aliată cu crom și cupru, în vederea identificării unor posibile rezultate anormale.

În acest studiu comparativ, pentru identificarea și îndepărtarea rezultatelor anormale ale unor cercetări experimentale, criteriile utilizate au fost: "Chauvenet" și "Romanowski". S-au utilizat aceleași valori ale rezultatelor experimentale, iar în final, s-a realizat o comparație privind corectitudinea și eficacitatea folosirii acestor criterii. Studiul comparativ a fost posibil de realizat, deoarece ambele criterii sunt eficiente când sunt folosite pentru un sir de valori la care $n < 100$ [3, 13, 53, 85, 86, 123].

Pentru a analiza rezultatele experimentale cu ajutorul celor două criterii, s-au parcurs următoarele etape specifice testelor:





unde:

n = numărul datelor experimentale;

\bar{x} = media aritmetică a datelor experimentale. Numai pentru testul Romanowski, media aritmetică se calculează fără a se lua în considerare valoarea maximă sau minimă analizată [3, 13, 85];

s^2 = dispersia datelor experimentale;

s = abaterea medie pătrată a datelor experimentale;

τ_{sus} = valoare experimentală care poate fi afectată de eroare (specifică criteriului Chauvenet);

x_0 = valoare experimentală care poate fi afectată de eroare (specifică criteriului Romanowski);

τ_{crit} = valoarea critică pentru criteriul Chauvenet [123];

t_{calc} = valoarea calculată pentru criteriul Romanowski [3, 13, 85];

t_{crit} = valoarea critică pentru criteriul Romanowski (t) este tabelară pe baza numărului de valori ale datelor experimentale și în funcție de intervalul de încredere α , [3, 13, 85, 86];

α = coeficientul nivelului de încredere, $\alpha = 0.95$ [3, 13, 85, 86];

ν = numărul gradelor de libertate, $\nu = n$ pentru criteriul Chauvenet și $\nu = n-1$ pentru criteriul Romanowski;

Comparând valoarea calculată (x_{sus}) cu valoarea critică (τ_{crit}) a *criteriului Chauvenet* și analizând rezultatele, pot exista două situații:

a) Dacă se îndeplinește condiția $\tau_{sus} < \tau_{crit}$ atunci valoarea minimă a datelor experimentale (x_{min}) cât și valoarea maximă a datelor experimentale (x_{max}) sunt valori normale și fac parte din datele experimentale;

b) Dacă se îndeplinește condiția $\tau_{sus} > \tau_{crit}$, atunci atunci, valoarea minimă a datelor experimentale (x_{min}) sau valoarea maximă a datelor experimentale (x_{max}) sunt identificate ca valori anormale (erori) și sunt îndepărtate din datele experimentale;

Comparând valoarea calculată t_{calc} cu valoarea critică t_{crit} și analizând rezultatele pentru *criteriul Romanowski* (criteriul t), pot exista două situații:

a) Dacă se îndeplinește condiția $t_{calc} < t_{crit}$ atunci valoarea minimă a datelor experimentale (x_{min}) cât și valoarea maximă a datelor experimentale (x_{max}) sunt valori normale și fac parte din datele experimentale;

b) Dacă se îndeplinește condiția $t_{calc} > t_{crit}$, atunci atunci, valoarea minimă a datelor experimentale (x_{min}) sau valoarea maximă a datelor experimentale (x_{max}) sunt identificate ca valori anormale (erori) și sunt îndepărtate din datele experimentale;

În ambele cazuri, dacă se identifică rezultate anormale, atunci acestea se îndepărtează din datele experimentale și se reiau calculele conform etapelor prezentate anterior.

3.1.1. Aplicați privind identificarea și îndepărtarea rezultatelor anormale din cercetările experimentale

În cadrul cercetărilor s-au utilizat 2 epruvete specifice (100x10x10mm), pentru determinarea durității (HB). Pe fiecare epruvetă în parte, s-au realizat un număr de 8 determinări paralele [58].

Valorile parametrilor tratamentului termic de călire izotermă efectuat asupra epruvetelor cât și rezultatele proprietăților mecanice obținute, sunt prezentate în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1 Parametrii tratamentului termic efectuat și rezultatele proprietăților mecanice obținute [53]

Lot	t_A [°C]	τ_A [min]	t_{iz} [°C]	τ_{iz} [min]	Duritatea [HB] (determinări paralele)
A	900	60	300	60	404; 426; 415; 398; 363; 390; 420; 415;
B			400		331; 323; 302; 331; 315; 375; 315; 302;

unde:

t_A este temperatura de austenitizare [°C];

τ_A este timpul de menținere la temperatura de austenitizare, [min];

t_{iz} este temperatura de menținere în treaptă izotermă, [°C];

τ_{iz} este timpul de menținere în treaptă izotermă, [min]

Dator experimentală li s-au aplicat separat, cele două criterii (Chauvenet și Romanowski) pentru identificarea și îndepărtarea rezultatelor.

A. Verificarea rezultatelor anormale cu ajutorul criteriului Chauvenet

Pentru identificarea și îndepărtarea rezultatelor anormale din cadru cercetărilor experimentale, s-au parcurs toate etapele de calcul specifice *criteriului Chauvenet* iar în urma prelucrării valorilor experimentale s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 3.2.

Tabelul 3.2 Datele experimentale prelucrare cu ajutorul criteriului Chauvenet [53]

Lot	Duritatea [HB] (determinări paralele)	n	$x_{max}; x_{min}$	\bar{x}	s^2	s	τ_{sus}	τ_{crit}	Valori acceptate Yes/No
A	404; 426; 415; 398; 363; 390; 420; 415;	8	$x_{max}=426$	403,875	413,554	20,336	1,088	1,863	Yes
			$x_{min}=363$				2,010		No
A_{Recalc}	404; 426; 415; 398; 390; 420; 426	7	$x_{max}=426$	409,714	164,238	12,816	1,271	1,803	Yes
			$x_{min}=390$				1,538		Yes
B	331; 323; 302; 331; 315; 375; 315; 302;	8	$x_{max}=375$	324,250	547,071	23,389	2,169	1,863	No
			$x_{min}=302$				0,951		Yes
B_{Recalc}	331; 323; 302; 331; 315; 315; 302;	7	$x_{max}=331$	317,000	147,667	12,152	1,152	1,863	Yes
			$x_{min}=302$				1,234		Yes

Analizând rezultatele experimentale prelucrate cu ajutorul criteriului Chauvenet și prezentate în tabelul 3.2, se remarcă următoarele observații:

a) în cadrul lotului A:

- prin aplicarea criteriului Chauvenet, valoarea minimă ($x_{min}=363$) este valoare anormală (nu îndeplinește condiția $\tau_{sus} < \tau_{crit}$) deoarece valoarea experimentală calculată $\tau_{sus} = 2,010$ este mai mare decât valoarea critică acceptată $\tau_{crit} = 1,863$. Această valoare se notează cu "No" în cadrul valorilor acceptate și se va îndepărta din rezultatele experimentale;

- valoarea maximă a datelor experimentale ($x_{max}=426$) îndeplinește condiția: $\tau_{sus} < \tau_{crit}$ ($1,088 < 1,863$) deci este valoare experimentală acceptată;

a.1.) în cadrul lotului A recalculat (A_{Recalc}):

- după îndepărtarea din cadrul rezultatelor experimentale a valorii anormale ($x_{min}=363$), s-au parcurs etapele de calcul specifice criteriul Chauvenet (pentru un număr de $n = 7$ rezultate experimentale) iar în acest caz, toate valorile experimentale extreme ($x_{max}=426$ și $x_{min}=390$) au fost declarate rezultate normale.

b) în cadrul lotului B:

- prin aplicarea criteriului Chauvenet, valoarea maximă ($x_{max}=375$) este valoare anormală (nu îndeplinește condiția $\tau_{sus} < \tau_{crit}$) deoarece valoarea experimentală calculată $\tau_{sus} = 2,169$ este mai mare decât valoarea critică acceptată $\tau_{crit} = 1,863$. Această valoare se notează cu "No" în cadrul valorilor acceptate și se va îndepărta din rezultatele experimentale;

- valoarea minimă a datelor experimentale ($x_{min}=302$) îndeplinește condiția: $\tau_{sus} < \tau_{crit}$ ($0,951 < 1,863$) deci este valoare experimentală acceptată;

b.1.) în cadrul lotului B recalculat (B_{Recalc}):

- după îndepărtarea din cadrul rezultatelor experimentale a valorii anormale ($x_{max}=375$), s-au parcurs etapele de calcul specifice criteriul Chauvenet (pentru un număr de $n = 7$ rezultate experimentale) iar în acest caz, toate valorile experimentale extreme ($x_{max}=331$ și $x_{min}=302$) au fost declarate rezultate normale.

B. Verificarea rezultatelor anormale cu ajutorul criteriului "Romanowski"

Pentru identificarea rezultatelor anormale din cadru cercetărilor experimentale, s-au parcurs toate etapele de calcul specifice criteriului *Romanowski* iar în urma prelucrării valorilor experimentale s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3 Datele experimentale prelucrare cu ajutorul criteriului Romanowski (t)

Lot	Duritatea [HB] (determinări paralele)	n	$x_{max}; x_{min}$	\bar{x}	s^2	s	t_{calc}	t_{crit}	Valori acceptate Yes/No
A	404; 426; 415; 398; 363; 390; 420; 415;	8	$x_{max}=426$	400,714	333,632	18,265	1,295	2,18	Yes
			$x_{min}=363$	409,714	140,775	11,864	3,683		No
A _{Recalc}	404; 426; 415; 398; 390; 420; 426	7	$x_{max}=426$	407	112,666	10,614	1,659	2,07	Yes
			$x_{min}=390$	426	88,666	9,416	1,476		Yes
B	331; 323; 302; 331; 315; 375; 315; 302;	8	$x_{max}=375$	317	126,571	11,250	4,822	2,18	No
			$x_{min}=302$	327,428	543,952	23,322	1,019		Yes
B _{Recalc}	331; 323; 302; 331; 315; 315; 302;	7	$x_{max}=331$	314,666	109,555	10,466	1,446	2,07	Yes
			$x_{min}=302$	319,5	103,916	10,194	1,591		Yes

Analizând rezultatele experimentale prelucrate cu ajutorul criteriului "Romanowski" și prezentate în tabelul 3.2, se remarcă următoarele observații:

a) în cadrul lotului A:

- prin aplicarea criteriului Romanowski, valoarea minimă ($x_{min}=363$) este valoare anormală (nu îndeplinește condiția $t_{calc} < t_{crit}$) deoarece valoarea experimentală calculată $t_{calc} = 3,683$ este mai mare decât valoarea critică acceptată $t_{crit} = 2,18$. Această valoare se notează cu "No" în cadrul valorilor acceptate și se va îndepărta din rezultatele experimentale;

- valoarea maximă a datelor experimentale ($x_{max}=426$) îndeplinește condiția: $t_{sus} < t_{crit}$ ($1,295 < 2,18$) deci este valoare experimentală acceptată;

a.1.) în cadrul lotului A recalculat (A_{Recalc}):

- după îndepărtarea din cadrul rezultatelor experimentale a valorii anormale ($x_{min}=363$), s-au parcurs etapele de calcul specifice criteriul Romanowski (pentru un număr de $n = 7$ rezultate experimentale) iar în acest caz, toate valorile experimentale extreme ($x_{max}=426$ și $x_{min}=390$) au fost declarate rezultate normale.

b) în cadrul lotului B:

- prin aplicarea criteriului Romanowski, valoarea maximă ($x_{max}=375$) este valoare anormală (nu îndeplinește condiția $t_{calc} < t_{crit}$) deoarece valoarea experimentală calculată $t_{calc} = 4,822$ este mai mare decât valoarea critică acceptată $t_{crit} = 2,18$. Această valoare se notează cu "No" în cadrul valorilor acceptate și se va îndepărta din rezultatele experimentale;

- valoarea minimă a datelor experimentale ($x_{min}=302$) îndeplinește condiția: $t_{calc} < t_{crit}$ ($1,019 < 2,18$) deci este valoare experimentală acceptată;

b.1.) în cadrul lotului B recalculat (B_{Recalc}):

- după îndepărtarea din cadrul rezultatelor experimentale a valorii anormale ($x_{\text{max}}=375$), s-au parcurs etapele de calcul specifice criteriul Romanowski (pentru un număr de $n = 7$ rezultate experimentale) iar în acest caz, toate valorile experimentale extreme ($x_{\text{max}}=331$ și $x_{\text{min}}=302$) au fost declarate rezultate normale.

c) în cadrul calculelor s-a utilizat o valoare a coeficientul nivelului de încredere des utilizată în statistică și anume, $\alpha = 0,05$ (eroarea admisă în cadrul calculelor a fost de 5% sau 0,05) rezultând o acuratețe a rezultatelor de 95%.

d) se remarcă o observație generală în urma aplicării celor două criterii (Chauvenet și Romanowski) și anume: ambele criterii au identificat aceleași valori anormale din cadrul datele experimentale, ceea ce confirmă corectitudinea identificării și îndepărtării valorilor anormale ale datelor experimentale, atunci când aceste criterii se aplică pentru un șir de valori la care $n < 100$.

3.2 Modelarea matematică prin experiment clasic

Construirea modelelor cu ajutorul metodelor statisticii matematice, se bazează în principal pe concordanța dintre model și datele experimentale, fapt realizat prin analiza de regresie [85, 86].

La realizarea modelului matematic prin metode statistice se parcurg două etape importante și anume:

1. realizarea experimentului preliminar, etapă în care se rezolvă o serie de probleme legate în principal de selectarea factorilor (parametrilor) procesului, cât și de interacțiunile care pot interveni;

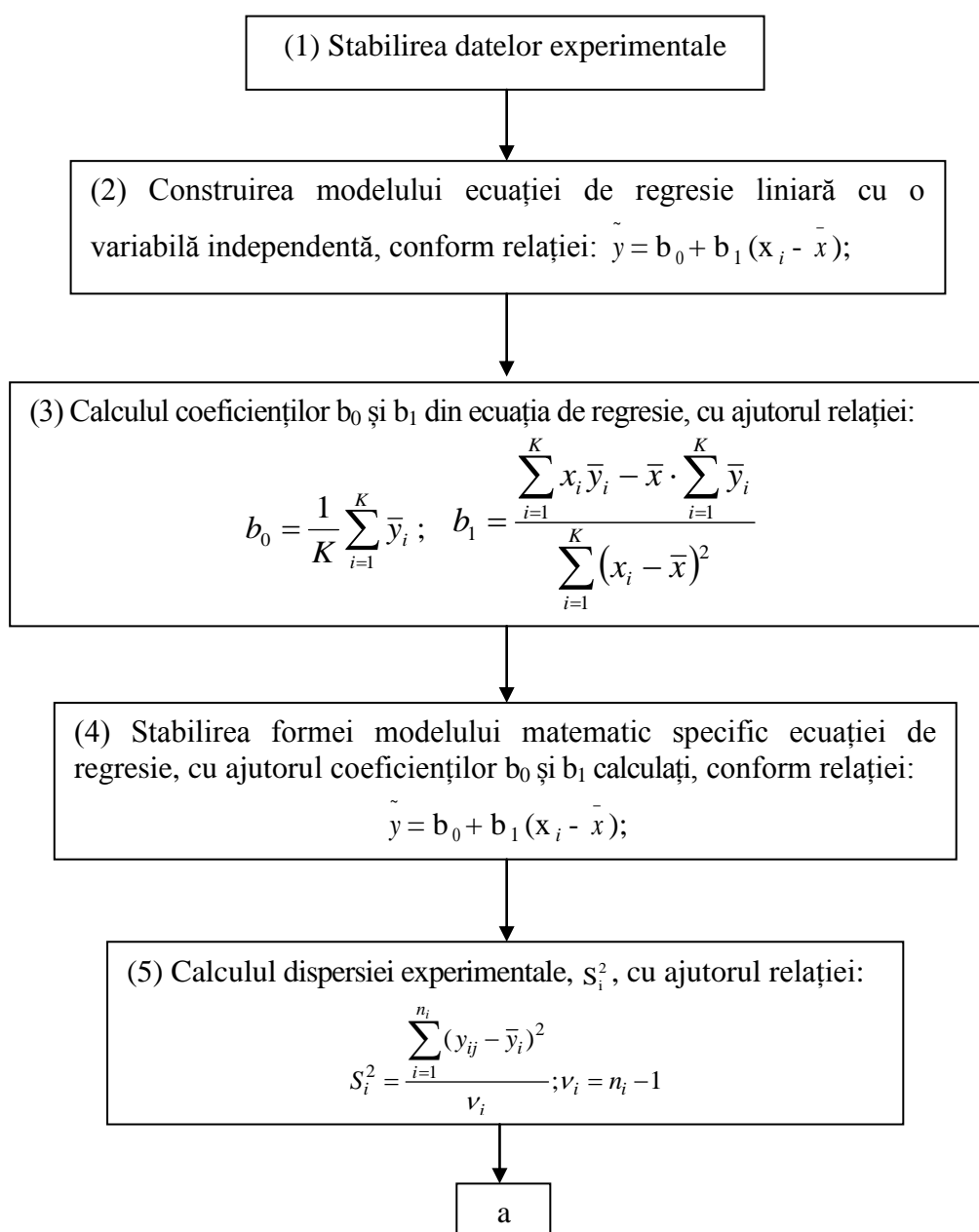
2. experimentul de bază, etapă ce realizează trecere la elaborarea propriu-zisă a modelului și la analiza statistică a acestuia.

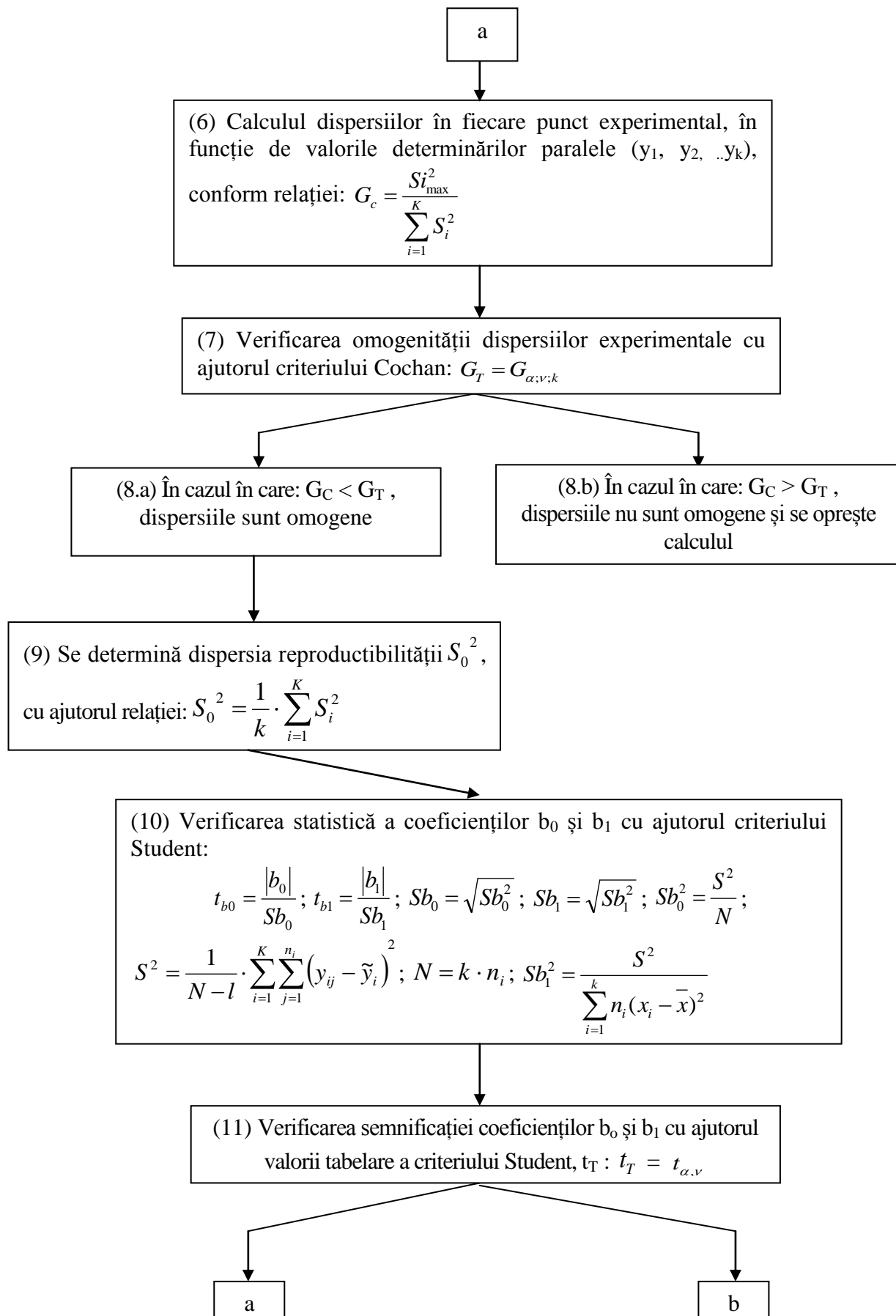
Modul de variație al factorilor implicați în procesul studiat (specific experimentului preliminar), se studiază pe baza unor serii de determinări conform unui program (analiza dispersională, analiza de corelație etc.), permițându-se selectarea factorilor cu o influență semnificativă și în același timp, evidențiindu-se legăturile dintre factori, respectiv aportul lor în desfășurarea procesului. Modelarea legăturilor dintre variabilele unui sistem se realizează cu ajutorul regresiei. La construirea modelelor (în concordanță cu metodele statisticii matematice) cel mai important aspect este studiul concordanței dintre model și datele experimentale, aspect ce se realizează cu ajutorul analizei de regresie [17, 73, 85, 86, 123].

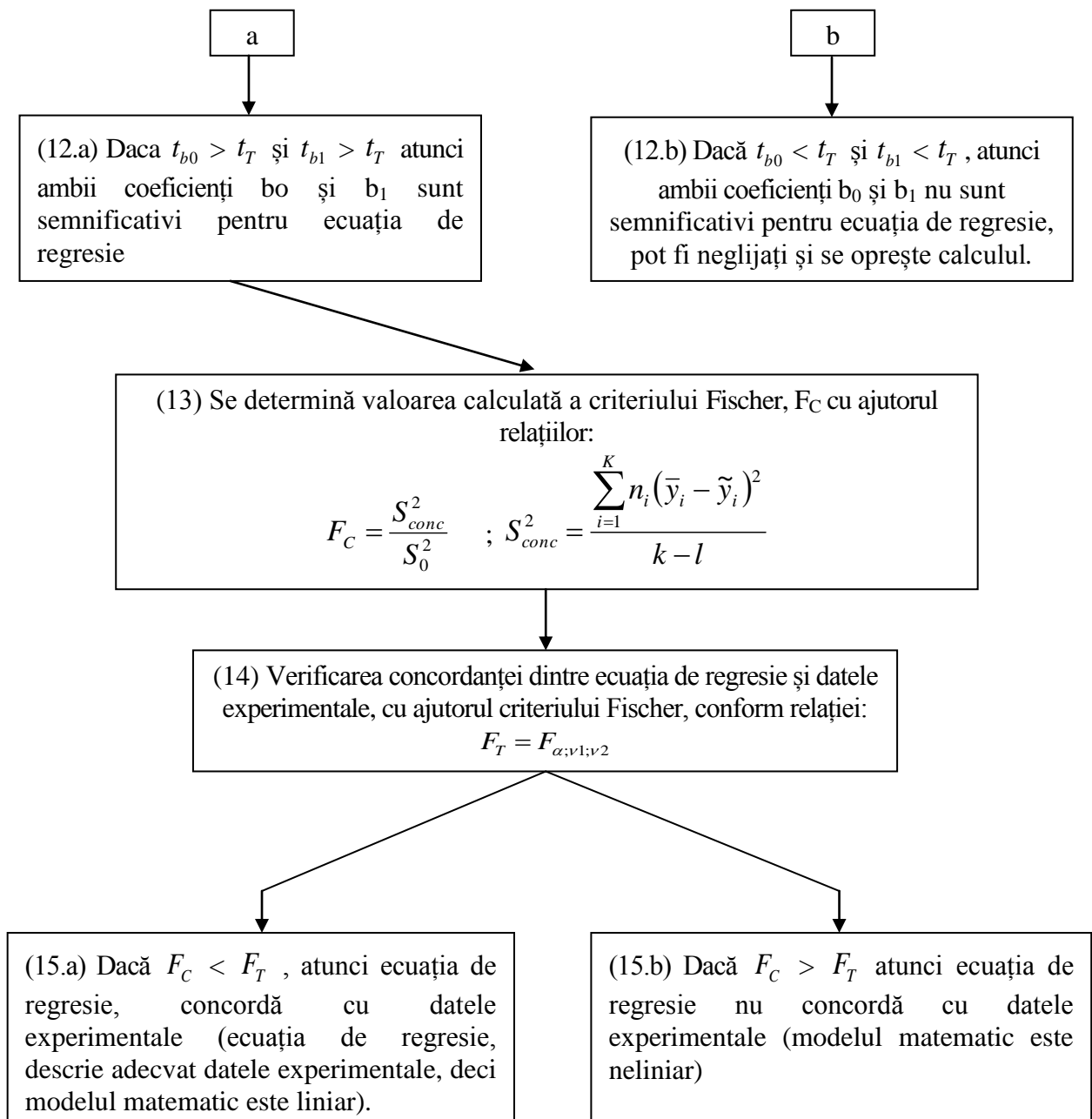
Atunci când în cadrul cercetărilor operaționale avem la dispoziție un număr limitat de rezultate experimentale (k) și se dorește a se determina o dependență liniară, simplă, între variabilele procesului studiat, ecuațiile de regresie liniară (modelul matematic) au fost obținute în ipoteza că forma relațiilor $\tilde{Y} = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ era cunoscută din analiza fizică a problemei. Variabilele X_1, X_2, \dots, X_k (din cadrul procesului studiat) se presupune că au fost determinate cu precizie.

În cadrul proceselor industriale complexe, există posibilitatea ca ipoteza prezentată să nu se verifice și de aceea, ecuațiile obținute prin analiza de regresie sunt supuse unei analize statistice pentru a se stabili dacă concordă sau nu cu datele experimentale.

Etapele de calcul specifice analizei statistice a ecuației de regresie sunt [85, 86]:







unde:

- x_i este variabila procesului;
- \bar{x} este media aritmetică a variabilelor procesului;
- b_0 este coeficientul identificat drept interceptul (indică locul pe ordonata unde dreapta de regresie se intersectează cu OY, valoarea lui Y pentru X=0);
- b_1 este coeficientul de regresie, el indicând panta liniei drepte, arată măsura în care variază caracteristica dependentă în cazul în care caracteristica independentă se modifică cu o unitate.
- k este numărul punctelor experimentale;

- \bar{y}_i este media aritmetică a performanțelor procesului;
- s_i^2 este dispersia experimentală;
- y_{ij} reprezintă performanțele procesului;
- ν reprezintă numărul gradele de libertate; $\nu = n_i - 1$ (pentru criteriul Cochran); $\nu = N - 2$

(pentru criteriul Student);

- n_i reprezintă numărul determinărilor paralele pentru fiecare punct experimental;
- G_c este valoarea calculată a criteriului Cochran;
- G_T este valoarea critică (tabelară) a criteriului Cochran;
- $s_{i \max}^2$ este dispersia maximă experimentală aferentă punctelor experimentale;
- s_o^2 este dispersia reproductibilității;
- $\alpha = 0,05$ este coeficientul statistic al nivelului de încredere utilizat;
- Sb_0^2 este dispersia coeficientului b_0 ;
- Sb_1^2 este dispersia coeficientului b_1 ;
- S^2 este dispersia teoretică;
- N este numărul total de determinări; $N = k \cdot n_i$;
- l este numărul de coeficienți ai ecuației de regresie ($l = 2$);
- \tilde{y}_i valoarea ecuației în fiecare punct “i”;
- t_T este valoarea critică (tabelară) a criteriului Student;
- S_{conc}^2 este dispersia de concordanță;
- F_C este valoarea calculată a criteriului Fischer;
- F_T este valoarea critică (tabelară) a criteriului Fischer;
- ν_1, ν_2 reprezintă numărul de grade de libertate pentru criteriul Fischer, $\nu_1 = k - l$; $\nu_2 = k$;

3.2.1. Contribuții privind analiza statistică a ecuației de regresie

Pe baza etapelor de calcul prezentate, în cadrul activității de cercetare proprii, a fost realizat un instrument software original în limbajul C++ pentru rezolvarea calculelor referitoare la analiza statistică a ecuației de regresie. Acest instrument software este destinat a fi folosit cu succes atât în activitatea de cercetare cât și-n activitatea didactică, având posibilitatea verificării concordanței dintre datele experimentale obținute și modelul matematic rezultat în urma parcurgerii etapelor specifice de lucru [56].

Exemplificând, conform [56] s-a analizat concordanța dintre modelul matematic și datele experimentale, pentru cazul rezultatelor rezilienței (KCU) obținute pe epruvete unei fontă cu grafit nodular aliată cu nichel și cupru, tratată termic prin tratamentul termic de călire izotermă.

Studiul prin comparație al rezultatelor obținute, s-a realizat prin calcularea clasică, respectiv prin calcularea cu ajutorul programului personalizat.

Suplimentar datele obținute au fost verificate și cu ajutorul softului "Origin 8.0."

Mărimile utilizate în calcul au fost:

- variabila măsurată a procesului " x_i ": timpul de menținere în treaptă izotermă, τ_{iz} ;
- performanțele procesului, y_{ij} : reziliența KCU a epruvetelor de Fgn tratată termic;
- numărul de experimente, $k = 6$;
- număr de determinări paralele, efectuate pentru fiecare k experiment a fost $n_i=3$;
- numărul total de date experimentale, $N=k \cdot n_i = 18$;
- coeficientul statistic al nivelului de încredere utilizat, $\alpha = 0,05$ [85];
- valoarea critică (tabelară) a criteriului Cochran, $G_T = 0,6161$ [85];
- valoarea critică (tabelară) a criteriului Student, $t_T = 2,12$ [85];
- valoarea critică (tabelară) a criteriului Fischer, $F_T = 4,53$ [50, 85];

Datele experimentale utilizate în calcul, sunt prezentate în tabelul 3.4.

Tabelul 3.4 Rezultatele experimentale analizate [56]

Puncte experimentale	Variabila procesului τ_{iz} [min]	Media aritmetică a variabilelor procesului	Performanțele procesului, KCU [J/ cm ²]		
k	x_i	\bar{x}_i	y_{ij} (determinări paralele)		
			y_1	y_2	y_3
1	10	35	22	24	23
2	20		28	26	27
3	30		32	30	31
4	40		35	36	35
5	50		38	39	39
6	60		41	43	43

Parcurgând etapele de rezolvare mai sus menționate, în tabelul 4.5. sunt prezentate datele specifice etapei de "programarea experimentului" pe baza analizei de regresie (calcul clasic) [56].

Tabelul 3.5 Programarea experimentului pe baza analizei de regresie (calcul clasic) [56]

Nr. exp K	Variabila x_i	\bar{x}	Performanța procesului				$x_i \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	s_i^2	\bar{y}_i	$(y_i - \bar{y}_i)^2$	$(\bar{y} - \bar{y}_i)^2$
			y_1	y_2	y_3	\bar{y}_i							
1	10	35	22	24	23	23	230	625	2	1	23,164	1,472	0,027
2	20		28	26	27	27	540	225	2	1	27,054	2,298	0,003
3	30		32	30	31	31	930	25	2	1	30,944	2,009	0,003
4	40		35	36	35	35,334	1413,32	25	0,667	0,334	34,834	1,416	0,25
5	50		38	39	39	38,667	1933,3	225	0,667	0,334	38,724	0,205	0,003
6	60		41	43	43	42,334	2539,98	625	2,667	1,334	42,614	2,903	0,078
Σ						197,335	7586,6	1750	10,001	5,002	197,334	10,303	0,364

În tabelul 3.6, sunt prezentate datele specifice etapei de "programarea experimentului" pe baza analizei de regresie (cu ajutorul instrumentului software) [56]

Tabelul 3.6 Programarea experimentului pe baza analizei de regresie (cu ajutorul instrumentului software) [56]

```

Linear regression with an independent variable
=====
1. The regression equation (mathematical model): y = b0 + b1 * (x - x_average)
=====
2. Calculation b0 and b1 coefficients.
=====
| 1 | 10.0000 | 35.0000 | 22.0000 | 24.0000 | 23.0000 | 23.0000 | 230.0000 | 625.0000 | 2.0000 | 1.0000 | 23.1746 | 2.0915 | 0.0305
| 2 | 20.0000 | 35.0000 | 28.0000 | 26.0000 | 27.0000 | 27.0000 | 540.0000 | 225.0000 | 2.0000 | 1.0000 | 27.0603 | 2.0109 | 0.0036
| 3 | 30.0000 | 35.0000 | 32.0000 | 30.0000 | 31.0000 | 31.0000 | 930.0000 | 25.0000 | 2.0000 | 1.0000 | 30.9460 | 2.0087 | 0.0029
| 4 | 40.0000 | 35.0000 | 35.0000 | 36.0000 | 35.0000 | 35.3333 | 1413.3333 | 25.0000 | 0.6667 | 0.3333 | 34.8317 | 1.4214 | 0.2516
| 5 | 50.0000 | 35.0000 | 38.0000 | 39.0000 | 39.0000 | 38.6667 | 1933.3333 | 225.0000 | 0.6667 | 0.3333 | 38.7175 | 0.6744 | 0.0026
| 6 | 60.0000 | 35.0000 | 41.0000 | 43.0000 | 43.0000 | 42.3333 | 2540.0000 | 625.0000 | 2.6667 | 1.3333 | 42.6032 | 2.8851 | 0.0728
b0 = 32.8889
b1 = 0.3886
Ymodel = 32.888889 + 0.388571 * (x - 35.000000)

```

Analizând rezultatele specifice celor două tabele reprezentând "programarea experimentului" pe baza analizei de regresie, calculate prin metoda clasică și cu ajutorul instrumentului software, se remarcă o observație generală și anume: rezultatele calculate prin cele două metode sunt sensibil egale, micile diferențe apărute nepereclitând rezultatul final al studiului. Se presupune ca aceste diferențe au rezultat din faptul că în cadrul metodei clasice de calculare, s-a lucrat cu trei zecimale în timp ce cu ajutorul instrumentului software s-a calculat cu șase zecimale. În figura 3.1, sunt prezentați principalii parametri calculați ai analizei statistice a ecuației de regresie, rezultate în urma utilizării instrumentului software: b_0 și b_1 (coeficienții ec. de regresie); s_i^2 (dispersia experimentală); s_o^2 (dispersia reproductibilității); G_c (valoarea calculată a criteriului Cochran); t_{b0} , t_{b1} (valoarea calculată a criteriului Student) și F_c (valoarea calculată a criteriului Fischer).

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
b0 = 32.8889
b1 = 0.388571
Sj2 = 5
Gc = 0.266667
So2 = 0.833333
tb0 = 167.587
tb1 = 33.8146
Fc = 0.327619

```

Fig. 3.1 Rezultatele analizei statistice a ecuației de regresie calculate cu ajutorul instrumentului software [56]

În tabelul 3.7, sunt prezentate prin comparație, rezultatele calculate prin cele două metode (clasică și cu ajutorul instrumentului software în limbaj C++) ale analizei statistice a ecuației de regresie

Tabelul 3.7 Rezultatele analizei statistice a ecuației de regresie, calculate prin cele două metode (clasică și cu ajutorul instrumentului software în limbaj C++)

Mărimea calculată	Modul de calcul	
	Clasic*	C++
b_0	32,889	32,888889
b_1	0,389	0,388571
s_i^2	5	5
G_c	0,267	0,266667
s_0^2	0,834	0,833333
t_{b0}	173,1	167,587
t_{b1}	35,045	33,8146
F_c	0,327	0,327619
Model matematic	$\tilde{y} = 32,889 + 0,389 \cdot (x_i - 35)$ $\tilde{y} = 19,274 + 0,389 \cdot x_i$	$\tilde{y} = 32,888889 + 0,388571 \cdot (x_i - 35,0000)$ $\tilde{y} = 19,288905 + 0,388571 \cdot x_i$

* calculul s-a realizat cu trei zecimale

Analizând rezultatele prezentate în tabelul 3.7, se remarcă următoarele:

- o observație generală: rezultatele calculate prin cele două metode sunt sensibil egale, anumite diferențe se remarcă numai la calculul coeficienților " t_{b0} " și " t_{b1} ", aceste diferențe

nepreclitând rezultatul final al studiului. Se presupune ca aceste diferențe au rezultat din faptul că în cadrul metodei clasice de calculare, s-a lucrat cu trei zecimale în timp ce cu ajutorul cu ajutorul instrumentului software s-a lucrat cu șase zecimale.

- deoarece valoarea coeficientului de regresie b_1 este pozitivă, conform literaturii de specialitate [17, 73, 83, 85, 86, 123] corelația dintre cei doi parametri este directă;

Ecuatiei de regresie i s-au aplicat cele trei teste statistice: Cochran, Student și Fischer, remarcându-se faptul că rezultate calculate prin cele două metode, au îndeplinit condițiile de acceptare:

1. *Verificarea omogenității dispersiile experimentale (S_i^2), s-a realizat cu ajutorul criteriului Cochran.* Pentru ca dispersiile să fie omogene, trebuia îndeplinită condiția ca valoarea calculată a criteriului Cochran (G_C) să fie mai mică decât valoarea critică/tabelară a acestui criteriu (G_T), conform relației: $G_C < G_T$. Se remarcă faptul că ambele metode de calcul au îndeplinit această condiție:

- în cazul metodei clasice de calcul, s-a obținut: $0,267 < 0,6161$;

- conform metodei de calcul cu ajutorul instrumentului software, s-a obținut: $0,266667 < 0,6161$;

2. *Verificarea semnificației coeficienților b_0 și b_1 din ecuația de regresie, s-a realizat cu ajutorul criteriului Student.* Pentru ca ambii coeficienți să fie semnificativi pentru ecuația de regresie, trebuia ca valoarea calculată pentru coeficientul b_0 (t_{b_0}) respectiv valoarea calculată pentru coeficientul b_{01} (t_{b_1}) să fie mai mari decât valoarea critică (tabelară) a acestui criteriu (t_T) conform relațiilor: $t_{b_0} > t_T$ și $t_{b_1} > t_T$. Se remarcă faptul că ambele metode de calcul au îndeplinit această condiție:

a) în cazul condiției impuse coeficientului b_0 condiția fiind $t_{b_0} > t_T$ a fost îndeplinită de ambele metode de calcul, obținându-se rezultatele:

- conform metodei clasice de calcul, s-au obținut: $173,1 > 2,12$;

- conform metodei de calcul cu ajutorul instrumentului software, s-au obținut valorile: $167,587 > 2,12$;

b) în cazul condiției impuse coeficientului b_1 condiția fiind $t_{b_1} > t_T$ a fost îndeplinită de ambele metode de calcul, obținându-se rezultatele:

- conform metodei clasice de calcul, s-au obținut valorile: $35,045 > 2,12$;

- conform metodei de calcul cu ajutorul instrumentului software, s-au obținut valorile: $33,8146 > 2,12$;

3. Verificarea concordanței dintre ecuația de regresie și datele experimentale, s-a realizat statistic cu ajutorul criteriului Fischer. Condiția ca ecuația de regresie să concorde cu datele experimentale, deci ca ecuația de regresie să descrie adecvat datele experimentale și modelul matematic să fie liniar, era ca valoarea calculată a acestui criteriu (F_C) să fie mai mică decât valoarea critică (tabelară) a acestui criteriu (F_T) conform relației: $F_C < F_T$. Se remarcă faptul că ambele metode de calcul au îndeplinit condițiile specifice criteriului:

- în cazul metodei clasice de calcul, s-au obținut valorile: $0,327 < 4,53$;
- în cazul metodei cu ajutorul instrumentului software, s-au obținut valorile: $0,327619 < 4,53$;

Trasarea dreptei corespunzătoare ecuației de regresie (pentru valorile medii ale rezilienței, KCU_{med} / y_{med}) s-a realizat cu ajutorul softului "Origin 8.0.", fapt prezentat în figura 3.2.

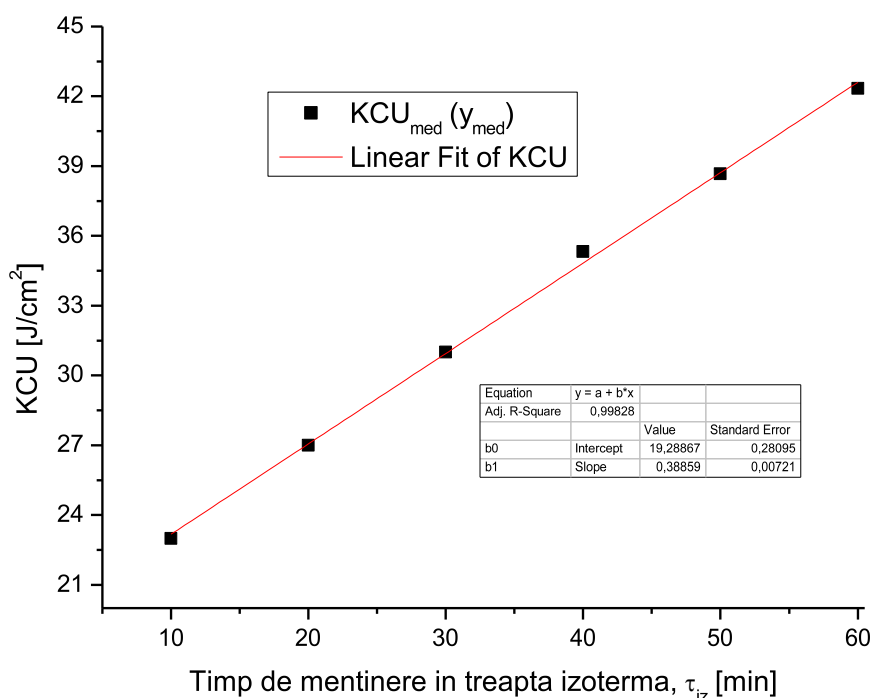


Fig. 3.2. Reprezentarea grafică a valorilor KCU_{med} corespunzătoare ecuației de regresie

Analizând figura 3.2. se pot observa următoarele:

- reprezentarea grafică a valorilor medii ale rezilienței (KCU_{med}) corespunzătoare valorilor performanțelor procesului (y_{ij}) este o linie dreaptă, deci ecuația de regresie este liniară. Acest fapt este certificat atât de către verificarea datelor experimentale cu ajutorul criteriului Fischer (prezentate mai sus) cât și de faptul că în acest grafic, modelul matematic are coeficientul de corelație R-square = 0,99828, deci probabilitatea ca ecuația de regresie să fie liniară este de 99,828%, depășind pragul de semnificație statistic impus inițial de 95% ($\alpha=0,05$).

3.3. Optimizarea proceselor industriale

Optimizarea, reprezintă expresia dorinței omului de a atinge perfecțiunea. Optimizarea poate fi denumită ca operație de studiere a unei probleme în urma căreia se obține un rezultat, care în comparație cu alte rezultate posibile, este cel mai bun, cel mai potrivit, cel mai indicat și în baza căruia se poate lua o decizie cu caracter tehnico-economic [85, 86].

Optimizarea proceselor industriale, a constituit o problemă permanentă pentru specialiștii din domeniu, fapt confirmat și de numărul ridicat de cercetări [1, 4, 18, 28, 31, 33, 35]. Specialiștii angrenați în această cercetare, și-au canalizat activitatea în obținerea unei calități dorite a produselor industriale, executate la un preț cât mai competitiv și care să corespundă unor condiții de producție din ce în ce mai restrictive [33]. Și în cadrul acestui domeniu de studiu, s-a utilizat un instrument software original, introducându-se facilitatea de programare, constând în funcții des utilizate, scris în C++, testat și modificat de autor, care răspunde unor cerințe de optimizare cu grad mare de generalitate.

Optimizarea proceselor industriale, constă în rezolvarea a două etape și anume [85]:

1. determinarea modelului matematic (realizat prin experiment clasic sau experiment activ);
2. aflarea coordonatelor optimului în spațiul multifactorial, acesta presupunând aflarea valorilor extreme (maximă sau minimă) ale unei funcții liniare sau neliniare specifice parametrului de optimizat (funcția obiectiv) în condițiile în care pot exista (sau nu pot exista) anumite restricții aplicate factorilor procesului.

În cazul în care nu sunt aplicate restricții factorilor procesului, optimizarea se numește *fară restricții* iar atunci când factorilor procesului li se aplică anumite restricții impuse de buna funcționare a acestuia, optimizarea se numește *cu restricții*.

La *optimizarea cu restricții* a proceselor industriale, de cele mai multe ori se impun condiții (restricții) cu caracter tehnic sau economic care pot fi de tipul egalitate și/sau inegalitate.

De cele mai multe ori, în domeniul industrial, cauzele care pot genera restricțiile activităților pot fi cauzate fie [85, 86]:

a) restricții tehnologice:

- restricții datorate construcției utilajelor (dimensiune, formă, etc);
- restricții ale factorilor impuși de tehnologia de lucru adoptată: limitări ale temperaturii de lucru, ale semifabricatului ce urmează a fi prelucrat (compoziției chimică, dimensiune, formă, etc.), limitări ale presiunii de lucru, etc.;

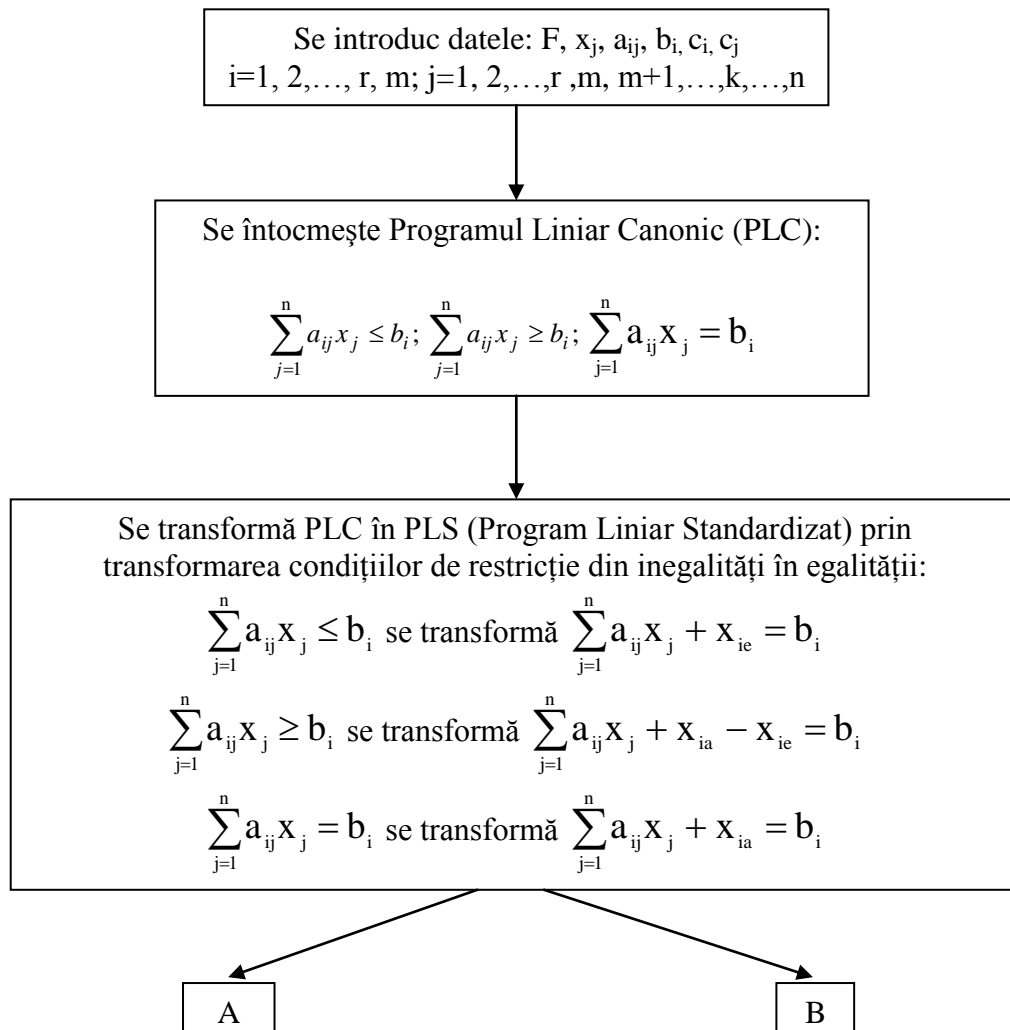
b) restricții de natură economică;

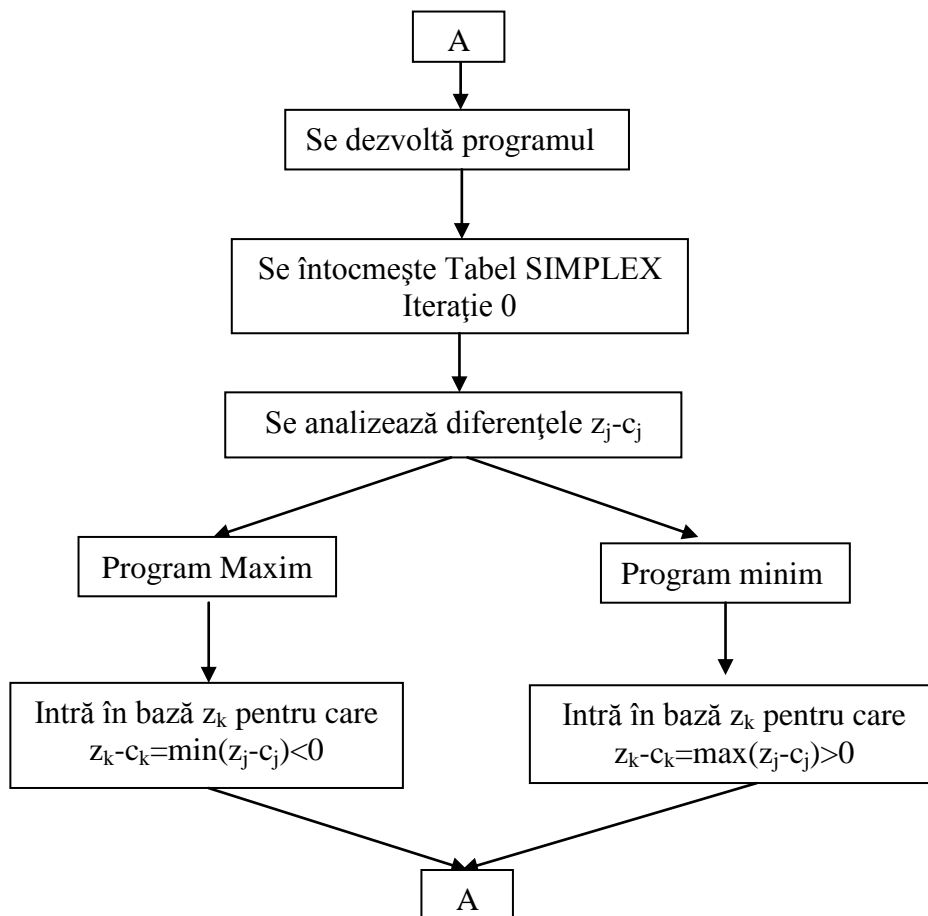
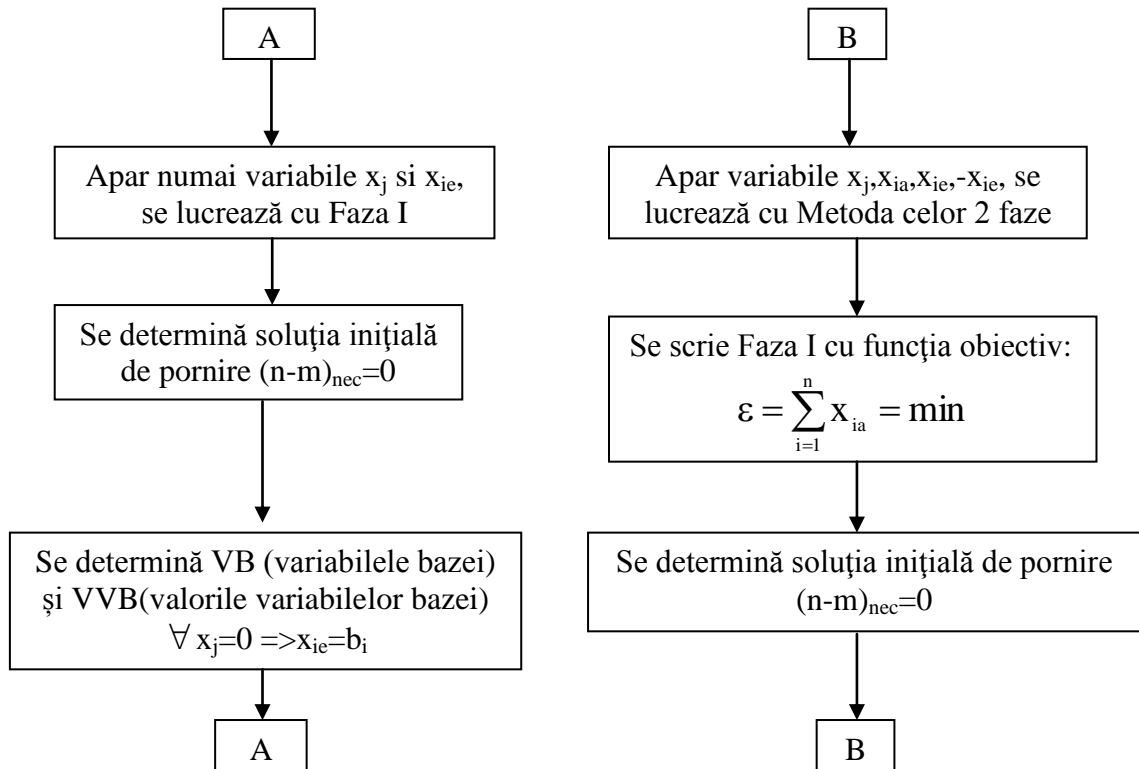
- respectarea unui indicator de calitate impus;
- obținerea unui preț scăzut al produselor procesate,
- realizarea unui rebut cât mai scăzut, etc;

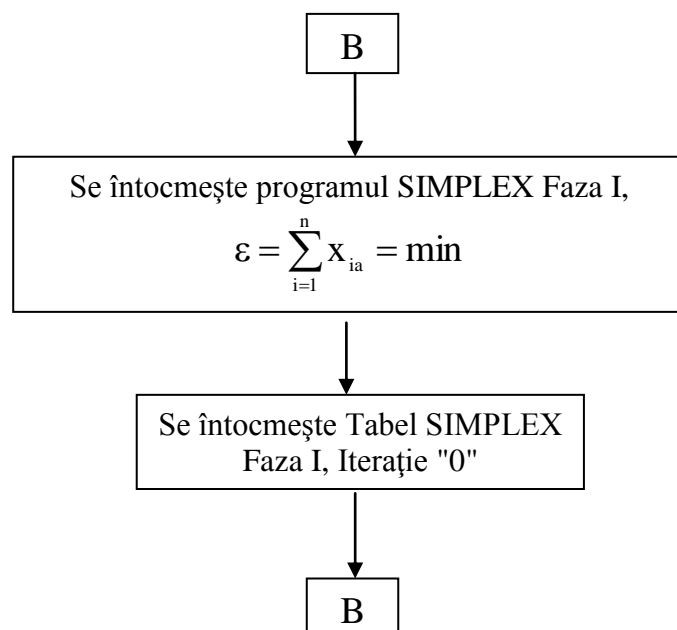
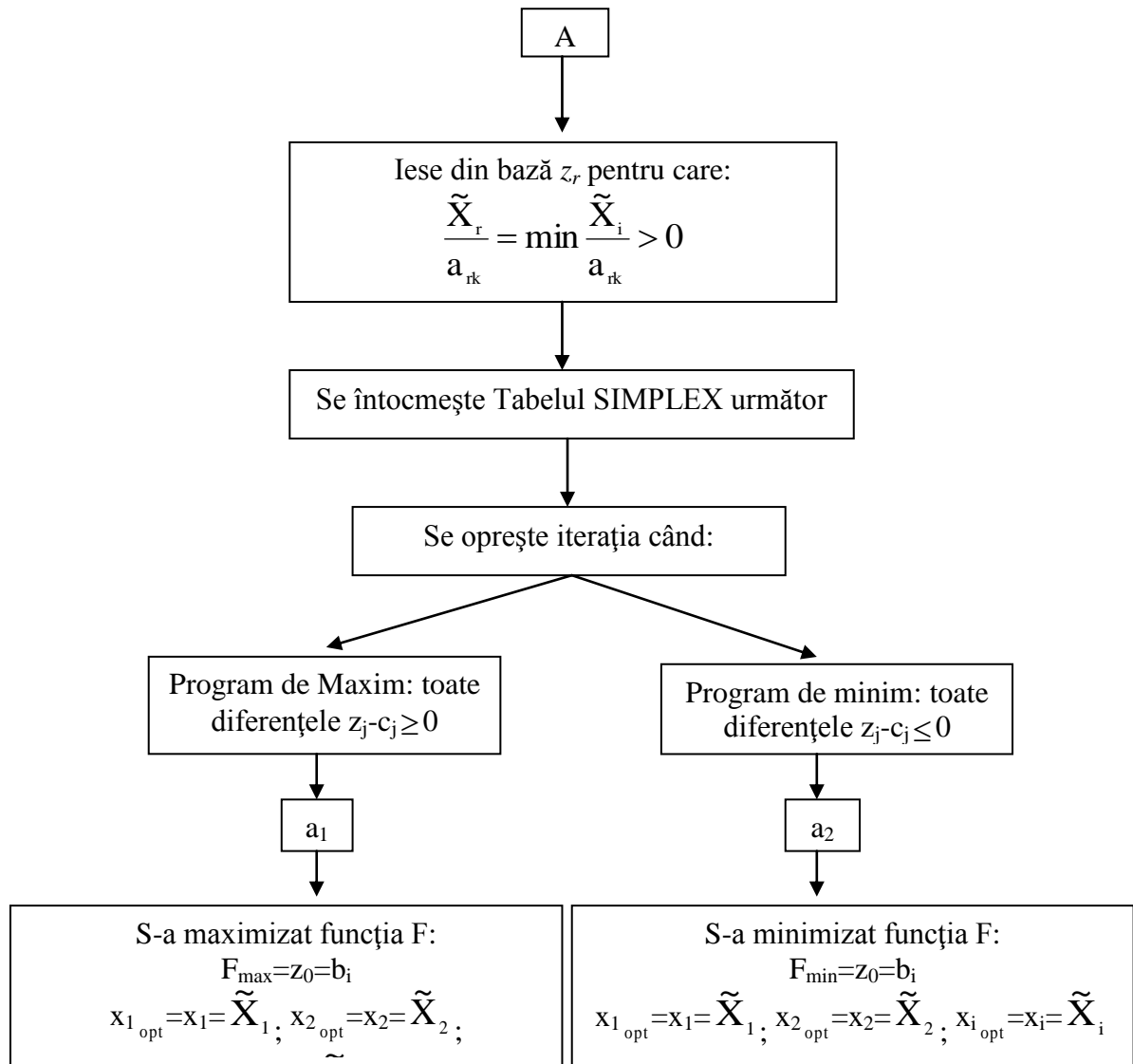
În cazul în care funcția de optimizat și restricțiile sunt liniare se utilizează *programarea liniară*, iar când funcția de optimizat și restricțiile sunt neliniare se utilizează *programarea neliniară* [85, 86].

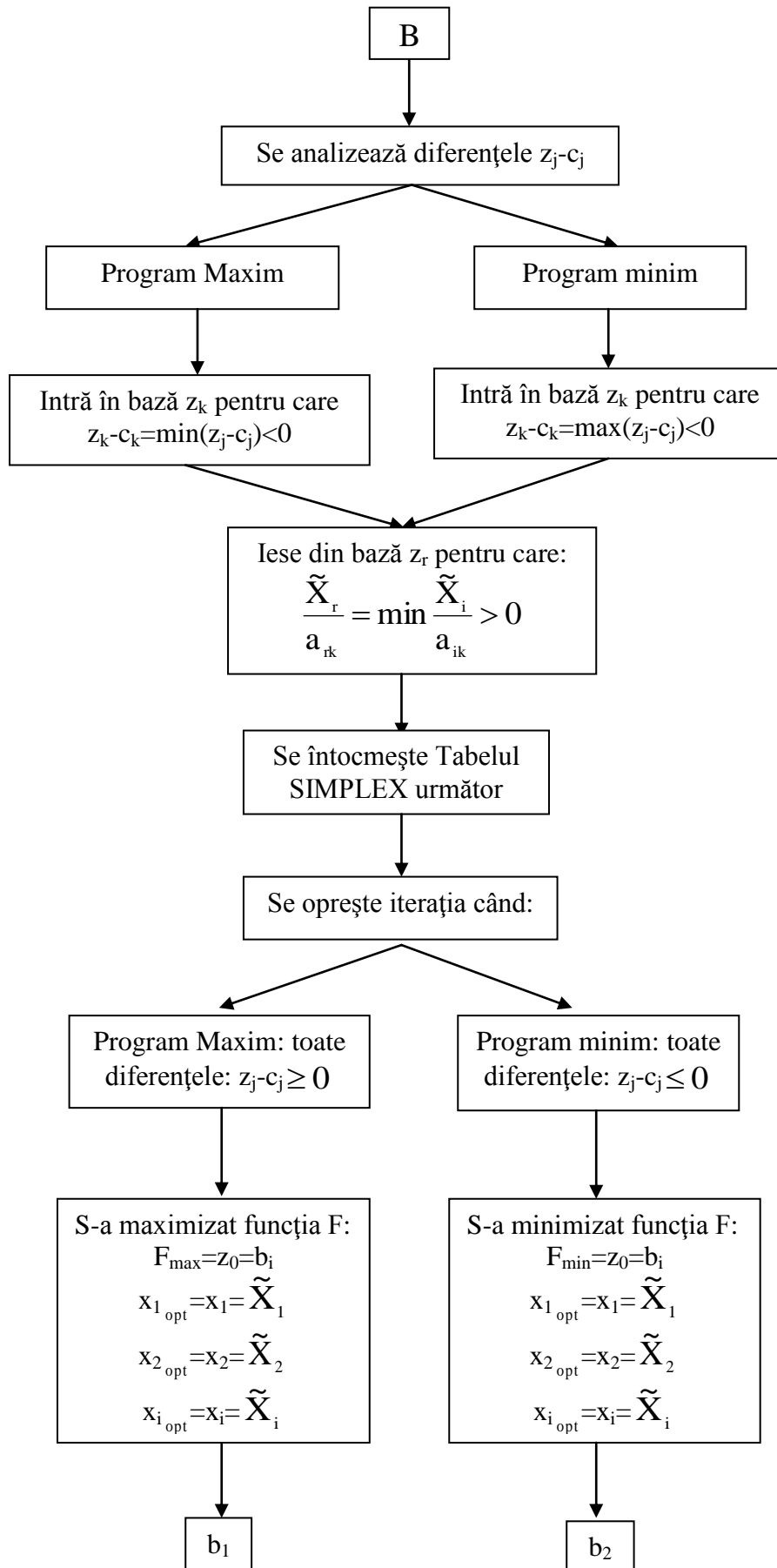
În cadrul procesului de optimizare a proceselor industriale, în acest capitol, este prezentată *metoda de optimizare cu restricții prin programare liniară*, aplicând algoritmul "Simplex". S-a ales această metodă des folosită în detrimentul altor metode, deoarece prin aplicarea algoritmului Simplex, se pot utiliza în vederea optimizării un număr mare de ecuații (m) și de variabile (n).

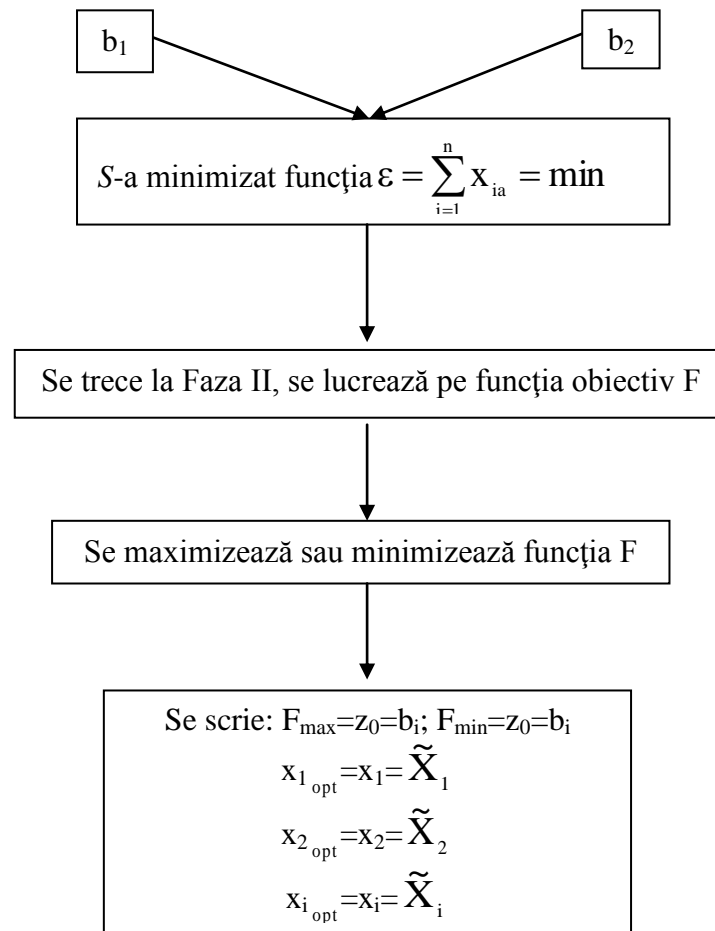
Etapele de calcul specifice optimizării cu restricție prin programare liniară, utilizând algoritmul Simplex, sunt următoarele:











unde:

F este funcția obiectiv; $F = \sum_{j=1}^n c_j x_j = \text{optim}$

x_j - variabilele sistemului;

a_{ij} - coeficienți tehnologici (pot avea valori pozitive, negative sau zero);

b_i - coeficienți calculați;

c_i - coeficienți din funcția obiectiv pentru variabila bazei;

c_j - coeficienți de legătură;

x_{ia} - variabile artificiale (variabile fictive sau de compensare);

x_{ie} - variabile de ecart (variabile fictive sau de compensare);

VB - variabilele bazei;

VVB - valorile variabilei bazei (\tilde{x}_i);

n - numărul de necunoscute ale sistemului;

m - numărul de ecuații ale sistemului;

z_0 - valoarea funcției obiectiv; $z_0 = \sum_{j=1}^m c_j \tilde{x}_j$

z_j - coeficienți din penultima linie; $z_j = \sum_{i=1}^m c_i a_{ij}$

ε - funcție obiectiv ajutătoare; $\varepsilon = \sum_{i=1}^m x_{ia} = x_{1a} + x_{2a} + \dots + x_{ma} = \min$

Construcția unui tabel Simplex este prezentată în tabelul 3.8.

Tabelul 3.8 Construcția unui tabel Simplex [61, 85]

c_j	VB	VVB	c_1	c_2	...	c_r	...	c_m	c_{m+1}	...	c_k	...	c_n
c_i			x_1	x_2	...	x_r	...	x_m	x_{m+1}	...	x_k	...	x_n
c_1	x_1	x_1	1	0	...	0	...	0	$a_{1,m+1}$	...	a_{1k}	...	a_{1n}
c_2	x_2	x_2	0	1	...	0	...	0	$a_{2,m+1}$	...	a_{2k}	...	a_{2n}
.
.
c_r	x_r	x_r	0	0	...	1	...	0	$a_{r,m+1}$	...	a_{rk}	...	a_{rn}
.
.
c_m	x_m	x_m	0	0	...	0	...	1	$a_{m,m+1}$	...	a_{mk}	...	a_{mn}
z_j		z_0	z_1	z_2	...	z_r	...	z_m	z_{m+1}	...	z_k	...	z_n
		$z_j - c_j$	$z_1 - c_1$	$z_2 - c_2$	...	$z_r - c_r$	...	$z_m - c_m$	$z_{m+1} - c_{m+1}$	...	$z_k - c_k$	...	$z_n - c_n$

3.3.1. Contribuții privind optimizarea proceselor industriale prin programare liniară

Sunt situații când strategia de conducere a proceselor industriale, impune folosirea în cadrul procesului a rezultatelor obținute în urma procesului de optimizare și de a se aștepta ca procesul să ajungă la optimul staționar calculat. Această optimizare a proceselor industriale se numește optimizare staționară (statică) [85, 86].

Există și o optimizare dinamică a proceselor industriale, în care procesele se desfășoară în condiții tranzitorii, optimizarea staționară furnizând insuficiente informații despre optimul procesului. În cadrul activității de cercetare cât și-n activitatea didactică, s-a folosit cu succes a fost realizat un instrument software original scris în limbajul C++, bazat pe etapele specifice optimizării statice (staționare) prin programare liniară cu ajutorul algoritmului Simplex (prezentat mai sus), introducând facilitatea de programare, constând în funcții des utilizate, scris în C++, testat și modificat de autor, acest program rezolvând probleme de optimizare cu grad mare de generalitate [57-62].

Pentru exemplificare, s-a realizat optimizarea calculului tehnico-economic specific tratamentelor termice aplicate unor repere din oțelul inoxidabil EN 1.4136, analizat pe parcursul tezei de abilitare.

În cadrul experimentelor s-a avut în vedere realizarea tratamentului termic a 3 repere (R1, R2, R3) din oțel inoxidabil EN 1.4136, utilizând 3 linii de tratament termic (L1, L2, L3).

Reperele introduse în calculul optimizării prin programare liniară sunt: reper 1 (R1): supapă; reper 2 (R2): bucsă; reper 3 (R3): roată dințată. Cele 3 linii de tratamente termice în care se realizează tratamentele termice au următoarele caracteristici tehnologice:

L1- cuptor de călire cu bazin integrat de ulei și atmosferă Endo; temperatura maximă de lucru, $t_{\max}=1250^{\circ}\text{C}$;

L2- cuptor de călire cu bazin integrat de ulei și atmosferă Endo; temperatura maximă de lucru, $t_{\max}=1250^{\circ}\text{C}$;

L3- cuptor de călire cu vid, temperatura maximă de lucru $t_{\max}=1250^{\circ}\text{C}$; principalele avantaje ale călirii în vid sunt: deformațiile și tensiunile reduse; cât și un aspect curat al suprafeței piesei;

Cantitatea maximă de piese [u.m.], ce poate fi tratată termic specifică cele 3 linii de tratament termic (L1, L2 și L3), planificarea producției specifică celor 3 repere (R1, R2 și R3) cât și beneficiu unitar [u.m.] pentru fiecare reper în parte, este prezentată în tabelul 3.9.

Tabelul 3.9 Datele specifice optimizării

Reper oțel inoxidabil EN 1.4136 Linie de TT	R1	R2	R3	Capacitatea maximă de tratament termic a liniilor [u.m.]
L1 [u.m.]	1,3	0,5	1,1	8,5
L2 [u.m.]	0,5	0,9	1,8	9
L3 [u.m.]	0,8	1,3	0,6	8
Beneficiu unitar [u.m.]	112	121	135	-

Observație: valorile prezentate în tabelul 3.9 sunt orientative, fiind folosite la verificarea programului.

Cerința aplicației este: să se determine planul optim de producție al secției de tratamente termice pentru cele 3 repere (R1, R2 și R3) astfel încât beneficiul să fie maxim.

Aplicând algoritmul Simplex, se stabilește Programul Liniar Canonic (PLC):

Funcția obiectiv (funcția de optimizat este beneficiul maxim al societății):

$$F=112x_1+121x_2+135x_3=\text{Maxim} \quad (4.3.)$$

Restricțiile problemei sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,3x_1+0,5x_2+1,1x_3 \leq 8,5 \\ 0,5x_1+0,9x_2+1,8x_3 \leq 9 \\ 0,8x_1+1,3x_2+0,6x_3 \leq 8 \end{array} \right. \quad (4.4.)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,5x_1+0,9x_2+1,8x_3 \leq 9 \\ 0,8x_1+1,3x_2+0,6x_3 \leq 8 \end{array} \right. \quad (4.5.)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,8x_1+1,3x_2+0,6x_3 \leq 8 \end{array} \right. \quad (4.6.)$$

Condițiile de nenegativitate:

$$x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; x_3 \geq 0; \quad (4.7.)$$

Urmând etapele de rezolvare prezentate anterior, datele rezultate se introduc în program, fapt prezentat în figura 3.3.

```

E:\OPTIMIZARE\SimplexProgram1.exe
Numarul de variabile:3
x1=112
x2=121
x3=135
Program de minim <D/N>?N
Numarul de inecuatii:3
Inecuatia 1
  x1=1.3
  x2=0.5
  x3=1.1
  Termen liber: 8.5
  Semn: <=
Inecuatia 2
  x1=0.5
  x2=0.9
  x3=1.8
  Termen liber: 9
  Semn: <=
Inecuatia 3
  x1=0.8
  x2=1.3
  x3=0.6
  Termen liber: 8
  Semn: <=_

```

Fig. 3.3 Datele de intrare ale algoritmului Simplex

Rezolvarea programului conform etapelor de calcul specifice optimizării prin programare liniară aplicând algoritmul Simplex, trecând prin toate iterațiile (schimbări de bază), cu indicarea

variabilelor care intră/ies din bază cât și prezentarea valorii pivotului (în funcție de care se construiesc noile tabele Simplex), sunt prezentate în tabelele 3.10 și 3.11.

Tabelul 3.10 Tabel Simplex - Faza I (Iterația 0 și 1)

Optimizare-Simplex-Otel EN 14136 - Notepad									
File Edit Format View Help									
Tabel Simplex - faza I (Iteratie 0)									
\ Cj	VB	VVB	0	0	0	1.1e+002	1.2e+002	1.4e+002	
Ci \			x1e	x2e	x3e	x1	x2	x3	
0	x1e	8.5	1	0	0	1.3	0.5	1.1	
0	x2e	9	0	1	0	0.5	0.9	1.8	
0	x3e	8	0	0	1	0.8	1.3	0.6	
	Zj	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Zj-Cj		0	0	0	-1.1e+002	-1.2e+002	-1.4e+002	
Intra in baza: x3 Iese din baza: x2e									
Tabel Simplex - faza I (Iteratie 1)									
\ Cj	VB	VVB	0	0	0	1.1e+002	1.2e+002	1.4e+002	
Ci \			x1e	x2e	x3e	x1	x2	x3	
0	x1e	3	1	-	0	0.99	-0.05	0	
1.4e+002	x3	5	0	-	0	0.28	0.5	1	
0	x3e	5	0	-	1	0.63	1	0	
	Zj	675.00	0.00	-	0.00	37.50	67.50	135.00	
	Zj-Cj		0	-	0	-75	-54	0	
Intra in baza: x1 Iese din baza: x1e									

Din tabelul 3.10 se remarcă următoarele:

- la tabelul Simplex inițial (iterație 0) a ieșit din bază x_{2e} , a intrat în bază x_3 , pivotul fiind valoarea 1,8;

- la tabelul Simplex, iterație 1, a ieșit din bază x_{1e} , a intrat în bază x_1 , pivotul fiind valoarea 0,99;

- plecând de la o valoare a variabilei bazei $VVB=0$ (specifice iterație 0), se ajungă la o valoare $VVB=675$ (specifică iterație 1), ceea ce demonstrează că programul se maximizează.

În tabelul 3.11 este prezentată Faza I (Iterația 2 și 3) a tabelului Simplex

Tabelul 3.11 Tabel Simplex-Faza I (Iterația 2 și 3)

Tabel Simplex - faza I (Iteratie 2)									
\ Cj	VB	VVB	0	0	0	1.1e+002	1.2e+002	1.4e+002	
Ci \			x1e	x2e	x3e	x1	x2	x3	
1.1e+002	x1	3	-	-	0	1	-0.05	0	
1.4e+002	x3	4.2	-	-	0	0	0.51	1	
0	x3e	3.1	-	-	1	0	1	0	
	Zj	899.75	-	-	0.00	112.00	63.75	135.00	
	Zj-Cj		-	-	0	0	-57	0	

Intra in baza: x2
Iese din baza: x3e

Tabel Simplex - faza I (Iteratie 3)									
\ Cj	VB	VVB	0	0	0	1.1e+002	1.2e+002	1.4e+002	
Ci \			x1e	x2e	x3e	x1	x2	x3	
1.1e+002	x1	3.2	-	-	-	1	0	0	
1.4e+002	x3	2.6	-	-	-	0	0	1	
1.2e+002	x2	3	-	-	-	0	1	0	
	Zj	1071.15	-	-	-	112.00	121.00	135.00	
	Zj-Cj		-	-	-	0	0	0	

Intra in baza:
Iese din baza:
Functia = 1.1e+003
x1 = 3.2
x3 = 2.6
x2 = 3

Din tabelul 3.11, se remarcă următoarele:

- la tabelul Simplex iterație 2 a ieșit din bază x_{3e} , a intrat în bază x_2 , pivotul fiind valoarea 1;

- la tabelul Simplex iterație 3, toate diferențele ($z_j - c_j$) de pe ultima line au valoarea 0 ceea ce demonstrează faptul că s-a maximizat programul.

După rularea programului, rezultatele obținute în urma optimizării prin programare liniară, utilizând algoritmului Simplex au fost:

- ✓ valoarea optimă calculată (beneficiu): $z_0 = F_{\text{Max}} = 1071,15$ [u.m.], cu următoarele soluțiile ale planului optim de producție:
 - $x_{1 \text{ opt}} = 3,2$ (cantitatea de piese tratată termic, specifică reperului 1);
 - $x_{2 \text{ opt}} = 3$ (cantitatea de piese tratată termic, specifică reperului 2);
 - $x_{3 \text{ opt}} = 2,6$ (cantitatea de piese tratată termic, specifică reperului 3);

Analizând datele mai sus prezentate, se pot face următoarele observații:

1. În cazul optimizării beneficiului unitar al unei societății care realizează tratamente termice pentru 3 reperi din oțelul inoxidabil EN 1.4136: reper 1 (R1): supapă; reper 2 (R2): bucsă; reper 3 (R3): roată dințată, se realizează o maximizare a acestuia;

2. Se remarcă faptul că valoarea funcției de optimizat (z_0) crește, pornind de la 0 (specifică iterație 0), trece pe rând (conform fiecărei iterații în parte) la valorile: 675; 899,75 și în final la valoarea de 1071,15 [u.m.], când se îndeplinește condiția de maxim a programului, calculul fiind finalizat, iar programul de maxim, fiind verificat;

3. Se realizează verificarea funcție obiectiv (F_{\max}):

$$F_{\max} = (112 \times 3,2) + (121 \times 3) + (135 \times 2,6) = 1072,4 \text{ u.m.}$$

Se remarcă faptul că prin verificarea calculelor specifice funcției obiectiv se obține rezultatul: $F_{\max} = 1071,15$ u.m., care este aproximativ egal cu valoarea maximă a funcției optimizată cu ajutorul programului ($F_{\max} = 1072,4$ u.m.);

4. Soluția optimă face egalități pentru toate restricțiile programului Simplex. Starea sistemului de restricții și gradul de utilizare al celor 3 linii de tratament termic pentru soluția optimă, sunt prezentate în tabelul 3.12.

Tabelul 3.12 Starea sistemului de restricții și gradul de utilizare al celor 3 linii de tratament termic pentru soluția optimă

Linii de tratament termic	Cantitatea de piese tratată termic pentru programul optim [u.m.] (R1+R2+R3)	Capacitatea maximă de tratament termic a liniilor [u.m.]	Gradul de utilizare al liniilor [%]
L1 [u.m.]	$(1,3 \cdot 3,2) + (0,5 \cdot 3) + (1,1 \cdot 2,6) \approx 8,5$	8,5	100
L2 [u.m.]	$(0,5 \cdot 3,2) + (0,9 \cdot 3) + (1,8 \cdot 2,6) \approx 9$	9	100
L3 [u.m.]	$(0,8 \cdot 3,2) + (1,3 \cdot 3) + (0,6 \cdot 2,6) \approx 8$	8	100

Se remarcă faptul că toate cele 3 liniile de tratament termic (L1, L2 și L3), au valori ale gradului de utilizare de 100 % atunci când se respectă soluțiile planului de producție calculat prin rularea programului.

5. Spre deosebire de rezolvarea clasică a optimizării prin programare liniară (pe baza algoritmului Simplex) care durează câteva ore, în cazul utilizării instrumentului software, cu ajutorul unui PC, timpul se reduce la 2-3 minute (necesar introducerii datelor ce urmează a fi optimizate), astfel încât programarea producției se realizează în timp util.

3.4. Concluzii

Analizând datele prezentate în cadrul acestui capitol, se remarcă următoarele concluzii:

✓ *referitor la aplicațiile privind identificarea și îndepărtarea rezultatelor anormale din cercetările experimentale, se remarcă următoarea observație generală:*

- în urma aplicării celor două criterii: Chauvenet și Romanowski, ambele au identificat aceleași valori anormale din cadrul datele experimentale;

- după îndepărtarea rezultatelor anormale și aplicarea celor două criterii asupra rezultatelor experimentale rămase, nu au mai fost depistate rezultate anormale;

- ambele criterii pot fi folosite cu succes în identificarea și îndepărtarea valorilor anormale ale rezultatelor experimentale atunci când sunt folosite pentru un șir de valori la care $n < 100$;

✓ *referitor la modelarea matematică prin experiment clasic, se remarcă următoarele observații:*

- atunci când în cadrul cercetărilor operaționale există un număr limitat de rezultate experimentale și se dorește a se determina o dependență liniară, simplă, între variabilele procesului studiat, aceasta se poate realiza cu ajutorul ecuației de regresie;

- la construirea modelelor (în concordanță cu metodele statisticii matematice) cel mai important aspect este studiul concordanței dintre model și datele experimentale, aspect ce se realizează cu ajutorul analizei de regresie;

- în cazul exemplului de față, s-a realizat analiza statistică a ecuației de regresie prin două metode: o metodă clasică de calcul și o metodă de calcul cu ajutorul unui instrument software original scris în limbajul C++. După parcurgerea etapelor specifice de calcul s-a realizat analiza comparativă a valorilor calculate prin cele două metode, remarcându-se faptul că rezultatele calculate prin cele două metode sunt sensibil egale, anumite diferențe remarcându-se la calculul coeficienților " t_{b0} " și " t_{b1} ", aceste diferențe nepereclitând rezultatul final al studiului. Se presupune ca aceste diferențe au rezultat din faptul că în cadrul metodei clasice de calculare, s-a lucrat cu trei zecimale în timp ce prin utilizarea instrumentului software s-a calculat cu șase zecimale;

✓ *referitor la optimizarea proceselor industriale, se remarcă următoarele observații:*

- la optimizarea cu restricții a proceselor industriale, de cele mai multe ori se impun condiții (restricții) cu caracter tehnic sau economic care pot fi de tipul egalitate și/sau inegalitate;

- în cadrul calculului experimental, s-a avut în vedere realizarea tratamentului termic a 3 repere din oțel inoxidabil EN 1.4136, utilizând 3 linii de tratament termic. *Cerința aplicației* a fost determinarea planului optim de producție, astfel încât să se obțină un beneficiu unitar maxim. Și în acest caz s-a apelat la un program personal de optimizare, iar în urma rulării programului s-a determinat planul optim de producție în condițiile realizării unui beneficiu maxim;

- în ambele cazuri în care s-au utilizat programele pe un PC, atât la modelare cât și la optimizare, timpul s-a redus la 2-3 minute (în comparație cu calculul clasic care poate dura câteva ore), obținându-se în același timp rezultate verificabile.

(B-ii) PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI

Preambul

I. Cariera profesională (1983-1989)

Imediat după absolvirea facultății în 1983, cariera profesională a autorului a avut la bază experiența acumulată în activitatea industrială specifică producției, cercetării științifice cât și didactice, desfășurată în perioada 1983-1989 (din anul 1989 fiind angajat prin concurs în calitate de asistent în Universitatea din Brașov, catedra Utilaj Tehnologic).

I.1. Activitatea de cercetare științifică specifică perioadei 1983-1989

- în perioada: 1983-1986 inginer în Întreprinderea "Tractorul" Brașov, având ca domeniu de activitate implementarea tehnologiilor de formare-turnare a fontelor cenușii la diferite reperi specifice tractoarelor: puntea tractorului 1010; blocul motor; chiuloasa; ambreiajul, etc., mai târziu coordonând desfășurarea activității în schimburi de lucru. În urma activității de cercetare din acea perioadă, autorul a publicat primul articol într-un colectiv ce studia "Influența unor parametri ai tehnologiei de lucru asupra fontelor cu grafit nodular", publicat la Sesiunea Științifică "Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrări la cald", organizat de Universitatea din Brașov, vol. 1, p. 47-56, 1984.

- în perioada: 1986- decembrie 1989, inginer în Întreprinderea "Rulmentul" Brașov, având ca domeniu de activitate implementarea tehnologiei de fabricare a discurilor de șlefuit bile (fabricate din fontă mehanită), cât și implementarea tehnologiilor de fabricare a cuzineților (sinterizare în vederea obținerii la parametri optimi ai cuzineților).

Activitatea de cercetare din această perioadă s-a materializat prin rezolvarea problemelor tehnologice (în calitate de șef colectiv), cuprinse în contractele de cercetare, în parteneriat cu Universitatea din Brașov:

- Contract nr. 177/1987, intitulat: "Cercetări privind înlăturarea microretasurilor din discurile de pilit bile ϕ 915, din fontă mehanită tip URB-A", contract în parteneriat cu Universitatea din Brașov;

- Contract nr. 78/1988, intitulat: "Cercetarea deformării inelelor cu canale tip Z și N la tratament termic", contract în parteneriat cu Universitatea din Brașov;

- Contract nr. 178/1988, intitulat: "Cercetări privind înlăturarea microporozităților din discurile de pilit bile din fontă mehanică tip URB-A", contract în parteneriat cu Universitatea din Brașov;

În același timp, în calitate de titularul, autorul a realizat un brevet de inovație cu titlul: "Masă de ștampare", înregistrat cu nr. 621/16.08.1989 (MICM - DT).

I.2. Activitatea didactică specifică perioadei 1983-1989

În perioada 1987- decembrie 1989 ca angajat la Întreprinderea "Rulmentul" Brașov (inginer tehnolog, serviciul Metalurg), autorul a susținut ore didactice (laboratoare) la disciplinele: "Elaborarea și turnarea oțelului" și "Elaborarea și turnarea fontei", studenților de la secția seral a specializării Turnarea Metalelor, catedra Utilaj Tehnologic, Facultatea TCM, Universitatea din Brașov.

II. Cariera profesională în calitate de angajat al Universității "Transilvania" din Brașov (1989-prezent)

Autorul a fost angajat (prin concurs) în cadrul Universității din Brașov, în calitate de asistent în anul 1989 și câțiva ani mai târziu a obținut titlul de doctor (1998) cu o temă specifică procesării prin tratamente termice a fontelor speciale cu grafit nodular bainitice .

Desfășurând de aproximativ 27 de ani o activitate didactică cu studenții Universității Transilvania din Brașov, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor, autorul a fost implicat în următoarele activități didactice (cursuri, laboratoare, seminarii, proiecte), coordonând peste 125 de proiecte (Licență și Master):

- Modelarea, simularea și optimizarea proceselor industriale (Master, an II);
- Reciclarea și managementul materialelor (Master, an I);
- Managementul total al calității (Master, an II);
- Tehnologii curate în protecția mediului industrial (Licența, an II, III, IV);
- Modelarea și optimizarea proceselor industriale (Licență an III și IV);
- Aliaje cu proprietăți speciale (Licență an III);
- Managementul calității (Licență an III, IV);
- Procedee unitare în metalurgie (Licență an III).

Începând cu octombrie 2001, după obținerea prin concurs a titlului științific de profesor universitar, activitatea științifică s-a desfășurat până în prezent în câteva direcții de bază, putând fi analizată conform datele prezentate în capitolul B-i.

Dezvoltarea carierei universitare viitoare se va face în două direcții principale:

- Activitatea didactică (educațională);
- Activitatea de cercetare

II. 1. Dezvoltarea activității didactice

Se intenționează a redacta cursul și aplicațiile la disciplinele "Modelarea și optimizare proceselor industriale" și "Managementul mediului".

În vederea dezvoltării activității educaționale, voi continua să-mi îmbunătățesc metodologia de predare, realizând o implicare mai intensă a studenților în procesul de învățare și cercetare, astfel:

- îmbogățirea cursurilor existente cu mai multe aplicații, realizând o largă descriere a domeniilor industriale și completarea acestora cu aspecte specifice de management;
- exemplificarea proceselor industriale (în cadrul orelor de laborator și proiect) prin intensificarea colaborării cu factorii industriali, realizând vizite de documentare pe platformele industriale din județ și din țară;
- afișarea pe platforma e-learning a tuturor cursurilor pe care le predau, cu actualizarea acestora la fiecare început de an universitar, realizând astfel accesul mai ușor al studenților la informațiile actualizate;
- afișarea din timp a temelor de licență sau de dizertație și propunerea unor teme de actualitate cu largă aplicabilitate industrială;
- implicarea mea activă în toate activitățile didactice și științifice desfășurate la nivel de departament, facultate și universitate.

II. 2. Dezvoltarea activității de cercetare

Față de direcțiile de cercetare prioritare (după susținerea tezei de doctorat în 1998 și ultima avansare la gradul didactic de profesor în 2001) care au fost prezentate în capitolul 1, ca urmare a infrastructurii avansate din cadrul Centrului de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale

avansate metalice, ceramice și compozite" aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov, cât și datorită contactului cu noi discipline apărute la noua specializare universitară a facultății noastre: "Ingineria biomaterialelor", s-au adăugat și alte noi direcții de dezvoltare în concordanță cu planul strategic al departamentului, facultății și universității noastre, racordate la prioritățile naționale și europene:

- utilizarea energiei solare și a energiei electrice în procesarea materialelor biocompatibile;
- procesarea și reciclarea materialelor compozite din pulberi metalice cu utilizare industrială;
- procesarea și reciclarea materialelor plastice cu utilizare industrială;
- modelarea proceselor industriale prin experiment activ (2^k și 3^k) și realizarea unui program care să corespundă restricțiilor tehnologice impuse;
- optimizarea dinamică a diferitelor procese industriale și realizarea unui program specific;
- implementarea managementului și auditului mediului în industrie, în conformitate cu standardele ISO 14001 și ISO 19011;

Dezvoltarea activității de cercetare viitoare se va axa ca și până acum pe participarea la diferite proiecte de cercetare naționale și internaționale, la evenimente de specialitate naționale și internaționale, prin publicarea și diseminarea rezultatelor de cercetare cât și prin colaborarea și dezvoltarea de noi metode de procesare a materialelor avansate. La aceste activități vor fi cooptați studenții din ciclurile de licență, masterat și doctorat, în vederea realizării lucrărilor de diplomă, dizertație sau a tezelor de doctorat.

Odată cu diversificarea domeniilor de cercetare științifică și pentru creșterea relevanței cât și a impactului activității de cercetare, autorul își propune următoarele:

- publicarea unui minim de două articole pe an în reviste științifice indexate Thomson Reuters, în special în reviste ce au ca factor de influență de minim 0,5;
- publicarea unui minim de două articole pe an, indexate BDI;
- participarea la Proiecte/Granturi internaționale și naționale, care să dezvolte tehnologiile curate cât și sursele alternative de procesare industrială, în care să fie implicați tinerii cercetători (doctoranzi, masteranzi).

Un exemplu ce confirmă implicarea autorului în activitatea de cercetare la nivel internațional, este participarea în calitate de membru (2014), respectiv Director (2015, 2016, 2017) la Grantul FP7-INFRA-312643 finanțator: Uniunea Europeană.

Ca o confirmare a continuității activității de cercetare și ca o certificare a domeniilor de interes studiate, și în anul 2017, 2 noi propuneri de Granturi-FP7-INFRA-312643, finanțator Uniunea Europeană și CIEMAT-PSA la care autorul prezentei teze are calitatea de Director, au fost aprobate și derulate.

Primul Grant FP7-INFRA-312643 cod P1701100227/2017 intitulat "*Solar-assisted treating of some new stainless steels for biomedical applications, SOLAR-BIOMAT*" [114], a avut ca tema de cercetare procesarea cu ajutorul energiei solare a oțelurilor biocompatibile. Finanțatorul a fost Uniunea Europeană, CIEMAT-PSA, loc de desfășurare: Centrul pentru Energie, Mediu și Tehnologia Cercetării, Platforma Solară din Almeria (CIEMAT-PSA) din localitatea Almeria (Spania). Cercetările care s-au desfășurat în luna iunie 2017, vor fi dublate în țară prin procesarea acestor materiale cu ajutorul energiei electrice, în cadrul Centrului de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite" aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov cât și în colaborare cu Facultatea de Medicină din universitatea noastră.

Al doilea Grant FP7-INFRA-312643 cod P1701100227/2017 intitulat "*Research on solar aided sintering (Al-12Si/Gr/SiC) hybrid composites for automotive industry, SOL-SINT-COMP*" [114], a avut ca temă procesarea compozitele hibride din pulberi metalice (Al-12Si/Graphite; Al-12Si/SiC; Al-12Si/Graphite/SiC), cu ajutorul energiei solare. Finanțatorul a fost Uniunea Europeană, CIEMAT-PSA, loc de desfășurare: Centrul Național de Cercetare Științifică "Procedee, Materiale și Energie Solară" (CNRS -PROMES) din localitatea Font-Romeu-Odeillo (Franța). Cercetările care s-au desfășurat în luna septembrie 2017, vor fi dublate în țară prin procesarea acestor materiale cu ajutorul energiei electrice, în cadrul Centrului de Cercetare C08: "Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite" aflat în Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov cât și în colaborare cu Universitatea "Politehnica" din București.

Rezultatele cercetării obținute în cadrul celor 2 Granturi derulate în anul 2017, vor fi continuate prin implicarea doctoranzilor și a masteranzilor în viitor, în colaborarea cu grupa de cercetători din cadrul Waste for Materials Research Group (W4M), "Centrul Național de Cercetare Metalurgică din Madrid" (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas- CENIM) realizând eco-procesarea și eco-reciclarea atât a compozite hibride, destinate utilizării industriale (în special în industria de automobile) cât și a oțelurilor biocompatibile, destinate a fi utilizate în medicină (la protezare).

(B-iii) BIBLIOGRAFIE

1. Anderson, C., G. (2006): *Applied metallurgical process testing and plant optimization with design of experimentation software*, Minerals, Metals & Materials Society, part I, p. 1-26
2. Atanasiu, C., și col. (1982): *Încercări distructive ale metalelor*, E.T. București.
3. Banica M. & N. Medan, N. (2015): *Statistical analysis of the experimental data obtained in studying of water jet cleaning*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, 13 (1), p. 6-10.
4. Babu, B., V., Angira, R. (2008): *Optimization of Industrial Proceses Using Improved and Modified Differential Evolution*, Springer-Verlag, Berlin.
5. Baldwin, M. J., Fewell, M. P., Haydon, S. C., Kumar, S., Collins, G.A., Short, K. T., Tendys, J. (1998): *Rf-Plasma nitriding of stainless steel*, Surface and Coatings Technology, v. 98, Issue 1-3, p. 1187-1191.
6. Bevington, P., Robinson, K. (2003). *Data reduction and error analysis for the physical science*, McGraw-Hill Higher Education, New York, USA.
7. Birleanu, C., Pustan, M., Belcun, O., Calin, L. (2013): *Nanomechanical investigation of dental restorative materials using atomic force microscopy*, ACTA TEHNICA NAPOCENSIS, Applied Mathematics and Mechanics, v. 56, Issue IV, p. 607-614.
8. Bolboacă D. S., *Corelația și regresia liniară*, Online at: <http://sorana.academicdirect.ro/pages/doc/MV2012/MVRom06.pdf>, Accesat: 22.01.2017.
9. Boutorabi, SMA, Young, J.M., Kondic, V. (1993): *The tribological behaviour of austempered spheroidal graphite aluminium cast iron*. - Wear, v. 165, p. 19 - 24.
10. Bulgaru M., Bolboaca, L. (2001). *Quality engineering. Quality management, statistics and control measurements in 3D*, Cluj-Napoca, Alma Mater.
11. Cambronero, L.E.G.; Ruiz-Iglesias, J.; Cañadas, I.; Martínez, D. (2010): *Lubricant Elimination on 304L Stainless Steel Compacts with Solar Concentrated Energy*, Proceedings of World Powder Metallurgy Congress & Exhibition PM 2010, v. 2, p.173-180.
12. Cañadas, I., Martínez, D., Rodríguez, J., Fernández, B.J., Vázquez, A.J. (2008): *Tratamiento Térmico de aceros al carbono y de herramienta en un lecho fluido calentado por Energía Solar Concentrada*, XI Congreso Nacional de tratamientos Térmicos y de Superficie, TRATERMAT 2008, ISBN: 978-84-8363-231-4. p. 279-285.
13. Costescu, M. R. (2008): *Identifying Data Affected by Aberrant Errors. Applied Program*, Economic Informatics, 12 (1), p. 52 - 55.
14. Cristea, D., Cuhna, L., Crișan, A., Munteanu, D. (2014): *Straturi subțiri de tip oxinitură*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-606-19-0450-1.
15. Crudu, I. (1983): *Încercarea materialelor la uzura*, Vol. I, Editura Tehnica, Bucuresti.
16. Crossman, A. *Linear Regression Analysis. Linear Regression And Multiple Linear Regression*, Available from: <http://sociology.about.com/od/Statistics/a/Linear-Regression-Analysis.htm>, Accesat: 22.01.2017.
17. Cucu, V. (2015): *Utilizarea modelării și simulării în cercetare*, Buletinul Universității Naționale de Apărare „Carol I”, pag. 23-26.
18. Deb, K. (2001): *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, John Wiley & Sons, Chichester.
19. Domșa, S., Miron, Z.(1985): *Îndrumător pentru utilizarea fontelor, oțelurilor și aliajelor neferoase* – E.T. București, 1985.
20. Dorazil, E. (1991): *High Strength Austempered Ductile Cast Iron*, Ed. Ellis Horwood Metals Associated Materials.
21. Dulămiță, T., Vermeșan, G., Munteanu, Al., Vasile, T. (1982): *Tehnologia tratamentelor termice*, EDP București
22. Fan, X.H., He, L., Zhou, Q.D.(1990): *A study of high chromium cast iron on abrasion resistance and impact fatigue resistance*, Wear, v. 138, nr. 1-2, p.47-60.

23. Ferriere, A., Faillat, C., Galasso, S., Barallier, L. & Masse, J.E. (1999): Surface hardening of steel using highly concentrated solar energy process, *J. Sol. Energy Eng* 121(1), p. 36-39.
24. Flamant G., Balat-Pichelin M.: *Elaboration and testing of materials using concentrated solar energy*, <http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e6-106-17.pdf>, (Accessed: 2017-01-04)
25. Flamant, G.; Ferriere, A.; Laplaze, D. & Monty, C. (1999): *Solar processing materials: Opportunities and new frontiers*, *Solar Energy*, v. 66, issue 2, p. 117-132.
26. Gabor, C., Munteanu, D., Munteanu, Al. (2010): *Straturi subțiri cu rol decorativ obținute prin depunere fizică din vapori*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-742-8.
27. Guang - Xi, L., Hong, Z. (1990): *Sliding wear characteristics of Austempered Ductile Iron with and without laser hardening*, *Wear*, v. 138, p.1 -12.
28. Hartescu, F., Danilov, C. (1998): *Process optimization system used in metallurgical plants*, 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, v. 4, p. 3989 – 3992.
29. Ionici, C., Ionici, V.: *Influența mediului criogenic asupra structurii materialelor mecanice sinterizate*, METROLOGIE, vol LIV (serie nouă), nr. 1-4, Online at: <http://www.inm.ro/pdf/2007-14-influenta-mediului-criogenic.pdf>, Accesat: 15.01.2017
30. Jeng, M.C. (1993): *Abrasive wear studi of bainitic nodular cast iron*, *J. of Materials Science*, n. 28, p. 6555 - 6561.
31. Klemes, J., Friedler, F., Bulatov, I., Varbanov, P. (2011): *Sustainability in the Process Industry: Integration and Optimization*, Green Manufacturing & Sistem Engineering, Manchester.
32. Konstantinos Kapnisis, K., Constantinides, G., Georgiou, H., Cristea, D., Gabor, C., Munteanu, D., Brott, B., Anderson, P., Lemons, J., Anayiotos, A. (2014): *Multi-scale Mechanical Investigation of Stainless Steel and Cobalt-Chromium Stents*, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 40, p. 240-251.
33. Leoveanu, I. S. (2006): *Optimizarea proceselor tehnologice, Vol.1. Aplicații generale*, Ed. LuxLibris, ISBN 9739458-54-8.
34. Lind, D. A., Marchal W. G., Mason, R. D. (2012): *Statistical Techniques in Busines & Economics*, 15th edition, Mc Graw Inc., ISBN 978-0-07-340180-5, New York, USA.
35. Liptak, B., G. (1998): *Optimization of Industrial Unit Processes*-Second Edition, CRC Press, Boca Raton.
36. Llorente J., Vazquez A.J. (2009): *Solar hardening of steels with a new small scale solar concentrator*, *Materials Chemistry and Physics* v. 118, p 86–92.
37. Milosan, I. (2013): *Aspects About The Properties Of A Bainitic Dual-Phase SG Cast Iron* revista: *European Scientific Journal* 9 (10), ISSN: 1857-7431, p. 149-153.
38. Miloșan I. (2005): *Cercetări privind comportarea la temperaturi scăzute a unei fonte aliate*, RECENT, n.13, ISSN 0461-9579, p. 41-42.
39. Milosan, I. (2011): *Study About The Behaviour To The Low Temperatures Of A Cu S.G. Cast Iron*; *Metalurgia International*, v. 16; Issue: 8; ISSN: 1582-2214, p. 29-31.
40. Miloșan I. (2011): *Study About the Influence of Cryogenic Treatment on the Impact Strength Properties of C45 Steel*, RECENT, Vol. 12, no. 1(31), p. 50-54.
41. Milosan, I. (2012): *The Behaviour to the Low Temperatures of a Chromium-Nickel-Copper S.G. Cast Iron*, 16th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation -MODTECH 2012, Proceeding, vol I, pag. 585-588.
42. Milosan, I. (2012): *Manufacture of cryogenic materials used in automotive industry*, WORLD CONFERENCE ON BUSINESS, ECONOMICS AND MANAGEMENT (BEM-2012) Book Series: *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 62, p.711-715.
43. Miloșan I. (2005): *Researches about the wear resistance of a S.G. Cast Iron* , *Metalurgia International*, n. 1, p. 42-44.

44. Milosan, I. (2010): *The Influence Of The Heat Treatment's Parameters Over The Real Surface Contact At The Bainitic Sgcast Iron' Wear*; Metalurgia International, v. 15; Issue:8; ISSN: 1582-2214, p. 31-33.
45. Milosan, I. (2010), *Study and Researches about the Microhardness's variation of a Special SG Cast Iron*; THERMEC 2009, PTS 1-4, Book Series Materials Science Forum; v. 638-642; Part 1-4; ISSN: 0255-5476, p. 1233-1236.
46. Milosan, I. (2012): *Abraisve wear behaviour of a Mo-Cu Cast Iron*, Metalurgia, v. 64; Issue: 2, ISSN: 0461-9579, p. 43-47.
47. Milosan, I. (2013): *Aspects about Phase Transformation in Solid State of a S.G. Cast Iron*, Metalurgia International, V. 18, Special Issue: 5, P. 95-98.
47. Milosan, I. (2014): *The manufacturing of a special wear-resistant cast iron used in automotive industry*, Book Series: Procedia Social and Behavioral Sciences Volume: 109 , Conference: 2nd World Conference on Business, Economics and Management (BEM) Turkey, p. 610-613.
49. Milosan, I. (2015): *Analyzing the real area of contact wear using ANOVA*, RECENT, vol. 16, no. 3(46), ISSN 2065-4529, p. 254-258.
50. Milosan, I. (2015): *The Applying of the Romanowski Test for Identification of Data Affected by Errors*, European Scientific Journal, v. 12, n. 21, ISSN: 1857-7431, p. 18-24.
51. Milosan, I. (2015): *Analyzing the real area of contact wear using ANOVA* revista:RECENT, v. 16, n. 3(46), ISSN 2065-4529, p. 254-258.
52. Milosan, I. (2016): *Identifying Data Affected By Aberrant Errors Obtained In The Manufacturing Of Special Alloys*, Scientific Research & Education in the Air Force, AFASES, v. 1, ISSN 2247-3173, p. 481-488.
53. Milosan, I. (2017): *Application of the Chauvenet criterion to detection of the aberrant data obtained in the industrial processes*, The 19th International Conference "Scientific Research & Education in the Air Force", AFASES 2017, "Henri Coanda" Air Force Academy, Vol. 1, p. 389-392, ISSN 2247-3173, 2017.
54. Milosan, I. (2017): *Experimental Results of a Carbon Steel Analyzed Using the Grubbs Test*, Recent, v. 18, no. 1(51), p. 44-48.
55. Milosan, I. (2008): *Study about mathematical modelings results of a nickel bainitic S.G. Cast Iron*, Metalurgia International nr. 7, ISSN 1582-2214, p. 59-62.
56. Milosan, I. (2015): *Mathematical modeling by using a C++ software*, Scientific Research & Education in the Air Force - AFASES 2015, v. 2, ISSN 2247-3173, p. 631-638.
57. Milosan, I., Veteleanu, A. (2011): *Experimental Researches on the Cupola's Charges Optimization*, 15th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation - MODTECH 2011, Proceeding, v. II, ISSN: 2069-6736, p. 677-680.
58. Milosan, I. (2012): *Heat Treatment Optimization for the Bearing Rings Fabrication*, 16th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation -MODTECH 2012, Proceeding, v. II, ISSN: 2069-6736, p. 589-592.
59. Milosan, I. (2013): *Optimization of specific factors to produce special alloys*, Proceedings of the 5th International Conference "Computational Mechanics and Virtual Engineering, COMEC 2013, , DERC Publishing House, ISBN-13:978-1-939757-11-1, p. 173-178, Tewksbury (Boston), Massachusetts, U.S.A.
60. Milosan, I. (2013): *Application to optimize the casting of some cast iron using ferro alloys*, Metalurgia International, v.18, Issue 8, ISSN:1582-2214, p. 166-168.
61. Milosan, I. (2015): *Optimization of industrial processes using a special software*, Scientific Research & Education in the Air Force, AFASES, v. 2, ISSN 2247-3173, p. 639-644.
62. Milosan, I. (2015): *Technical and economic study on landmarks from A.D.I.*, European Scientific Journal, v. 11, no. 18, ISSN: 1857-7431, p. 21-27.
63. Munteanu, Al. (1986): *Fonte cu grafit nodular dure și semidure călite izoterm, destinate înlocuirii oțelurilor de cimentare*, Metalurgia n.6, p.394 - 401.

64. Munteanu, Al. (2008): *Molybdenum in stainless steels*, RECENT, v. 9, n. 1(22,) pag. 59-65.
65. Munteanu, D., Ionescu, C., Olteanu (Gabor), C., et al. (2010): *Influence of composition and structural properties in the tribological behaviour of magnetron sputtered Ti-Si-C nanostructured thin films prepared at low temperatures*, Wear, v. 268, nr. 3-4, ISSN 0043-1648, p. 552-557.
66. Munteanu, D., Gabor C., et al. (2011): *Friction and wear behaviours of Ti(C,O,N) dark decorative coatings*, Tribology International, v. 44, no. 7-8, ISSN 0301-679X, p. 820-828.
67. Olteanu (Gabor), C., Munteanu, D., Munteanu, A., et al. (2010): *Tribological characterization of magnetron sputtered Ti(C,O,N) thin films*, International Journal of Materials and Product Technology, v. 39, n. 1-2, ISSN 1741-5209, p. 186-194.
68. Olteanu (Gabor), C., Munteanu, A., Munteanu, D., Borcea, B., Vaz, F., Cunha, L. (2009): *The influence of the deposition conditions on the mechanical properties of Ti(C,O,N) thin films obtained by sputtering process*, Metalurgia International, v. XIV, n. 3, ISSN 1582-2214, p. 129-132.
69. Pavelescu, D. (1983): *Tribotehnica*, Editura Tehnica, Bucuresti.
70. Pearce, J.T.H. (1985): *Abraisve wear behaviour of alloy cast irons*, The British Foundyman, n.78, p. 13 - 23.
71. Peters, C. A. (2001): *Statistics for Analysis of Experimental Data*. In Environmental Engineering Processes Laboratory Manual, S. E. Powers, Ed. AEESP (p. 1-25), Champaign, Illinois, USA.
72. Popescu, N., Gheorghe, C., Popescu, O. (1990): *Tratamente termice neconvenționale*, ISBN 973-31-0182-6, Ed. Tehnică, București.
73. Quarteroni, A. (2009): *Mathematical Models in Science and Engineering*, American Mathematical Society, v. 56, n.1, p. 10-19.
74. Ripoșan, I., Sofroni, L., Chișamera, M. (1988): *Fonta bainitică*, ISBN 973-31-0054-4, Ed. Tehnică, București.
75. Rodriguez G.P., Lopez V., Vazquez A.J., De Damborenea J.J., Kirkpatrick, A., Worek, W. (1993): *Solar Engineering*, ASME, New York, p. 325–330.
76. Rudnev, V., Fett, G.A., Griebel, A., Tartaglia, J. (2014): *Principles of Induction Hardening and Inspection*, ASM Handbook, v. 4C, p. 58-66.
77. Ruiz-Bustanza, I., Cañadas, I., Rodríguez, J., Mochón, J., Verdeja, L.F., Garcia-Carcedo, F., Vázquez, A.J. (2012): *Magnetite production from steel wastes with concentrated solar energy*, Steel Research International, 84 (3), p. 207-217.
78. Sarver T., Al-Qaraghuli A., Kazmerski Lawrence L. (2013): *A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 22, p 698–733.
79. Schissler, J.M., Brenot, P., Chobaut, J.P. (1990): *Resistance a l'usure tangentielle des fontes bainitiques de type A.D.I. dans l'intervalle de temperatures 20 °C - 330 °C*, Homme et Fonderie, Fevrier, p. 21 - 25.
80. Seceleanu, D; Milosan, I; Dobrota, R. (2003): *Some aspects about the mathematical modelling results of an SG cast iron with special properties*, Journal of Materials Processing Technology, p. 175-178.
81. Shepelyakovkii, K. Z. (1977): *Heat treatment of steel with induction heating*, Metal Science Heat Treatment, v.19, Issue 10, p. 909-916.
82. Sofroni, L., Ripoșan, I., Chira, I (1987): *Fonte albe rezistente la uzură*. E.T., București.
83. Stoica, S., C., Dorobanțu, M., *Modelarea și Simularea Sistemelor de Calcul*, Online at: <http://software.ucv.ro/~cstoica/MSSC/lab%202%20etapele%20simularii.pdf>, Accesat: 20.01.2017.

84. Sun, Y., Bell, T. (1991): *Plasma surface engineering of low steel*, Second International Conference on Plasma Surface Engineering 1991, Materials Science and Engineering: A, v. 140, p. 419-434.
85. Taloi, D. (1983): *Optimizarea proceselor metalurgice*, EDP București.
86. Taloi, D. (1987): *Optimizarea proceselor tehnologice, Aplicații în metalurgie*, Ed. Academiei, București.
87. Tanasescu, I. (1987): *Statistical control of processes and products*, EDP. Bucharest.
88. Trombe F., Foex M. (1955): *Sur un nouveau procédé de traitement des métaux à l'aide de l'énergie solaire*, Compt. Rend. 240 (2), p. 196–198. (A new process for the treatment of metals by means of solar energy, Solar Energy, v. 1, Issue 1, p. 63, 1957.
89. Trușculescu, M., Ieremia, A. (1983): *Oțeluri inoxidabile și refractare*, Editura Facla, Timișoara.
90. Van Ingelgem Y., Vandendael I., Van den Broek D., Hubin A., Vereecken J. (2007): *Influence of laser surface hardening on the corrosion resistance of martensitic stainless steel*, Electrochimica Acta 52, p. 7796–7801.
91. Vieweg, A., Ressel, G., Prevedel, P., Raninger, P., Panzenböck, M., Marsoner, S., Ebner, R. (2016): *Induction hardening: Differences to a conventional heat treatment process and optimization of its parameters*, International Conference on Materials, Processing and Product Engineering 2015 (MPPE 2015), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering v. 119, p. 1-8, doi:10.1088/1757-899X/119/1/011001, Online at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/119/1/012019/pdf>, Accesat: 08.04.2017.
92. Virca, I., *Cercetări privind aplicarea tratamentelor superficiale cu impulsuri ultrascurte de lumină asupra pieselor din pulberi metalice*, Online at: <http://www.armyacademy.ro/biblioteca/anuare/2003/CERCETARI.pdf>, Accesat: 08.04.2017.
93. Voiculescu, I., Geată, V., Vasile, I. M. (2016): *Aliaje feroase pentru structuri sudate*, ISBN 978-606-610-181-3, Editura BREN București.
94. Voiculescu, I., Vasile, I.M., Stanciu, E.M., Pascu, A. (2015): *Știința și Ingineria Materialelor, Îndrumar de laborator*, Editura LUX LIBRIS, ISBN 978-973-131-316-0, Brașov.
95. Wilson, A., D. (1991): *Clean steel technology - Fundamental to the development of high performance steels*, ASTM STP 1361, p. 73-88.
96. Yang Y., Torrance A.A., Rodriguez J. (1996): *The solar hardening of steels: experiments and predictions*, Solar Energy Solar Cells 40, p. 103–121.
97. Zhou, W.-S., Zhou, Q.-D. Meng, S.-K. (1993): *Abrasive Resistance of Austempered Ductile Iron*, Cast Metal, v. 6, n. 2, p. 69 - 75.
- 98.*** *Consideratii generale asupra captatoarelor cu concentratia radiatiei*, Online at: <http://www.rasfoiesc.com/inginerie/constructii/instalatii/Consideratii-generale-asupra-c57.php>, Accesat: 12.03.2017
- 99.*** *dacapo Stainless, Application of Schaeffler diagram*, <http://www.dacapo.com/uploads/documents/40-document.pdf>. Accessed: 2016-12-14.
- 100.*** *Elemente de Tribologie. Frezare–Uzare–Ungere*, Online at: http://www.omtr.pub.ro/didactic/om_tr_mrcf/tribologie.pdf, Accesat: 20.01.2017
101. *** *EL-GFX-DTC Dual Channel Graphing Thermocouple Temperature Data Logger* (DATAQ Instruments), Online at: <https://www.dataq.com/resources/pdfs/datasheets/el-gfx-dtc-data-logger.pdf>, Accesat: 20.05.2016.
- 102.*** *EN-GJS-450-10*, Online at: <http://www.iron-foundry.com/gjs-450-10-ductile-iron-sg.html>
- 103.*** European Environment Agency, *Overview of the electricity production and use in Europe*, 2014. Online at: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production/assessment-2>, Accesat: 14.12.2016.

- 104.*** European Environment Agency, *End-user GHG emissions from energy, Reallocation of emissions from energy industries to end users 2005-2010*, EEA Technical report, ISSN 1725-2237, No 18/2012, Online at: <http://www.eea.europa.eu/publications/end-user-ghg-emissions-energy>, Accesat: 14.12.2016.
- 105.*** EUROPEAN STANDARD EN 10200:2012, *Chemical analysis of ferrous materials - Determination of boron in steels - Spectrophotometric method*, Online at: <https://shop.austrian-standards.at/Preview.action;jsessionid=07CBE53E735F109EA8B200FA38A40527?preview=&okkey=473390&selectedLocale=en>, Accesat: 12.07.2017.
- 106.*** EUROPEAN STANDARD EN 10277-2:2008, *European Steel and Alloy Grades*, Online at: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=152, Accesat: 14.12.2016.
- 107.*** *European Steel and Alloy Grades*, Online at: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=900, Accesat: 1.01.2017
- 108.*** EUROPEAN STANDARD EN 10045-1:1990 "*Metallic materials-Charpy impact test-Part 1: Test methods*", Online at: <http://www.sanyosteel.com/files/EN/EN%2010045-1.pdf>, Accesat: 20.01.2017
- 109.*** EUROPEAN STANDARD EN 10045-1, Online at: <http://www.sanyosteel.com/files/EN/EN%2010045-1.pdf>, Accesat: 11.01.2017
- 110.*** *Frecare-Uzare*, Online at: <http://www.omtr.pub.ro/didactic/tribosisteme/cap1.pdf>, 97-Accesat: 20.01.2017.
- 111.*** *Gheața carbonică*, Online at: <http://dioxid.ro/productie-gheata-carbonica.html>, Accesat: 15.01.2017
112. <http://dexonline.ro/definitie/heliostat>, Accesat: 12.03.2017
- 113.** <http://ecology.md/md/page/utilizarea-energiei-solare-in-europa>, Accesat: 12.03.2017
114. *** http://sfera2.sollab.eu/access/access_selected
- 115.*** <https://www.scribd.com/doc/252373859/2-15-Oteluri-Inoxidabile-Si-Refractare>, Accesat: 12.07.2017.
- 116.*** <http://www.solar.ro/de-ce-solar.php>, Accesat: 12.03.2017.
- 117.*** International Organization for Standardization, Online at: <https://www.iso.org/committee/53558/x/catalogue/>, Accesat: 09.02.2017.
- 118.*** Institutul de Cercetare-Dezvoltare al Universității Transilvania din Brașov, Tehnologii și materiale avansate metalice, ceramice și compozite, MMC, Online at: <http://www.unitbv.ro/Default.aspx?alias=www.unitbv.ro/mmcen&>, Accesat la: 18.12.2016.
- 119.*** *Material Programme for corrosive, abrasive and hot media-Rheinhütte Pompen*, Online at: https://rheinhuette.de/wp-content/uploads/sites/2/2014/12/friatec_rheinhuette_pumpen-materials-metal-plastic-ceramic-pumps.pdf, Accesat: 17.01.2017.
- 120.*** Ministerul Justiției, Portal legislativ. Online at: <http://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocument/43397>
- 121.*** *Modelarea, simularea si controlul mini si micromecanismelor compliante*, Online at: http://mdm.utcluj.ro/old/Proiecte/ID_221/obiective.html, Accesat: 20.01.2017.
- 122.*** Parlamentul European, *Energia din surse regenerabile, Fișe tehnice privind Uniunea Europeană*, 2016. Online at: http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/ro/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.7.4.html.
123. *** Practically Cheating Statistic Handbook, Chauvenet's Criterion, Available at <http://www.statisticshowto.com/chauvenets-criterion/>, accessed on 20 April 2017;
- 124.*** *PROCÉDÉS, MATÉRIAUX ET ÉNERGIE SOLAIRE UPR 8521 (PROMES-CNRS)*. Online at: <http://www.promes.cnrs.fr/>
- 125.*** *Proprietățile mecanice ale materialelor metalice*, Online at: http://ime.upg-ploiesti.ro/attachments/article/102/MAS_IM_MATERIALE_2013.pdf, Accesat: 11.01.2017

- 126.*** *Regresie și corelație*, Online at:
<http://www.amaniu.ase.ro/studenti/management/regresie.pdf>, Accesat: 20.01.2017.
- 127.*** *The Fe-Cr-C System, Calculated Phase Diagrams of the Fe-Cr-C System*, Online at:
http://steel.ndsl.kr/data/fecrc_250cr_w.gif, Accesat: 17.07.2017.
- 128.*** U.S. Agency International Administration (EIA), *International Energy Outlook 2016*, DOE/EIA -0484 (2016), May 2016, Online at:
[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf), Accesat: 20.01.2017.
- 129.*** www.steel-grades.com/Steel-Grades/Mould-Steel/1-4848.html
- 130.*** www.steel-grades.com/Steel-Grades/Mould-Steel/1-4136.html