

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala doctorală de Ingineria Materialelor



REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT
CERCETĂRI INDUSTRIALE PRIVIND
ÎMBUNĂTĂȚIREA TEHNOLOGIEI DE
LAMINARE A OȚELURILE SLAB ALIATE CU
CONȚINUT DE CARBON MAI MIC DE 0,2%”

Doctorand,
Ing. Costel Durduc (Roibu)

Conducător științific,
Profesor Dr. Ing. Elena Drugescu

Seria 15: Ingineria materialelor Nr. 8

GALAȚI

2016

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Școala doctorală de Ingineria Materialelor



TEZĂ DE DOCTORAT
CERCETĂRI INDUSTRIALE PRIVIND
ÎMBUNĂTĂȚIREA TEHNOLOGIEI DE
LAMINARE A OȚELURILE SLAB ALIATE CU
CONȚINUT DE CARBON MAI MIC DE 0,2%”

Doctorand

Ing. Costel Durduc (Durduc-Roibu)

Conducător științific:
Prof univ.dr.ing Elena Drugesu

Comisia de îndrumare
științifică:

Prof. univ.dr.ing. Florentina Potecasu
Prof. univ.dr.ing Cătălina Maier
Prof. univ.dr.ing. Viorel Paunoiu

Referenți științifici:

Prof. univ.dr.ing. Maria Nicolae
Prof. univ.dr.ing. Ion Cincă

Președinte comisie doctorat

Prof. univ.dr.ing. Marian Bordei

Seria 15 Ingineria materialelor Nr. 8

GALAȚI - 2016

Cuprins:

| | |
|--|-----------|
| Cuvinte cheie: | 3 |
| Abstract: | 3 |
| Oportunitatea și motivarea cercetărilor în contextul temei abordate: | 3 |
| Legendă | 5 |
| Capitolul I – Stadiul actual în deformarea plastică la cald al metodologiilor și rutelor de laminare controlată în funcție de rută metalurgică și tratamentul termic al oțelurilor microaliate cu conținut de C mai mic de 0,20%. | 8 |
| I.4 Influența elementelor de aliere în compoziția chimică pentru oțelurile HSLA [9]: | 8 |
| I.8 - Proces actual de laminare pentru oțelurile HSLA. | 10 |
| I.8.1 - AR = Laminare clasică convențională în domeniul austenitic..... | 11 |
| I.8.2 - N = laminare controlată ^[32] | 11 |
| I.8.3 - N = laminarea normalizantă ^[33] | 12 |
| I.8.4 - TMR (thermomechanical rolling) = laminare termomecanică ^[34] | 12 |
| Capitolul II - Încercări de laborator specifice tablelor groase laminate la cald | 12 |
| II.1 - Încercări Mecanice | 12 |
| II.1.1 - Tracțiune la temperatură camerei..... | 12 |
| II.1.2 - Tracțiune la temperaturi înalte | 12 |
| II.1.3 - Testul de impact - încercarea de încovoiere la soc - Ciocanul pendul Charpy | 12 |
| II.2 - Analize metalografice: | 13 |
| II.2.1 - Macrostructuri: Amprenta Baumann | 13 |
| II.2.2 - Microstructuri: microscopie optica și SEM | 13 |
| Capitolul III - Modelarea programului de laminare - software SIROLL modelarea matematică integrată în nivelul 1 și 2 de automatizare al procesului de laminare în LTG2 | 13 |
| III.1 Prezentare generală a modelării procesului de laminare - Nivel 2 de automatizare^[39] | 13 |
| III.2.1 - Procese autonome:..... | 13 |
| III.2.2 - Procese modelate în Nivel 2:..... | 14 |
| III.2.3 - Pasul 1 - Calcul schema laminare - PSC - calcul grosime de rotire a bramei | 15 |
| Capitolul IV - Concluzii | 17 |
| PARTEA II-a- Directii de cercetare: | 17 |
| V.2 Optimizare compoziție chimică în vederea atingerii proprietatilor mecanice impuse în standardul EN 10028/3-2004 pentru Mărcile de oțel P460NL1/P460NL2; | 18 |
| V.2.3 - Tratamente termice | 21 |
| V.2.3.a - Normalizarea în condiții industriale - T1 | 21 |
| V.2.3.c. - Normalizarea în condiții de laborator - T1. | 21 |
| V.2.5 - Analiză spectrala..... | 22 |
| V.2.6. - Încercări mecanice: | 22 |
| V.2.6.a. - Probe prelevate în stare laminată / în stare normalizată CN1 – LTG. | 22 |
| V.2.7. - Analize metalografice - imagistica optica Test T1 | 22 |
| V.2.9 - Influența laminării pentru cele 2 matrici T1 și T2..... | 23 |
| V.2.10. - Influența tratamentului termic de normalizare | 24 |
| V.2.12. - Influența microelementelor de aliere în cele două compoziții T1 și T2..... | 24 |
| V.2.14.. Sumar concluzii:..... | 24 |

| | |
|---|-----------|
| V.3 Cercetări privind laminarea termomecanică pentru oțelurilor slab aliate S355ML cu grosimi mari: 70-80 mm pentru compoziție chimică cu elemente de aliere MoNbTi | 25 |
| V.3.1 - Scopul cercetării | 25 |
| Laminarea în condiții industriale - Parametri de proces. | 29 |
| V.3.5. - Analize de laborator efectuate:..... | 31 |
| V.3.6.a - Microstructura - proba 3316-1 – Tabla de 70 mm grosime. | 33 |
| V.3.8.a - Influență laminării Test M1 – 70-80 mm | 35 |
| V.3.9.a - Sumar concluzii:..... | 35 |
| V.4 - Optimizare modelare matematică și introducere modificări în software SIROLL: | 36 |
| V.4.1 Optimizare de cod programare (limbaj programare C++) | 36 |
| V.4.2 - Simulare laminare cu soft SIROLL | 38 |
| Laminarea în condiții industriale | 42 |
| Analiza procesului de laminare și încercărilor de laborator. | 49 |
| Influență laminării..... | 49 |
| Laminarea N2 – 100_N în comparație cu 101_CNR..... | 49 |
| Analiza influenței microelementelor de aliere. | 49 |
| ☐ Mo 49 | |
| ☐ Nb 49 | |
| Discutii și concluzii | 49 |
| Cap VI. Concluzii finale, contribuții personale la elaborarea tezei de doctorat și domenii de valorificare a rezultatelor. Direcții de orientare a cercetărilor viitoare | 50 |
| VI.1 Concluzii finale: | 50 |
| VI.2 Contribuții personale la elaborarea tezei de doctorat și domenii de valorificare a rezultatelor | 50 |
| VI.3 Direcții de orientare a cercetărilor viitoare | 51 |
| Listă de lucrări științifice publicate..... | 52 |
| Bibilografie: | 53 |
| Anexa 2 – Tabele date și grafice | 58 |
| Anexa 3 - modificări aduse în N2-AGC | 59 |

Cuvinte cheie:

oțel utilizare vase sub presiune, oțel special aliat, oțel slab aliat de înaltă rezistență, duritate mare, tenacitate ridicată a temperatură scăzută, rezistența la curgere ridicată, 460MPa, tratament termic de normalizare, quatro, procesul de laminare la cald, table groase 60 mm, 70 mm, 80 mm Ciocanul pendul Charpy, laminare termomecanică, laminare controlată, Tnr, molibden, titan, niobiu, vanadiu.

Abstract:

Cercetarea experimentală analizează îmbunătățirile proprietăților mecanice ale rezistenței și tenacității oțelului special aliat P460NL2 cu o compoziție chimică optimizată, în comparație cu compoziția chimică actuală în ArcelorMittal Galați. Pentru ambele compoziții chimice am laminat câte două table pe grosimile de 8, 10 și 12 mm. Tipul de laminare a fost laminare controlată în domeniul austenitic, urmat de tratamentul termic de normalizare. Eșantioanele de probă de la fiecare tablă au fost prelevate în stare laminată și normalizată. În laborator au fost efectuate următoarele teste: analiza spectrală, proprietăți mecanice: teste de tracțiune, Charpy-V, testul de impact la temperaturi extrem de scăzute [-40°C, -50°C]. Diferențele dintre cele două compoziții chimice sunt date de către elementele de aliere utilizate. Rezultatele obținute au arătat creșterea rezistenței la curgere $R_{p0,2}$ și valorile de reziliență în intervalul de valori impus în standardul european EN10028/3-2009.

Laminarea termomecanică (TMR sau TMCP) este un proces special de laminare controlată care urmărește obținerea unor proprietăți mecanice de înaltă rezistență, tenacitate ridicată și microstructura cristalină cu o granulație fină, care să ofere în același timp: duritate foarte bună și capacitate de deformare. Produsele TM au un conținut de carbon mult mai scăzut și, prin urmare, sunt mult mai puțin predispuse la fisuri la rece în timpul sudării. În ArcelorMittal Galați provocarea a fost să crească fezabilitatea pentru acest tip de oțel pentru construcții sudate de la 50 până la 80 mm grosime fără răcire accelerată. Bramele produse în AMG au grosimea maximă de 250 mm care corespunde unui raport maxim de 3: 1 între bramă și grosimea tablei finale conform EN 10025/4/2004. Tablele laminate termomecanic în proces industrial prezentate în această lucrare au fost efectuate în Laminorul de Tablă Groasă pe cele două caje quarto de laminare, degrositoare și finisoare cu asistare computerizată pentru procesul de laminare, softul SIROLL asistat de sistemul AGC. Compoziția chimică s-a bazat pe o microaliere cu MoNbTi și un conținut scăzut de carbon 0,1%. Rezultatele obținute permit deschiderea fezabilității pentru acest tip de oțel S355M până la grosimea maximă de 80mm conform raportului de deformare de 3:1.

Optimizarea tipului de laminare controlată are principalul obiectiv de a oferi o cantitate mai mare de deformare sub Tnr (temperatura la care recristalizarea statică în domeniul austenitic este oprită) și temperatura de sfârșit de laminare aproape de Ar3 .

Cercetarea experimentală a fost efectuată pe o compoziție chimică cu elemente de aliere MoNbTi. Au fost laminate două brame pe o rută de laminare controlată NR în comparație cu ruta de laminare optimizată CNR. Scopul principal al rutei de laminare optimizată este de a crește gradul sever de deformare sub temperatura de recristalizare. Restricția impusă a fost temperatura maximă de 930°C de la care se reia procesul de laminare care s-a oprit după efectuare secvenței de efectuare lățime tablă. Rezultatele obținute ne arată avantajele utilizării acestei noi rute de laminare în obținerea proprietăților mecanice cerute standard cu costuri competitive.

Oportunitatea și motivarea cercetărilor în contextul temei abordate:

Oțelul este un material regenerabil și prezintă multiple avantaje fizico-mecanice și de ordin tehnologic. Tablele groase din oțel sunt materiale de importanță majoră utilizate de om într-o multitudine de industrii: industria petroliera: țevi din oțel, industria navală: nave și platforme maritime (offshore), industria construcțiilor de mașini, proiecte inginerești: construcții de poduri,

baraje, reactoare nucleare, industria energetică, etc. De-a lungul timpului datorită inovațiilor tehnice și tehnologice aduse în procesul de laminare cât și a dezvoltării unor modele matematice ce permit simularea caracteristicilor mecanice producătorii de table groase din oțel au redus costurile de fabricație astfel încât să vină în întâmpinarea clienților cu un raport preț/calitate bazat pe conceptul Win-Win (câștig-câștig) al relației client-furnizor. Dezvoltarea modelărilor matematice și automatizarea complexă a laminoarelor a împins competiția producătorilor de oțel la limite greu de imaginat în urmă cu 10 ani.

Subiectul actualei teze reprezintă cercetarea în condiții industriale a îmbunătățirii tehnologiilor de laminare și compozițiilor chimice pentru oțelurile **HSLA** și contribuie prin rezultatele obținute la îmbogățirea cunoștințelor în ceea ce privește abordarea rutelor tehnologice de laminare funcție de starea de livrare a tablelor din oțel către client. Scopul principal al cercetărilor este aducerea de contribuții științifice pentru optimizarea rutelor metalurgice industriale privind laminarea controlată de la proiectarea compozițiilor chimice urmărind elaborarea și procesul de turnare al oțelului până la optimizarea procesului de laminare. În cadrul acestei lucrări sunt prezentate modificările de calcul a schemelor de laminare și de proiectare optimă a dimensiunilor de brama, în vederea obținerii caracteristicilor mecanice prescrise în standardele internaționale care reglementează producerea tablelor din oțel cu rezistență înaltă slab aliate - oțeluri denumite **HSLA [82]** (high strength low alloyed).

Lucrarea de doctorat este structurată în două părți pe șase capitole, bibliografie și anexe, structurate după cum urmează:

În Capitolul I, a părții -I-a a tezei, sunt descrise: rutele metalurgice și tratamentele termice pentru oțelurilor microaliate cu conținut de C mai mic de 0.20 % elaborate în cadrul combinatului ArcelorMittal Galați (AMG). Este descrisă procedura de fabricație din Laminorul de Tabla Groasă, gama dimensională de brame utilizată, limitele echipamentelor tehnologice de laminare, calități de table din oțel.

În Capitolul al -II-lea sunt prezentate echipamentele și aparatura utilizată în cercetările efectuate în cadrul lucrării. Sunt descrise mașinile de laborator pentru determinarea proprietăților mecanice și tehnologice ale tablelor groase produse în AMG. Analizele metalografice au fost realizate folosind microscopia optică și electronică.

În Capitolul al -III-lea este descris softul SIROLL de control automat al procesului de laminare. Sunt descrise subrutinele de lucru și bazele de calcul utilizate în modelarea schemelor de laminare. De asemenea pentru schemele de laminare considerate am descris rutele utilizate actual în laminare cu evidențierea particularităților tehnologice.

În Capitolul al -IV-lea sunt prezentate concluziile primei părți a lucrării.

Partea a -II-a începe cu prezentarea direcțiilor de cercetare și cuprinde următoarele capitole:

În Capitolul al -V-lea se prezintă cercetările legate de reproiectarea compoziției chimice pentru marca de oțel P460NL2, pentru care am utilizat tipul de laminare N descris în teză și tratamentul termic corespunzător. Utilizarea tipului de laminare termomecanică pentru marca de oțel S355M în vederea creșterii fezabilității în domeniul de grosimi 50-80 mm. Proiectarea unei noi compoziții chimice pentru marca de oțel S355G10 și utilizarea comparativă a două tipuri de laminare, dintre care unul a fost dezvoltat pentru optimizarea parametrilor cajei de laminare în vederea reducerii riscurilor de rebutare a materialului. Fiecare cercetare a presupus analiza influenței elementelor de aliere din compozițiile chimice, cât și analiza influenței tipului de laminare utilizat. Acestea au fost puse în evidență de încercările mecanice și analizele metalografice. Tot în acest capitol ca noutate am dezvoltat o subrutină pentru optimizarea secvenței de laminare de efectuare lățime semifabricat care a fost implementată în softul SIROLL și care a condus la reducerea rebutării materialului.

În Capitolul al -VI-lea sunt prezentate concluziile finale și contribuțiile aduse în domeniu.

Studiile experimentale și încercările de laborator realizate au cuprins:

- Analize și proiectare compoziții chimice, modificare tratamente termice și parametri de laminare pentru mărcile de oțel P460NL1, P460NL2 conform standardului European EN10028-3 din 2009; S355M, S355ML1 conform standardului european EN10025-3 din 2004, NVF36, NVF40 conform Societății de certificare table din oțel destinate construcțiilor navale Det Norske Veritas din 2013, S355G9+N, S355G10+N conform standardului european EN10225-2009.
- Simulare tratamente termice;
- Încercarea la tracțiune;
- Încercarea la încovoiere prin șoc. Ciocanul pendul Charpy;
- Analize metalografice; Imagistică optică și SEM
- Analiză spectrală;
- Analiză Bauman;

Legendă

Tabel 1 - Legendă abrevieri

| Nr. Crt. | Abreviere | Semnificație |
|----------|-----------|--|
| 1 | S355ML | Oțeluri de rezistență înaltă slab aliate |
| 2 | AR | Rută de laminare în domeniul austenitic în care există fază de recristalizare. |
| 3 | N | Rută de laminare în domeniul austenitic în care există fază de recristalizare urmată de tratamentul termic de normalizare. |
| 4 | N | Rută de laminare în domeniul austenitic la limita Ac_3 în care faza de recristalizare este oprită. |
| 5 | TMR | Rută de laminare în domeniul austenitic la limita Ar_3 în care faza de recristalizare este oprită. |
| 6 | TMCP | Rută de laminare în domeniul austenitic la limita Ac_3 în care faza de recristalizare este oprită urmată de răcire accelerată. |
| 7 | CNR | Nouă rută de laminare controlată normalizantă la limita Ac_3 dezvoltată în cadrul tezei de doctorat. |
| 8 | T_{nr} | Temperatură în domeniul austenitic la care procesul de recristalizare în microstructură este oprit. |
| 9 | Ac_3 | Punct critic al temperaturii la încălzire pe diagrama Fe-C. |
| 10 | Ar_3 | Punct critic al temperaturii la răcire pe diagrama Fe-C |
| 11 | spt | setare transmitere informații |
| 12 | Track | trasabilitate material |
| 13 | Dsp | trasabilitate descărcare material |
| 14 | Meas | Valori de proces măsurate |

| | | |
|----|-----------------------|--|
| 15 | Roll | Date despre cilindri /calibrare caja |
| 16 | vis | Afșarea pe display a inforațiilor |
| 17 | Logger, plateLog | Înregistari |
| 18 | HMI | Interfața om-mașină |
| 19 | delay | Întârzieri |
| 20 | Communication Proxies | Comunicații realizate prin legături de proximitate |
| 21 | N2 | Nivel 2 de automatizare |
| 22 | SIROLL | Modelare computerizată a procesului de laminare - software dezvoltat de firma SiemensVAI |
| 23 | N2 | Nivel 1 de automatizare |
| 24 | Il1 | input level 1 – este utilizat pentru recepția datelor de la N2 : |
| 25 | ol1_rm | output level 1 roughing stand - transmitere date de la caja degrositoare Q1 către N2 |
| 26 | ol1_fm | output level 1 – finishing stand - transmitere date de la caja finisoare Q2 către N2 |
| 27 | Pgl | Profile gauge - este utilizat pentru comunicațiile dintre mașină de măsurat grosimi/profil table laminate |
| 28 | furdsp | Furnace Dispatcher - descărcare date cuptor cu propulsie pentru încălzire brame-CP. |
| 29 | hist | istoric; hist - stocarea evenimentelor impreuna cu timpii de calcul. Date înregistrate: |
| 30 | eval | evaluarea tabla laminate; Este un proces online care evaluează calitatea tablei laminate funcție de Analiză comparativa dintre țintele de laminare și valorile măsurate. |
| 31 | sim | – simulare; - Oferă un mediu intern de simulare fără aplicabilitatea automatizării de execuție N2 . |
| 32 | PDI | Primary Data Input – date primare de intrare |
| 33 | RUN | Execuție |
| 34 | PSC | pass schedule calculation - calcul schema laminare; procese principale schema laminare |
| 35 | precalc | setare precalculare |

| | | |
|----|-------------|--|
| 36 | Fm_postcalc | setare post-calculare caja finisoare Q2 |
| 37 | recalc | setare re-calculare caja finisoare Q2 |
| 38 | adapt | setare adaptare |
| 39 | tempMon | Monitorizare temperatură |
| 40 | twm | Model termic și de uzura a CL |
| 41 | CL | Cilindri de lucru |
| 42 | SL | Secvență de laminare |
| 43 | PVPC | plan view pattern control - modelare profil și contur. |
| 44 | ZPC | punctul zero de corecție al deschiderii cilindrilor de lucru ai cajei de laminare |
| 45 | EGC | actionare electrica a suruburilor ce poziționează cilindrii de laminare |
| 46 | HGC | cilindri hidraulici de poziționare a cilindrilor de laminare |
| 47 | IIW | Intrnational institute of welding - institutul internațional de sudură |
| 48 | UFL - LFE | Unitate de functionare logică (program unitar) |
| 49 | BD | Bază de date |
| 50 | SQP | sequential quadratic programming - programare secventiala pătratică. |
| 51 | TSL | Temperatura de sfârșit de laminare |
| 52 | Gt | Grosime de transfer |
| 53 | Pgt | Priza de grosime de transfer a tablei de la caja degrosisoare Q1 la caja finisoare Q2 |
| 54 | t | Grosimea țintă |
| 55 | TTN | Tratament termic de normalizare |
| 56 | TTRI | Tratament termic de revenire înaltă |
| 57 | Rp0,2 | Rezistența la curgere egal cu Rp0,2 |
| 58 | Rp0,2 | Limita de curgere convențională se determină pentru o alungire procentuală neproportională $\epsilon_p = 0,2\%$ și se notează Rp0,2 . |
| 59 | Rm | Tensiunea corespunzătoare forței maxime de solicitare a epruvetei înainte |

| | | |
|----|-----|--|
| | | de rupere F_{max} , se numește rezistență la tracțiune (sau rezistență la rupere) și se notează Rm ($Rm = F_{max}/S_0$) |
| 60 | A | alungirea procentuală după rupere (sau alungirea la rupere) $A = [(L_u - L_0) / L_0] * 100$ |
| 61 | Z | coeficientul de gătuire (numit și gătuire sau stricțiune și exprimat în %) Z $Z = [(S_0 - S_u) / S_0] * 100$ |
| 62 | Gf | Grosimea finala a tablei laminate |
| 63 | CEV | Carbon echivalent conform formulei IIW |
| 64 | CNR | Controlled normalizing rolling - laminare normalizantă controlată |

PARTEA I-a: Stadiul actual în deformarea plastică la cald al metodologiilor și rutelor de laminare controlată.

Capitolul I – Stadiul actual în deformarea plastică la cald al metodologiilor și rutelor de laminare controlată în funcție de rută metalurgică și tratamentul termic al oțelurilor microaliate cu conținut de C mai mic de 0,20%.

1.4 Influența elementelor de aliere în compoziția chimică pentru oțelurile HSLA [9]:

Niobiul este un element alfa-gen. În oțelurile micro-aliate se poate găsi dizolvat în austenită sau sub formă de precipitate:

- carbura NbC,
- nitrura NbN sau
- carbonitrura Nb(C,N). [10]

Raportul dintre cantitatea de Nb legată de carbon și azot și cea solubilizată în austenită depinde de temperatură ca și de concentrațiile de carbon și azot în oțel. În funcție de compoziția chimică există posibilitatea ca în structura oțelului micro-aliat cu niobiu, laminat la cald alături de precipitatele noi formate în cursul răcirii să se afle și precipitate nedizolvate, formate la solidificare. Precipitatele de niobiu sînt foarte dure, cea.. 2500 - 3000 HV, cu un diametru de 1-10 nm. Prin încălzire și menținere un timp mai îndelungat la temperatură ridicată acestea au tendință de coalescență, ajungând la dimensiuni până la 70nm. Precipitatele formate la temperaturi peste temperatură de transformare A-F au o distribuție aleatoare, iar cele formate în cursul transformării austenitice sînt mai fine și dispuse în șiruri paralele.

Vanadiul este un element alfa-gen care închide domeniul γ la aproximativ 1,1 % V (nu se mai produce transformarea feritei în austenita, oțelul fiind complet feritic). Este un element puternic carburigen, formează carburi foarte fine și cu duritate mare, greu dizolvabile în austenita, asigurând astfel finisarea structurii. Vanadiul micșorează sensibilitatea la supraîncălzire a oțelurilor.

În practica industrială micro-alierea cu vanadiu se realizează uzual în concentrații de 0.05-0.25%. Vanadiul poate fi prezent în oțel în următoarele situații:

- dizolvat în oțel (datorită caracterului alfa-gen, la un conținut mai mare de 1,8% oțelul devine total feritic) [10]
- împreună cu carbonul liber, vanadiul formează carbura de vanadiu (VC)

- sub formă de precipitate (vanadiul are o mare afinitate față de azot cu care formează nitruri (VN))
- sub formă de precipitate complexe de carbonitruri: V(C, N) în care VN și VC au aproape aceeași structură cristalină formând soluție solidă în orice proporție;
- sub forma de oxid de vanadiu.

Vanadiul are o mare afinitate față de azot cu care formează nitruri (VN), fiind unul din elementele de legare a acestuia cel mai activ. Astfel în oțelurile cu conținut scăzut de carbon, vanadiul în concentrații mai mari de 0.03% micșorează conținutul de azot liber în așa măsură încât fenomenul de îmbătrânire se reduce foarte mult sau chiar dispăre. Azotul împreună cu carbonul liber și vanadiul formează precipitate complexe numite carbonitruri de vanadiu. Nitrurile de vanadiu se dizolvă atât în austenită cât și în ferită. La 850°C creșterea produsului [V][N] de la valoarea zero la 12, conduce la scăderea coeficientului de gătuire de la 56% la 35%.

Raportul dintre concentrațiile de VC și VN din oțel depinde de mai mulți factori tehnologici:

- condițiile de elaborare,
- compoziția chimică a oțelului (în particular conținutul de azot)

Nichelul este un element gamagen care se dizolvă atât în ferită cât și în austenită și nu formează carburi. Alierea cu nichel a aliajelor din sistemul Fe -Fe₃C conduce la deplasarea liniilor diagramei de echilibru și micșorează conținutul de carbon al perlitului. Nichelul crește durata de incubație a transformării austenitei deplasând curbele izo-austenitice la dreapta și în jos. Proprietățile mecanice ale oțelurilor perlitice cu nichel (**R_m**, Re, duritatea) cresc lent la mărirea conținutului de nichel, iar proprietățile de plasticitate (gătuirea și alungirea la rupere) scad. Alierea cu nichel determină coborârea temperaturii ductil - fragil.

Titanul este un element alfa-gen. El închide domeniul γ la aproximativ 1.2%.

Solubilitatea în ferită este limitată ca urmare a formării compusului Fe₂Ti.

Titanul reacționează puternic cu carbonul și azotul formând carburi și nitruri foarte fine și greu solubile care controlează mărimea grăunțului austenitic la temperaturi de încălzire relativ înalte și înlesnește dizolvarea compusului NbC .

Titanul poate fi prezent în oțel sub formă de:

- oxid,
- nitrură,
- carbură, carbo-nitrură,
- sulfura, carbo-sulfură sau,
- dizolvat în oțel ca atare.

Titanul este unul din elementele cu o mare afinitate față de azot, reducându-i astfel efectele pe care le are asupra caracteristicilor mecanice ale oțelurilor.

Molibdenul este un element alfa-gen care închide domeniul γ la aproximativ 2,5-3%. Se dizolvă parțial în ferită și cementită, restul formând carburi. În felul acesta se măresc caracteristicile de rezistență și, într-o oarecare măsură, plasticitatea. Molibdenul ridică puternic punctul S al diagramei Fe — Fe₃C și deplasează atât punctul E cât și punctul S la stânga, spre concentrații mai scăzute de carbon. ^[10] La conținuturi mici, până la 0,7%, molibdenul favorizează creșterea grăunților de austenită la încălzire, dar la conținuturi mai mari, asemănător tuturor elementelor carburigene, micșorează susceptibilitatea la supraîncălzire. Dacă oțelul pentru laminare TMCP, micro-aliat cu niobiu, este aliat suplimentar cu 0,2 ÷ 0,3% Mo, acest element influențează cinetica precipitării carbonitrurii de niobiu, mai ales în cazul austenitei deformate. Micro-alierea cu Mo la un grad de deformare aplicat $\approx 30\%$ accelerează precipitarea carburilor și crește proporția lor, comparativ cu oțelul micro-aliat numai cu Nb .

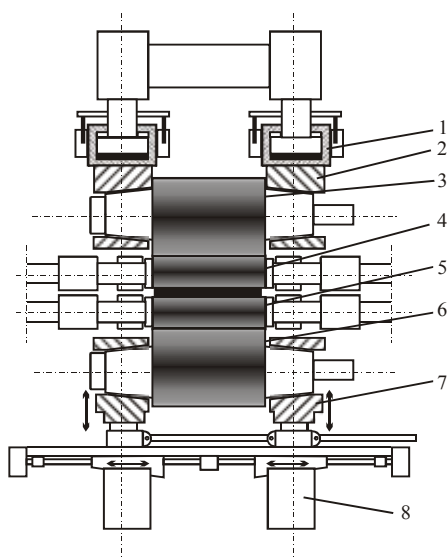


Figura 1 - Elementele componente ale unei caje de laminare cu cilindri orizontali:

1-cilindru hidraulic pentru poziționare cilindri; 2-lagăr-portlagăr cilindru superior de sprijin; 3-cilindru superior de sprijin; 4-cilindru superior de lucru; 5-cilindru inferior de lucru; 6-cilindru inferior de sprijin; 7-lagăr-portlagăr cilindru superior de sprijin; 8-cadru cajei.

La caja degrosisoare se face îndepărtarea țunderului de pe suprafața slebului trecându-l prin cutia de deșunderizare unde este stropit cu apă sub presiune la 150-180 bari și apoi ajung în caja degrosisoare (Q1). Caja degrosisoare este de tip cuarto reversibilă cu cadru închis.

- Forța maximă de laminare-7417 tf.
- Forța maximă în regim manual-5500 tf.
- Dimensiunile cilindrilor-diametrul maxim=1118mm

Grosimile de transfer ale semifabricatului obținut la Q1 denumite prize sînt preluate de grupul de role oscilante așteptând la temperatură de laminare.

Caja finisoare este de tip cuarto reversibilă cu cadru deschis.

- Forța maximă de laminare-8319tf
- Dimensiunile cilindrilor de lucru-diametrul maxim=1118mm

Instalația de măsurat grosimi de la caja finisoare poate măsura grosimi cuprinse între 6-80mm.

Procesul de laminare este împărțit în rute de laminare descrise mai jos

- **AR**^[22] = as rolled – laminare convențională în domeniul austenitic;
- **N**^[23] = normalized rolled – laminare în domeniul austenitic cu temperatură de sfârșit de laminare controlată;
- **N**^[24] = laminare în domeniul austenitic urmată de tratament termic de normalizare;
- **TMR**^[25] = laminare termomecanică – temperatură de sfârșit de laminare strict controlată;
- **TMCP**^[26] = laminare termomecanică asistată de un control al procesului și urmată de răcire accelerată sau răcire în aer în funcție de tipul oțelului intrat în procesul de laminare;

1.8 - Proces actual de laminare pentru oțelurile HSLA.

Procesul de laminare aplicat oțelurilor denumite **HSLA (high-strength-low-alloyed steel – oțel de rezistența înaltă slab aliat sau microaliat** ^[27]) este un proces de laminare controlat ce urmărește obținerea unei structuri cristaline cu grăuți fini pentru a oferi proprietăți mecanice cât mai bune și rezistență mai mare la coroziune atmosferică decât oțelurile carbon convenționale. Oțelurile **HSLA** nu sînt considerate a fi oțeluri aliate în sensul normal, deoarece acestea sînt proiectate pentru a satisface proprietățile specifice mecanice mai degrabă decât o compoziție

chimică caracteristică acestora (oțeluri **HSLA** au rezistența mecanică mai mare de 275 MPa, sau 40 KSI). Compoziția chimică a oțelului specific **HSLA** poate varia pentru diferite grosimi de produs, au un conținut scăzut de carbon $\leq 0.20\%C$ pentru a produce formabilitate și sudabilitate adecvate și au un conținut de mangan de până la 2,0 %. Cantități mici de crom, nichel, molibden, cupru, azot, vanadiu, niobiu, titan, zirconiu sînt utilizate în diverse combinații. Aceste oțeluri (**HSLA**) sînt de obicei furnizate în stare laminată, iar procesul de laminare poate fi tratat de la **N** la **TMCP**, sau supuse durificării prin precipitarea elementelor de microaliere. Mai mult decît atât, pentru că rezistența mecanică mare a **HSLA** poate fi obținută la conținut de carbon mai mic, sudabilitatea acestora este comparabilă sau mai bună decît cea a oțelurilor moi. Oțelurile **HSLA** sînt în primul rînd laminate la cald. Aceste metode de procesare includ:

- Laminare controlată, precipitarea elementelor durificînd oțelurile **HSLA** pentru obținerea granulației fine de austenită sau cu grad mare de deformare rezultînd o structură în șiruri de grăunți de austenită, care în timpul răcirii se transforma în grăunți de ferita fini ce vor crește tenacitatea. Granulația fină îmbunătățește în același timp și limita de curgere. Utilizarea răcirii accelerate a oțelurilor **HSLA** laminate controlat pentru a produce granulație fină de ferită în timpul transformării din austenita. Gradientul de răcire este suficient de rapid pentru a forma ferita aciculară, nici nu pot fi suficient de lente, astfel încît temperatură de răcire are drept rezultat imbatranirea rapidă prin precipitare.
- Călire sau răcire accelerată cu aer sau apă a oțelurilor cu conținut redus de carbon ($\leq 0,08\% C$), pentru transformarea în Bainita (ferită aciculară). Această microstructură oferă o combinație excelentă de rezistență ridicată (275 - 690 MPa, sau 60-100 KSI), sudabilitate excelentă, plasticitate și tenacitate mare (laminarea controlată este necesară pentru tranziția ductil-fragil la temperaturi scăzute).
- Normalizarea oțelurilor **HSLA** cu conținut de vanadiu, pentru refinisarea granulației, astfel îmbunătățindu-se tenacitatea și limita de curgere pentru aceste oțeluri.
- Recoacerea intercritică a oțelurilor **HSLA** (de asemenea, oțeluri carbon-mangan, cu conținut redus de carbon), pentru a obține o microstructură de faza duală (dual-phase) rezultînd insule de martensită dispersate într-o matrice de ferită. Această microstructură prezintă o rezistență mecanică mai mică, dar capacitatea de durificare rapidă oferă o combinație mai bună de ductilitate și rezistență la tracțiune decît a oțelurilor convenționale **HSLA** (Fig. 1.8) și îmbunătățește plasticitatea.

Procesul de laminare controlat este gestionat în funcție de rutele de laminare definite ce sînt detaliate după cum urmează:

I.8.1 - AR = Laminare clasică convențională în domeniul austenitic – temperatură de sfârșit de laminare **TSL $\approx 930^\circ C$** , sfârșitul de laminare în domeniul **SRX** ^[29] – static rolling recrystallization – recristalizare statică **RS** ^[30] – numită în literatura de specialitate **AR** ^[31] (as rolled) avînd următoarele caracteristici:

- Temperatură de încălzire a bramelor pentru laminare se află în **domeniul de temperatură de 1250-1350°C**, schema de laminare, reducerile efectuate pe treceri la cazele finisoare și degrosisoare sînt tratate într-o manieră obișnuită.
- Nu există scheme de laminare prestabilite funcție de gradul de oțel, de grosimea țintă de laminare sau de rută metalurgică pe care o urmează, condițiile de livrare ale tablei fiind AR sau ar putea urma tratamentul termic de normalizare.

○

I.8.2 - N = laminare controlată ^[32] după care urmează tratament termic de recoacere de normalizare în cuptor:

$$TSL = Ac3 + 50^{\circ}C$$

I.8.3 - N = laminarea normalizantă ^[33] (normalizing rolling) – laminare în domeniul austenitic–temperatură de sfârșit de laminare

$$TSL = Ac3 + 50^{\circ}C$$

I.8.4 - TMR (thermomechanical rolling) = laminare termomecanică ^[34] cu răcire finală în aer; cu temperatură de sfârșit de laminare în domeniul austenitic la limita punctului critic **Ar3** sau laminare intercritică cu **TSL** sub **Ar3** dar nu mai jos de **Ar₁**

Foarte Important se afla un coeficient de deformare în domeniul **Tnr** (temperatură la care recristalizarea este oprită) ce nu poate fi mai mic de 3 de la grosimea semifabricatului obținut la etapa degrositoare **Q1** la grosimea finală a tablei de oțel ce se realizează la etapa finisare **Q2**. **Tnr** este calculată în acest caz în funcție de conținutul de **Nb** conform 'Borrato et al' ^[35]:

$$\%Nb \leq 0.060$$

$$Tnr = 887 + 464 * C + (6445 * Nb - 644 * \sqrt{Nb}) + (732V - 30 * \sqrt{V}) + 890 * Ti + 363 * Al - 357 * Si \quad [^{\circ}C]$$

$$\%Nb > 0.060$$

$$Tnr = 887 + 464 * C + 1500 * Nb + (732 * V - 230 * \sqrt{V}) + 890 * Ti + 363 * Al - 357 * Si^{power(6)} \quad [^{\circ}C]$$

Temperatură de sfârșit de laminare în **DRX** ^[36] cu răcire finală în aer, schemele de laminare sînt strict controlate și sînt adaptate pentru a atinge următoarele caracteristici:

Rezistența **Rm** ^[37], limita de cugere **Rp_{0,2}** ^[38], tenacitatea (**KV** ^[39], **DWTT** ^[40], **CTOD** ^[41]), cât mai ridicate.

I.8.5 - TMCP – laminare termomecanică cu răcire accelerată cu apă ^[42] pentru obținerea unor structuri cu granulație fină și proprietăți mecanice ridicate. Se ține cont de coeficientul de deformare între 3÷6 ori mai mare decît grosimea finală a tablei plecînd de la semifabricatul ce așteaptă la temperatură de restart laminare după secvențele de egalizare și obținere a lățimii produsului final. **Tnr** este calculat în mod identic ca și în cazul TMR.

Capitolul II - Încercări de laborator specifice tablelor groase laminate la cald

II.1 - Încercări Mecanice

II.1.1 - Tracțiune la temperatură camerei

Scop: Determinarea caracteristicilor la solicitarea de întindere:

- Rezistența la rupere,
- Limita de curgere,

II.1.2 - Tracțiune la temperaturi înalte

Scop: Aprecierea comportamentului la temperaturi ridicate prin determinarea limitei de curgere ; Standarde de referință: EN 10002/5 ; ASTM E 21

II.1.3 - Testul de impact - încercarea de încovoiere la soc - Ciocanul pendul Charpy la temperatură camerei și la temperaturi scăzute;

Scop: Aprecierea tenacității prin determinarea energiei absorbite la impact, a casurii și a expansiunii laterale.

II.2 - Analize metalografice:

II.2.1 - Macrostructuri: **Amprenta Baumann** - catalogare nivel segregatie brame turnate.

II.2.2 - Microstructuri: microscopie optica și SEM:

Microscopie optica / Metalografie

Determinare mărime incluziuni , dimensiuni incluziuni, fisuri

- Determinare mărime graunte,conținut microstructurali;
- Masurare strat decarburat, cementat
- Structuri în benzi
- Analiză microstructuri sudura și duriță (MB, ZIT, MA)
- Atacuri cu reactivi chimici pentru evidențiere diferiți conținut metalografici, aspecte microstructurale
- Analiză macroscopică brame, tabla groasă, țevi sudate.



Aplicații:

- Analiză pe probe conductoare cu SEM și ne-conductoare cu VPSEM
- Analiză imagine (SE) (defecte de suprafață, incluziuni, structuri)
- Analiză topografică și compozițională cu BSD (contrast pe baza diferenței nr de masa atomic).
- Analiză compoziție elementară a probei, a incluziunilor, a particulelor pana la 1 micrometru.
- Detectorul EDX afiseaza rapid și identifica rapid toate elementele prezente în proba.
- WDX ne permite identificarea elementelor ce se suprapun în spectrul EDX.

Capitolul III - Modelarea programului de laminare - software SIROLL modelarea matematică integrată în nivelul 1 și 2 de automatizare al procesului de laminare în LTG2

III.1 Prezentare generală a modelarii procesului de laminare - Nivel 2 de automatizare^[39]

Nivelul 2 de automatizare cuprinde:

Calea cu role de la cutia de destunderizare la foarfeca de divizare

Cajele de laminare **Q1** and **Q2**

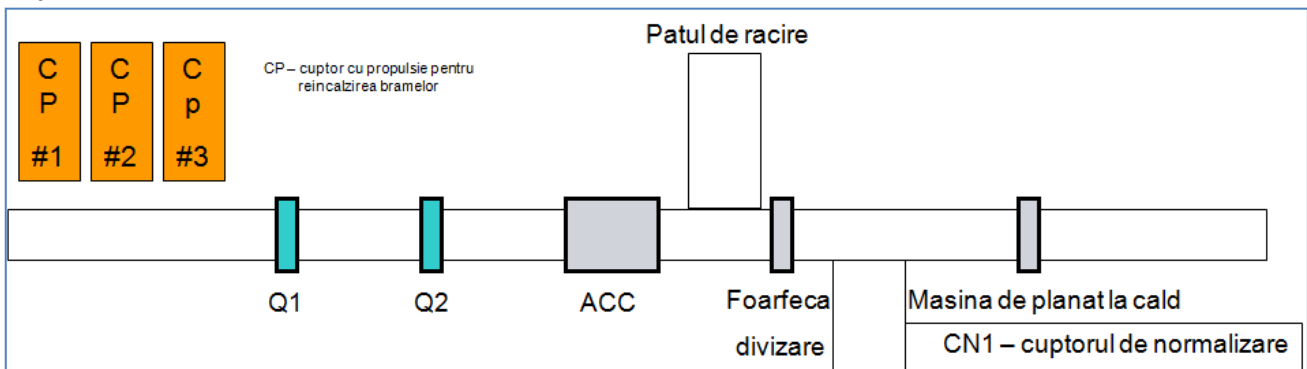


Figura 2 - Harta nivel 2 de automatizare

III.2.1 - Procese autonome:

Principalele procese autonome:

- **spt** setare transmitere informații.
- **Track** trasabilitate material.
- **Dsp** trasabilitate descărcare material.
- **Meas** Valori de proces măsurate.
- **Roll** Date despre cilindri/calibrare caja.
- **vis** legătura HMI.
- **Logger, plateLog** înregistrări
- **delay** întâzieri
- **Communication Proxies** comunicații.

Administrarea schimbului de date cu alte sisteme ce nu utilizează limbajul de programare **CORBA**. Principalele sarcini:

- conversia comunicării informațiilor din alte sisteme în limbaj **CORBA**.
- conversia fișierelor CORBA în fișiere de lucru pentru procesele **N2-SIROLL** și transmiterea prin subsisteme externe de comunicare (TCP/IP).

III.2.2 - Procese modelate în Nivel 2:

Atribute ale proceselor modelate de Nivel 2:

- PSC (pass schedule calculation) - calcul schemă laminare; procese principale:
 - ✚ precalc setare precalculare PSC²;
 - ✚ Fm_postcalc setare post-călcare PSC;
 - ✚ recalc setare re-călcare PSC;
 - ✚ adapt setare adaptare;
 - ✚ tempMon Monitorizare temperatură;
 - ✚ twm Model termic și de uzura a CL;
- Setări de referință multiple.
- Diagrame de control ale vitezei de lucru.

Definiții de date rulate în proces:

→ PDI - Primary Data Input – date primare de intrare

Datele primare de intrare conțin caracteristicile bramei: dimensiuni, matrice compoziție chimică, informații despre dimensiunile țintă pentru tabla laminată, și cerințe legate de încălzire, laminare, răcire și ajustare.

→ RUN - Execuție

Corespunde unei treceri de laminare în caja. Execuția pasului de laminare poate fi activă cu încărcare: (forța de laminare) sau inactivă - trecere în gol fără forță de laminare.

→ Sequence – Secvența

Sumarul tuturor execuțiilor pe trecerile de laminare efectuate, excluse întoarcerile pentru efectuarea lățimii țintă și pauzele/timpii de răcire efectuați pe o cajă este numită secvență. Se disting 3 secvențe:

1. **presizing sequence** – Secvența de egalizare grosime bramă,
2. **broad sizing sequence** – Secvența de efectuare a lățimii țintă.
3. **finishing sequence**.- Secvența de finalizare a tablei laminate: grosime, lungime

Între aceste trei secvențe există întoarceri ale materialului aflat în laminare cu 90°.

III.2.3 - Pasul 1 - Calcul schema laminare - PSC - calcul grosime de rotire a bramei

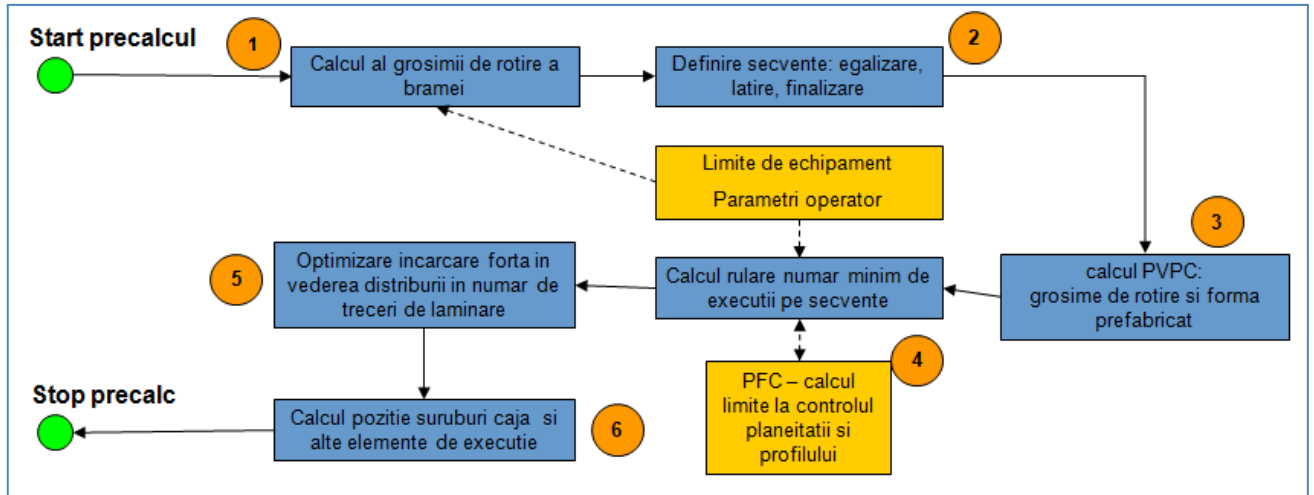


Figura 3 - Sinteza generală generare schema laminare Nivel 2 -SIROLL

- **Precalc - setare precalculare SL**

- a. Sarcina procesului **precalc** este modelarea completă a schemei de laminare.
 - b. Procesul **precalc** rulează odată cu recepția datelor pentru brama ce urmează să intre în procesul de laminare starts.
 - c. Distribuția temperaturii este dată de procesul **tempmon** în cazul existenței datelor valide, altfel procesul de monitorizare și calcul al temperaturii va fi inițializat și corelat cu temperatură țintă de descărcare a bramei din CP-uri.
- Procesul **precalc** va determina numărul de treceri de laminare, distribuția grosimii funcție de pasul de laminare, valorile/pozițiile elementelor de acționare. Verifică dacă limitele cajelor de laminare (forța, putere, grad de reducere etc) sînt depășite și dacă valorile țintă (grosime, profil, planeitate, temperatură sînt atinse). Procesul de laminare este divizat în 2 secvențe:
- ✚ Fiecare secvența începe cu o grosime de intrare calculată și este finalizată cu o grosime de ieșire calculată. Intrarea și ieșirea grosimii de laminare este efectuată pentru toate secvențele.
 - ✚ Numărul de secvențe este funcție de numărul de întoarceri preluat din datele primare de intrare.

În pasul 1 în vederea efectuării secvenței **broadsizing** de obținere lățime țintită există trei posibilități de execuție funcție de dimensiunile de brama alocate în vederea obținerii produsului final.

- a. **Caz 1 – Laminare fără rotire cu 90°C**; calcul grosime de întoarcere în vederea obținerii lățimii materialului:

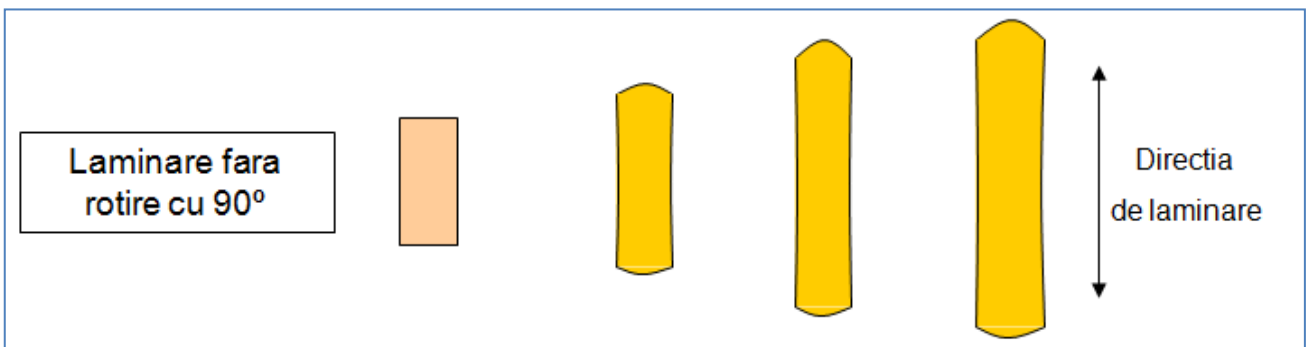


Figura 4- Schema laminare fără rotire

Procesul de laminare este constituit dintr-o singura secvență:

- ✚ Secvența de finalizare a tablei laminate: grosime, lungime, unde lățimea materialului este asigurată de lățimea bramei aflată la laminare.
- ✚ lățime bramă plus distribuție lățime în timpul procesului de laminare este egal cu lățime țintă tabla.

Secvența de finalizare în acest caz poate fi divizată în multiple secvențe funcție de ruta de laminare impusă și funcție de timpii de răcire calculați.

b. Caz 2 – Laminare cu o rotire la 90°C; calcul grosime de intoarcere în vederea obtinerii lățimii materialului:

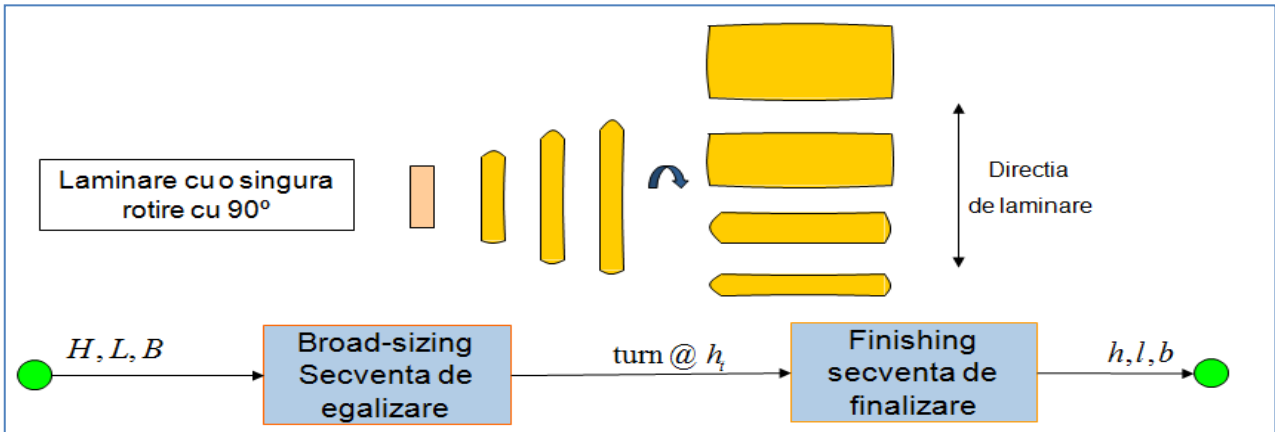


Figura 5 - Schemă laminare cu o singura rotire la 90°

Ecuția 1

$$h_t = \frac{L \cdot H}{b + \Delta b_{fin} \cdot \beta_{fin}} \cdot \frac{\beta_{fin}}{\beta_{broad}}$$

Simboluri:

Δb_{xxx} : distribuția marginală inclusă în secvența

β_{xxx} : distribuția totală a lățimii în secvența

H: grosimea bramei

L: lungimea bramei

B: lățimea bramei

h_t : grosimea tinta a materialului

b: lățimea tinta a materialului

Δb_{fin} : lățimea finală după ajustare

Grosimea de intoarcere este prestabilită fără variații deoarece lungimea rezultată după secvența **broad sizing** este foarte apropiată de lățimea țintită pentru tabla laminată, astfel încât extinderea naturală a materialului în timpul secvenței finishing să compenseze eventualele minusuri în domeniul de valori prestabilit al lățimii tablei aflate în laminare.

c. Caz 3 – Laminare cu dubla rotire la 90°C; calcul grosime de intoarcere în vederea obtinerii lățimii materialului:

Grosimea pentru rotirea nr 2 depinde de grosimea la care a fost executată rotirea nr.1

Constrângeri în efectuarea grosimmi de rotire cu 90°:

- ✚ lățimea maximă a cilindrilor de lucru;
- ✚ O reducere minima în secvența de egalizare;

Secvența optimă de intoarcere este determinată de limitele date în **N2-SIROLL** în conformitate cu vederea în plan a modelului pentru a reduce la minim adaosul de capăt de laminare.

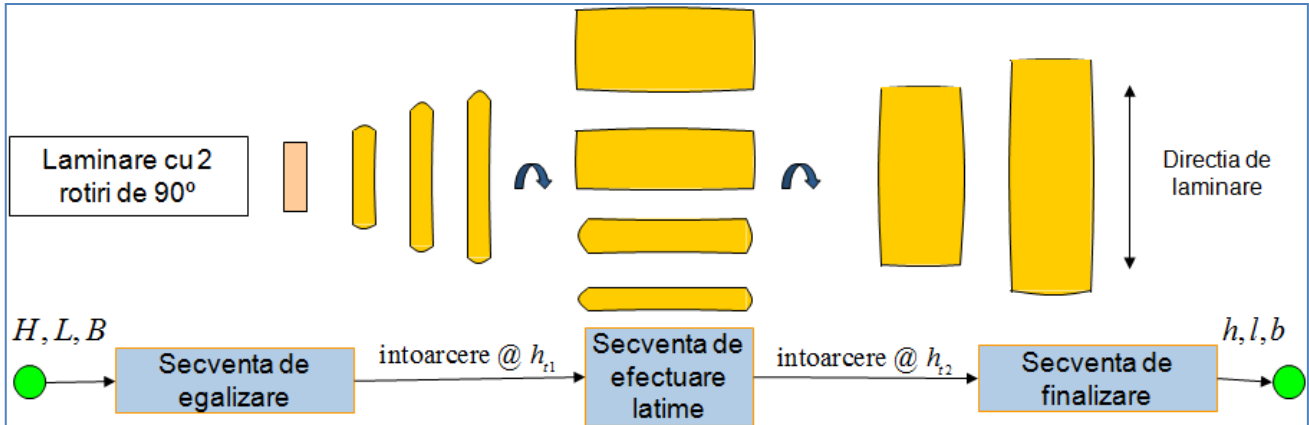


Figura 6 - Schemă laminare cu doua rotiri la 90°

Curgerea materialului în timpul procesului de deformare plastica la cald are loc în direcție longitudinală și transversală.

- O împrăștiere mai mare are loc către marginea tablei cauzată de o elasticitate scăzută în aceasta zonă – de aici și adaosul de material.
 - Rezultatul este denumit : „limba de material“.
- Această dispersie liberă a materialului cauzează o extralățire în capul și piciorul tablei.

Capitolul IV - Concluzii

Tehnologia de laminare la cald a tablelor groase cu ajutorul automatizării complexe este o provocare ce deschide posibilitati de simulare a procesului de laminare cu date de intrare ce pot fi manipulate în limitele tehnologice și de echipament astfel încât rezultatele pot fi surprinzătoare. Dotarea de excepție a laboratorului permite analize complexe și corelarea procesului de laminare cu compozițiile chimice utilizate atât experimental cât și industrial, astfel încât funcție de rezultat urmărit se pot aduce corecții și reglaje întreg procesului industrial obținând avantaje economice ce cuprind valoare adăugată cât și reduceri de cost.

PARTEA II-a- Directii de cercetare:

Capitolul V - Rute de laminare controlate și tratamentul termic de normalizare

V.1 Laminarea controlată în domeniul austenitic cu TSL = Ac₃+50°C și optimizare parametri proces laminare în corelație directă cu compoziția chimică:

V.1.1 - Cercetari privind influența compoziției chimice și a parametrilor de proces pentru marca de oțel **P460NL1/NL2** cu limita minimă a rezistenței la curgere de 460 **MPa** și tenacitate ridicată la temperaturi joase [-40° C; -50°C] pentru gama de grosimi 8÷12 mm.

V1.2 - Optimizare compoziție chimică în vederea atingerii proprietatilor mecanice impuse în standardul european EN 10028/3-2004 pentru mărcile de oțel **P460NL1/P460NL2** descrise în V.1.1.

V.2 Laminare termomecanica cu TSL = Ar3+180/t

V.2.1 - Cercetări privind laminarea termomecanică experimentală pentru oțelurile slab aliate cu compoziție chimică bazata pe elementele de aliere MoNbTi în vederea atingerii proprietăților cerute pentru marca de oțel pentru construcții industriale definită în EN10025-4 - **S355M/S355ML** cu valori ale rezistenței la curgere plecînd de la 355 **MPa** și tenacitate ridicată la temperaturi joase [-20° C; -40°C] pentru gama de grosimi 60÷80 mm.

V.3 Optimizare modelare matematică și introducerea modificărilor în software SIROLL

V.3.1 Cercetări privind laminarea controlată experimentală pe o nouă rută de laminare în comparație cu ruta de laminare controlată **N** pentru oțelurilor slab aliate HSLA cu grosime de 60 mm pe matrice de compoziție chimicăîn vederea atingerii proprietăților cerute pentru mărcii de oțel pentru construcții industriale definite în EN10225-4 - **S355G10** cu valori ale rezistenței la curgere plecînd de la 355 **MPa** și tenacitate ridicată la temperaturi joase [-20° C; -40°C] pentru gama de grosimi 60÷80 mm.

Capitolul VI – Contribuții personale la elaborarea tezei de doctorat, concluzii finale și domeniile de valorificare a rezultatelor. Direcții de orientare a cercetărilor viitoare.

Bibliografie

Anexa 1 – Termeni și definiții

Anexa 2 – Grafice și date

V.2 Optimizare compoziție chimică în vederea atingerii proprietatilor mecanice impuse în standardul EN 10028/3-2004 pentru Mărcile de oțel P460NL1/P460NL2;

În urma analizei efectuate pe tablele groase din oțel cu destinație vase sub presiune privind marca de oțel P460 cu stare de livrare N și dubla condiție NL1 respectiv NL2 privind tenacitatea oțelului conform EN10028/3/2009 am cercetat în condiții industriale în Laminorul de Tabla Groasă nr. 2 din ArcelorMittal Galați posibilitatea redefinirii unei rute metalurgice pentru aceasta marca de oțel.

Definirea rutei metalurgice trebuie să asigure proprietățile de rezistență, deformabilitate și tenacitate cerute de standardul de produs incluzând optimizarea parametrilor principali ai laminării normalizante cât și a tratamentului termic de normalizare care să aducă un aport substanțial în acest proces. Compoziția chimică în condițiile actuale ale cererii de pe piață trebuie să aibă un cost cât mai competitiv. Cele 2 compoziții chimice denumite **T1** și **T2** cercetate și prezentate în laminarea experimentală comparativă sînt **CMnNbVTiNiN** respectiv **CMnNbVN** avînd principalele elemente de microaliere:

T1: manganul, siliciul, niobiu, vanadiu, titan, nichelul și azotul.

T2: manganul, siliciul, niobiu, vanadiu și azotul.

Diferența majoră în costul celor 2 matrici este dată de elementele de microaliere în **T1** cu **Ni** și **Ti**, rezultînd o diferență de aproximativ 50 Euro/tona. Cercetarea a cuprins două etape ce s-a desfășurat pe parcursul a 8 luni de zile în perioada Aprilie – Decembrie 2014.

În cadrul cercetării au fost incluse șase șarje din care trei cu compoziția chimică **T1** și trei cu compoziția chimică **T2** din care au fost alocate câte 2 brame/șarjă în vederea laminării în table cu grosimi de 8, 10 și 12 mm. Am prelevat cupoane de probe în stare laminată cât și după tratamentul termic de normalizare efectuat în cuptorul industrial CN1-LTG2 din care au fost efectuate următoarele probe:

- Analiză spectrală.
- Încercări mecanice:
 - Încercări mecanice în stare laminată: Încercarea la Tracțiune; **R_m**, **R_{p0.2}**, **A**, Încercarea la încovoiere prin soc – Tenacitate; **KV** transversal: **T1** = -40°C/ -50°C
 - Încercări mecanice după TTN în LTG: **R_m**, **R_{p0.2}**, **A**,

TT normalizare în laborator: T = 870÷890°C: timp de menținere total T_t=30’;

- TT revenire în laborator: T_t = 30’; T = 550-600°C
- Încercări mecanice după TTN în lab
- **Parametri simulare tratamente termice pe care le-am efectuat în laborator:**
 - TTN normalizare: T = 870÷890°C: Timp de menținere T_t=30’;
 - TTRÎ revenire în cuptor: T = 30’; T_t = 550-600°C
 - Încercări mecanice: Încercarea la Tracțiune; **R_m**, **R_{p0.2}**, **A**; Încercarea la încovoiere prin șoc – Tenacitate; **KV** transversal la două temperaturi [-40°C; -50°C].

Tabel 2 - Matricile compozițiilor chimice cercetate

| Nr test | C țintă [%] | Mn țintă [%] | Si țintă [%] | S țintă [%] | P țintă [%] | Al țintă [%] | N țintă [%] | Ni țintă [%] | Nb țintă [%] | Ti țintă [%] | V țintă [%] | Ca țintă [%] | H2 max [%] |
|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| T1 | 0.193 | 1.630 | 0.500 | 0.004 | 0.015 | 0.025 | 0.010 | 0.20 | 0.040 | 0.025 | 0.125 | 0.001 | 0.0003 |
| T2 | 0.173 | 1.580 | 0.500 | 0.004 | 0.015 | 0.03 | 0.015 | 0.00 | 0.030 | 0.000 | 0.137 | 0.001 | 0.0003 |
| delta T1-T2 | 0.020 | 0.050 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -0.005 | -0.005 | 0.200 | 0.010 | 0.025 | -0.012 | 0.000 | 0.000 |

Încălzire brame în CP1 – temperatura țintă = 1250°C

Laminarea controlată a fost laminarea efectuată cu ajutorul modelării matematice soft **SIROLL** – nivel 2 de automatizare al procesului în LTG2 pe rută predefinită **N**. Calculul **TSL** este funcție de grosime și este descris în figura de mai jos:

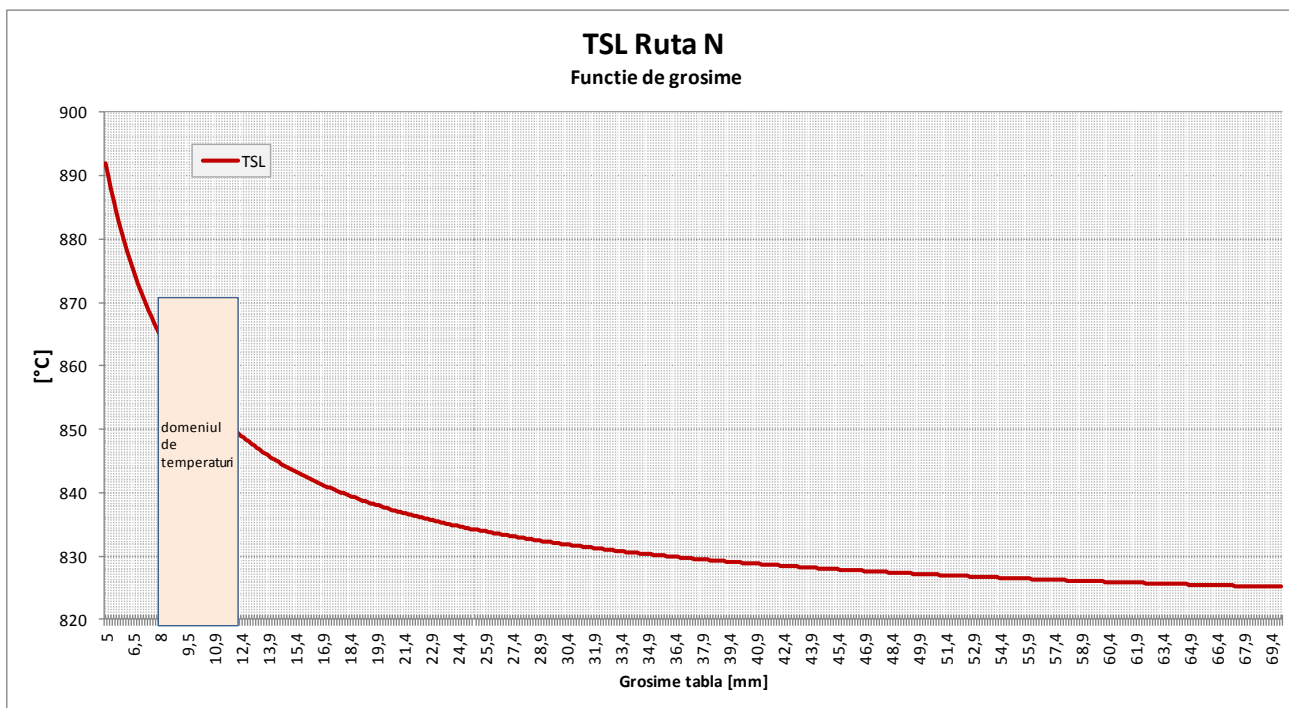


Figura 7 - Calcul TSL funcție de grosime

Laminarea a fost realizată pe cajele quarto reversibile din LTG2 în regim automat

Principalii parametri ai procesului de laminare pentru compozițiile chimice **T1** și **T2** sînt redați în tabelele 18 și 19:

Tabel 3 - Parametri laminare **T1**

| Date Laminare | | | | | | | | |
|---------------------------|---|------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------|---|---|
| modul de laminare | Q1 | | priza de grosime | | Q2 | | | |
| Laminare L2 AGC | presetari TÎL L2 AGC [°C] | TÎL Q1 [°C] | Presetari PGT L2 AGC [mm] | PGT realizat [mm] | TÎL preset L2 AGC [°C] | TÎL Q2 [°C] | TSL presetare L2 Q2 [°C] | TSL realizat Q2 [°C] |
| Auto | 1149 | 1145 | 40 | 40.1 | 995 | 998 | 865 | 866 |
| Auto | 1149 | 1145 | 40 | 40.1 | 995 | 998 | 865 | 866 |
| Auto | 1148 | 1143 | 44 | 43.2 | 1028 | 1030 | 856 | 847 |
| Auto | 1136 | 1134 | 44 | 43.2 | 1028 | 1030 | 856 | 847 |
| Auto | 1157 | 1142 | 51 | 49.6 | 1028 | 1030 | 850 | 852 |
| Auto | 1149 | 1146 | 51 | 49.6 | 1028 | 1030 | 850 | 852 |

Laminarea s-a derulat fără evenimente de proces, parametrii de laminare realizați sînt în marja de eroare de $\pm 3\%$ pentru **PGT** (priza grosime transfer între caja degrositoare **Q1** și cea finisoare **Q2**) și **TSL** (temperatură sfîrșit de laminare). Raportul de deformare realizat sub **T_{nr}** este de la 5:1 pt tabla de 8 mm la 4:1 pentru cea de 12 mm, acest raport tintind o finisare a grăunților de mărime de punctaj 9÷10 în stare laminată.

V.2.3 - Tratamente termice

V.2.3.a - Normalizarea în condiții industriale - T1

Cele 6 table laminate pe **T1** au fost introduse în cuptorul de tratament termic de normalizare CN1 din cadrul secției LTG2. Domeniul de temperaturi țintă în cuptorul de normalizare CN1 din LTG2: $T = 870 \div 890^\circ\text{C}$. Timp specific de menținere pentru oțelurile slab aliate = 2.2 min /mm, iar pentru tabla în domeniul de grosimi $6 \div 15$ mm se aplica:

$$T = 30' + Gf$$

unde **Gf** = grosimea finală a tablei realizate.

Parametrii urmăriti / realizați sînt evidențiați în tabelul următor

Tabel 4 - Date TTN - **T1**

| Matrice compoziție chimică | Marca oțel P460 NL1/NL2 | Date CN1 – matrice de compoziție chimică T1 | | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------|---|---------------------------|------------------|---|---------------------|---------------------|
| | | P460NL2 timp specific tratament 30 minute minimum pentru grosimi ≥ 15 mm [min] | | | temperatură specific tratament normalizare [°C] | | |
| | Șarjă | timp specific minim | timp specific maxim | timp realizat | Medie temperatură realizată CN1 [°C] | T minim CN1 [°C] | T maxim CN1 [°C] |
| T1 | 910215 | 30 | 38 | 28 | 861 | 850°C | 890°C |
| | 910215 | 30 | 38 | 28 | 861 | 850°C | 890°C |
| | 910161 | 30 | 40 | 30 | 871 | 850°C | 890°C |
| | 910161 | 30 | 40 | 30 | 871 | 850°C | 890°C |
| | 919013 | 30 | 42 | 32 | 869 | 850°C | 890°C |
| | 919013 | 30 | 42 | 32 | 869 | 850°C | 890°C |

Timpii de tratament realizați au fost la limita minimă a timpului specific de tratament, iar temperatura medie realizată a fost la jumătatea domeniului de temperatură impus.

V.2.3.c. - Normalizarea în condiții de laborator - T1.

Din cele 6 table laminate au fost prelevate 12 probe și au fost introduse în cuptorul de tratament termic de normalizare din laborator. Palierul termic pentru TTN_{lab} a fost setat în domeniul $870 \div 890^\circ\text{C}$, probele introduce au fost menținute 32 minute. Parametri de laborator sînt evidențiați în tabelul 10:

V.2.4 - Amprenta Bauman – T1 și T2

Clasa de segregare pentru brama selectată din șarja cu compoziția chimică **T1** este clasa 2, o clasa de segregare normala pentru acest tip de oțel și care nu necesita precautii speciale privind clasa de US .

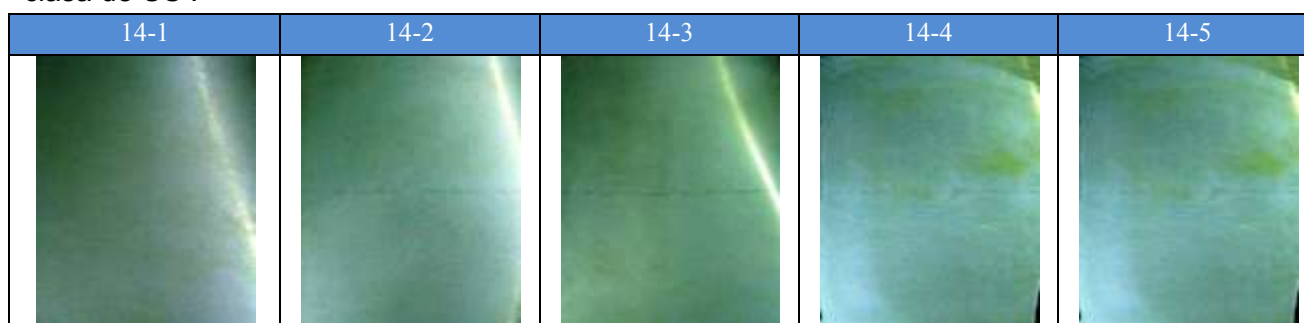


Figura 8 - Amprenta Baumann - clasa de segregatie 2 - T1

V.2.5 - Analiză spectrală

Tabel 5 - Analiză spectrală T1

| Șarjă T1 | C [%] | Mn [%] | Si [%] | S [%] | P [%] | Al [%] | N [%] | Ni [%] | Ti [%] | Nb [%] | V [%] |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 910215 | 0.1880 | 1.5710 | 0.4800 | 0.0030 | 0.0110 | 0.0300 | 0.0056 | 0.1870 | 0.0280 | 0.0400 | 0.1250 |
| 928216 | 0.1910 | 1.5400 | 0.4550 | 0.0035 | 0.0130 | 0.0340 | 0.0057 | 0.1830 | 0.0270 | 0.0400 | 0.1300 |
| 910161 | 0.1930 | 1.5600 | 0.4900 | 0.0030 | 0.0130 | 0.0450 | 0.0067 | 0.1850 | 0.0260 | 0.0400 | 0.1250 |

V.2.6. - Încercări mecanice:

Au fost prelevate probe în stare laminată și în stare normalizată din cele 6 table cu compoziția chimică T1 din care au fost efectuate următoarele teste:

- Tracțiune transversala – Rm [MPa], Rp0.2 [MPa], A [%] efectuat pe mașina INSTRON.
- Test de reziliența transversala KVt efectuat cu Ciocanul Pendul Charpy – [J].

V.2.6.a. - Probe prelevate în stare laminată / în stare normalizată CN1 – LTG.

Experimente de laborator TTN; TTRI. Sumar date laborator în tabelul de mai jos:

Tabel 6 - Rezultate laborator T1

| rezultate laborator | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------|-------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Rm [MPa] | | | | | | Rp0.2 [MPa] | | | | |
| Rm min | Rm laminat | Rm TTN LTG | Rm TTN lab | Rm TTRÎ lab | Rm max | Rp0.2 min | Rp0.2 laminat | Rp0.2 TTN LTG2 | Rp0.2 TTN lab | Rp0.2 TTRÎ lab |
| 570 | 852 | 755 | 729 | 713 | 730 | 460 | 590 | 416 | 441 | 525 |
| 570 | 862 | 748 | 719 | 707 | 730 | 460 | 574 | 405 | 423 | 536 |
| 570 | 839 | 738 | 713 | 706 | 730 | 460 | 522 | 416 | 456 | 592 |
| 570 | 824 | 729 | 701 | 690 | 730 | 460 | 587 | 449 | 434 | 572 |
| 570 | 799 | 718 | 693 | 702 | 730 | 460 | 557 | 454 | 481 | 562 |
| 570 | 802 | 726 | 698 | 693 | 730 | 460 | 533 | 405 | 475 | 535 |

V.2.7. - Analize metalografice - imagistica optica Test T1

Tabel 7 - Metalografie T1

| Test | Șarjă | Marca oțel | Grosime (mm) | Obs . |
|------------|--------|------------|--------------|---|
| T1 - 10 mm | 910215 | P460NL2 | 10 | Normalizare: 880°C/30min Revenire înaltă: 550°/30min |
| T1 - 12 mm | 928216 | P460NL2 | 12 | |

Tabel 8 - Analiză microstructura T1

| Neatacat | | T1 - 1 Atac nital 2% | |
|-----------------|-----|----------------------|-----------------------------|
| Oxizi | 1 | Mărime graunte | 10 |
| Sulfuri | 0,5 | Structura | Ferito-perlitică în șiruri. |
| silicați | - | Segregație | Puternică în zona centrală. |
| Nitruri | - | Strat decarburat | - |
| Alte incluziuni | - | Alte determinari | - |

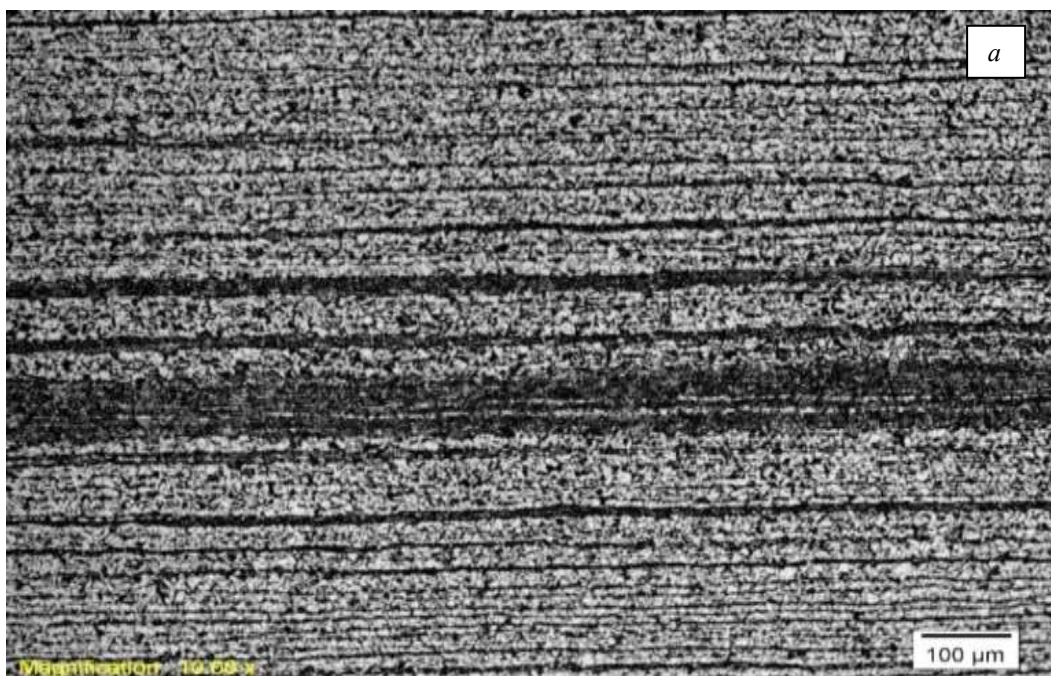


Figura 9 - Atac nital rezoluție 100x T1- 10 mm grosime
Segregație centrală

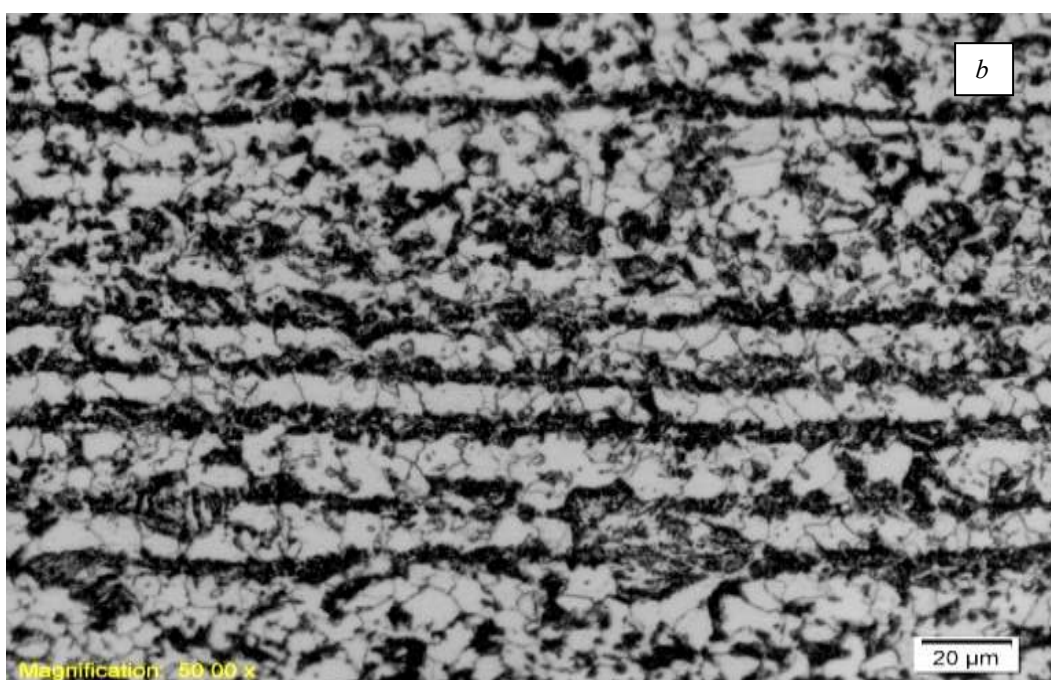


Figura 10 - Atac nital rezoluție 500x T1- 10 mm grosime
Structură ferito-perlitică în șiruri - TTN realizat nu a reușit să omogenizeze structura cristalină, transformarea austenitică incompletă combinată cu structură de laminare, tensiunile remanente la marginea grăunților cu impact negativ în zona fragil-ductil la temperaturile de testare joase [-40°C;-50°C]

V.2.9 - Influența laminării pentru cele 2 matrici T1 și T2

Variația parametrilor de laminare monitorizați pentru cele două compoziții chimice **T1** și **T2**: **PGT**; **TILQ1**; **TILQ2**; **TSL** nu este de natură să influențeze major caracteristicile mecanice ale tablelor, întrucât conform cerințelor de standard EN 10028/3/2009 acestea vor fi tratate termic - tratament termic de normalizare.

V.2.10. - Influența tratamentului termic de normalizare

T1_T2

Deși CN1 a atins temperaturile în domeniul $A_{c3}+[30+50^{\circ}C]$ acestea au fost către limita inferioară a domeniului și coroborat cu timpul total de menținere la limita minimă se observă în faptul că valorile **KV** obținute nu au avut o creștere majoră

V.2.12. - Influența microelementelor de aliere în cele două compoziții T1 și T2.

T1 (vezi valori în tabele: 4; 16; 17)

- Ni microalierea în medie cu 0,185% nu a adus creșterea valorilor **KV** prezumată pentru asigurarea tenacității la temperaturi scăzute $[-40/-50^{\circ}C]$. Creșterea procentuală a acestui element în vederea asigurării unor valori mai mari de pragul minim de 27J ar conduce la o valoare de cost extrem de ridicată, astfel încât s-ar pierde valoare adăugată în raportul preț/calitate..
- Ti - microalierea realizată a minimizat fisurile de turnare, am obținut brame fără defecte. După laminare s-au observat nitruirile de titan și a precipitatelor ce au impact direct în caracteristicile mecanice conducând la o creștere semnificativă a **Rm** și **Rp_{0,2}**.
- Contribuția Ni și Ti este semnificativă în creșterea valorii de $C_{eq} \approx 0,51$ conform formulei de calcul IIV

T2 (vezi valori în tabele: 4; 16; 17)

- Am eliminat din compoziția chimică microalierea cu Ni – se reduc semnificativ costurile.
- Am eliminat microalierea cu Ti în vederea reducerii precipitatelor și nitruirilor în scopul de a reduce fragilitatea acestui tip de oțel în gama de grosimi cercetată – solicita o atenție mai mare în procesul de turnare
- Am ridicat valoarea procentuală pentru V la 0.137% în vederea stabilizării valorii **Rp_{0,2}** după tratamentul termic de normalizare.
- Am redus valoarea procentuală a elementului Nb pentru a nu crește valoarea de rezistență **Rm** dincolo de limita maximă impusă de standard.
- Am crescut valoarea procentuală a elementului N – în vederea formării carbonitruirilor de VNb pentru a ne asigura sustenabilitatea valorilor medii pentru **Rm** și **Rp_{0,2}**.

V.2.14.. Sumar concluzii:

- Temperatura de sfârșit de laminare apropiată de **Ar₃** influențează major în sens negativ caracteristicile mecanice, **Rm**, **Rp_{0,2}** și valorile **KV**.
- În urma TTN în cazul tablelor laminate cu **TSL** apropiat de **Ar₃** rezultă o pierdere majoră în valoarea **Rp_{0,2}** cu peste 100 **MPa** în cazul **T1** ajungând sub limita minimă de 460**MPa** impusă de EN10028/3/2009;
- Aplicarea unui tratament termic secundar de revenire înaltă aduce valoarea **Rp_{0,2}** apropiată de valorile obținute în stare laminate, dar induce o creștere a costurilor de producție.
- În cazul **T2** – după TTN valoarea **Rp_{0,2}** scade în medie cu 30-50 **MPa**, astfel încât valoarea finală a **Rp_{0,2}** în cazul celor 6 table se afla peste limita minimă de 460 **MPa** cu o medie de 30 **MPa**.
- Datorită valorilor obținute în stare normalizată, tratamentul secundar de revenire înaltă nu mai reprezintă o necesitate acest lucru conducând la o reducere a costului total de producție. În concluzie am obținut valori bune și stabile ale caracteristicilor mecanice: **Rm**, **Rp_{0,2}**, **KV**, A după tratamentul termic de normalizare. Parametri tratamentului termic stabilit egal cu 2,2 min/mm, dar nu mai puțin de 30 minute; domeniul de temperaturi în cuptorul de

normalizare $T=870\div 890^{\circ}\text{C}$ Nu este necesară un tratament termic secundar, dar acesta poate fi utilizat în vederea creșterii valorilor **KV** cu o medie de 10 J în cazul în care acestea sînt la limita pragului minim. Datorită eliminării Ni și Ti din cadrul matricii se obține o reducere de cost cu o medie de 49 €/t, obținându-se un cost competitiv.

- Cercetarea a vizat domeniul de grosimi 6-16 mm, dar datorită acestor rezultate se deschid noi posibilități de abordare în vederea extinderii domeniului de grosim în 2 etape: 16-40 mm, respectiv 16-63 mm.

V.3 Cercetări privind laminarea termomecanică pentru oțelurilor slab aliate S355ML cu grosimi mari: 70-80 mm pentru compoziție chimică cu elemente de aliere MoNbTi

V.3.1 - Scopul cercetării

A doua direcție de cercetare a vizat tipul de oțel structural cu grosimi mai mari de 50 mm și pînă la 80 mm laminate termomecanic descrise în EN10025/3/2004. Am cercetat în condiții industriale în Laminorul de Tabla Groasă nr. 2 din ArcelorMittal Galați posibilitatea utilizării rutei metalurgice de laminare termomecanică fără utilizarea răcirii accelerate în vederea creșterii fezabilității pe gama de grosimi a acestui tip de oțel laminat termomecanic. Ruta metalurgică trebuie să asigure proprietățile de rezistență, deformabilitate și tenacitate cerute de standardul de produs incluzînd optimizarea parametrilor principali ai laminării termomecanice care să aducă un aport substanțial în acest proces. Compoziția chimică în condițiile actuale ale cererii de pe piață trebuie să aibă un cost cît mai competitiv. Compoziția chimică denumită **M1** laminată experimental are principalele elemente de aliere: manganul, siliciul, niobiu, molibden, titan și azotul [CMnNbMoTiN].

Am efectuat teste de simulare de laminare termomecanică cu ajutorul softului de modelare automatizată de nivel 2 **SIROLL** dezvoltat de SiemensVAI în 2009 și implementat în procesul de laminare din LTG2.

Am verificat ca următorii parametri de laminare: forța, cuplul de forță, viteza să fie în limitele tehnice ale cajelor. Am verificat ca parametrii metalurgici: priza de grosime de transfer între cele două caje **Q1** și **Q2**, temperatură de început de laminare la caja finisoare **Q2**, temperatură de sfîrșit de laminare la caja finisoare **Q2** să fie în domeniile prestabilite teoretic.

În cadrul cercetării am laminat 4 brame cu compoziția chimică aferentă matricii **M1** pe următoarele grosimi: 60, 70, 70 și 80 mm. Am prelevat cupoane de probe în stare laminată din care au fost efectuate următoarele probe:

- Analiză spectrală.
- Încercări mecanice:
 - Încercări mecanice în stare laminată: Încercarea la Tracțiune; **R_m**, **R_{p0.2}** ,, **A**, Încercarea la încovoiere prin soc – Tenacitate; **KV** transversal: **T_{1,2}** = -40°C/ -50°C; coeficientul de gătuire (numit și gătuire sau stricțiune și exprimat în %) **Z**:

Tabel 9- Compoziția chimică M1

| C | C | Mn | Mn | Și | Și | Și | S | P | P |
|--------------|---------------|-------------------|--------------|--------------|------------------|------------------|--------|--------|--------|
| min | max | min | max | min | max | target | Max | min | max |
| 0,085 | 0,100 | 1,250 | 1,400 | 0,250 | 0,400 | 0,330 | 0,005 | 0,000 | 0,018 |
| N | N | Σ | Mo | Mo | Σ min | Σ max | Ca | Ca | H2 |
| max | target | (Ni+Cu+Cr) | min | max | (Nb+Ti+V) | (Nb+Ti+V) | Min | max | max |
| 0,007 | 0,006 | 0,50 | 0,055 | 0,065 | 0,050 | 0,078 | 0,0005 | 0,0015 | 0,0003 |

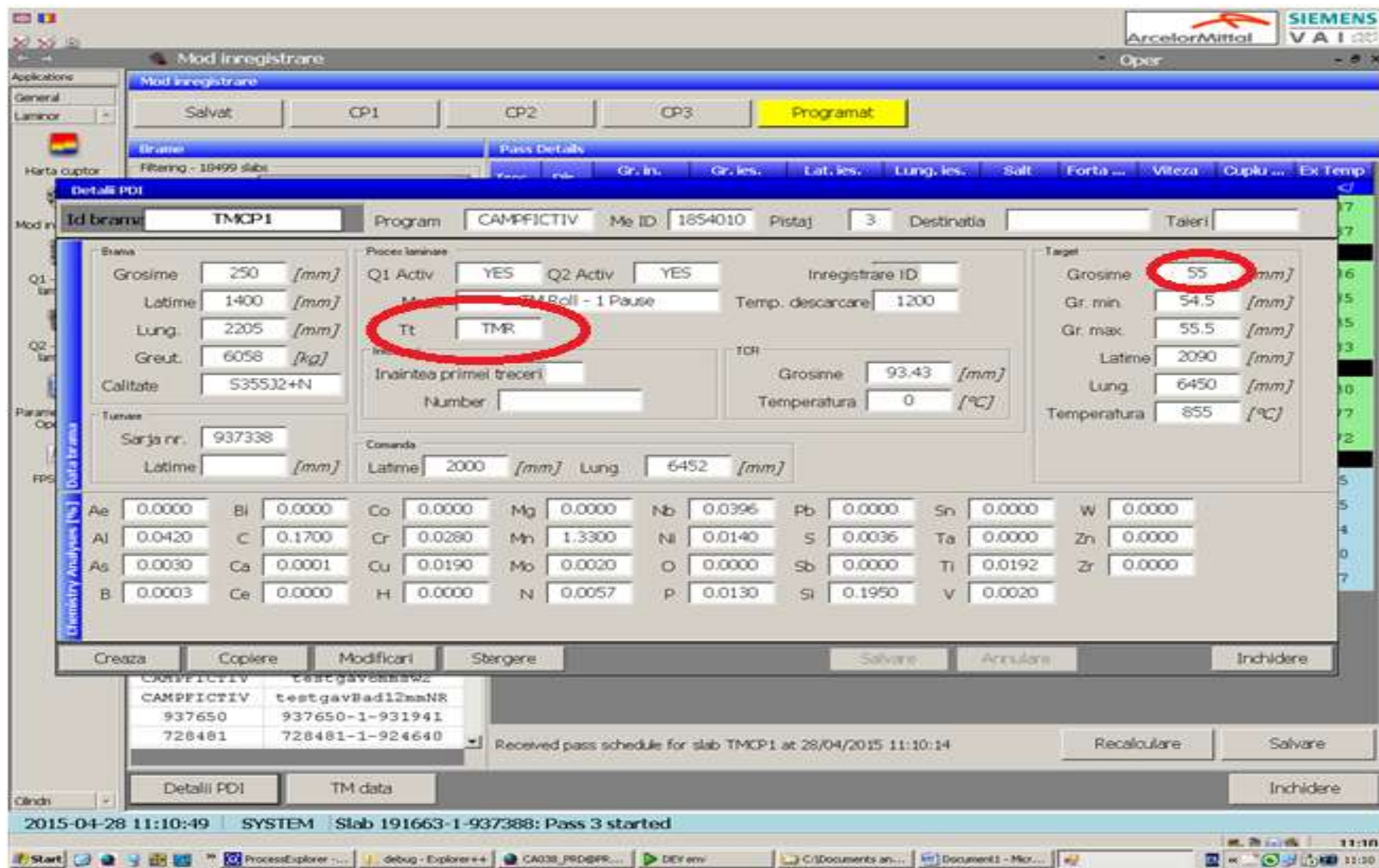


Figura 11 - Simulare rută metalurgică TMR

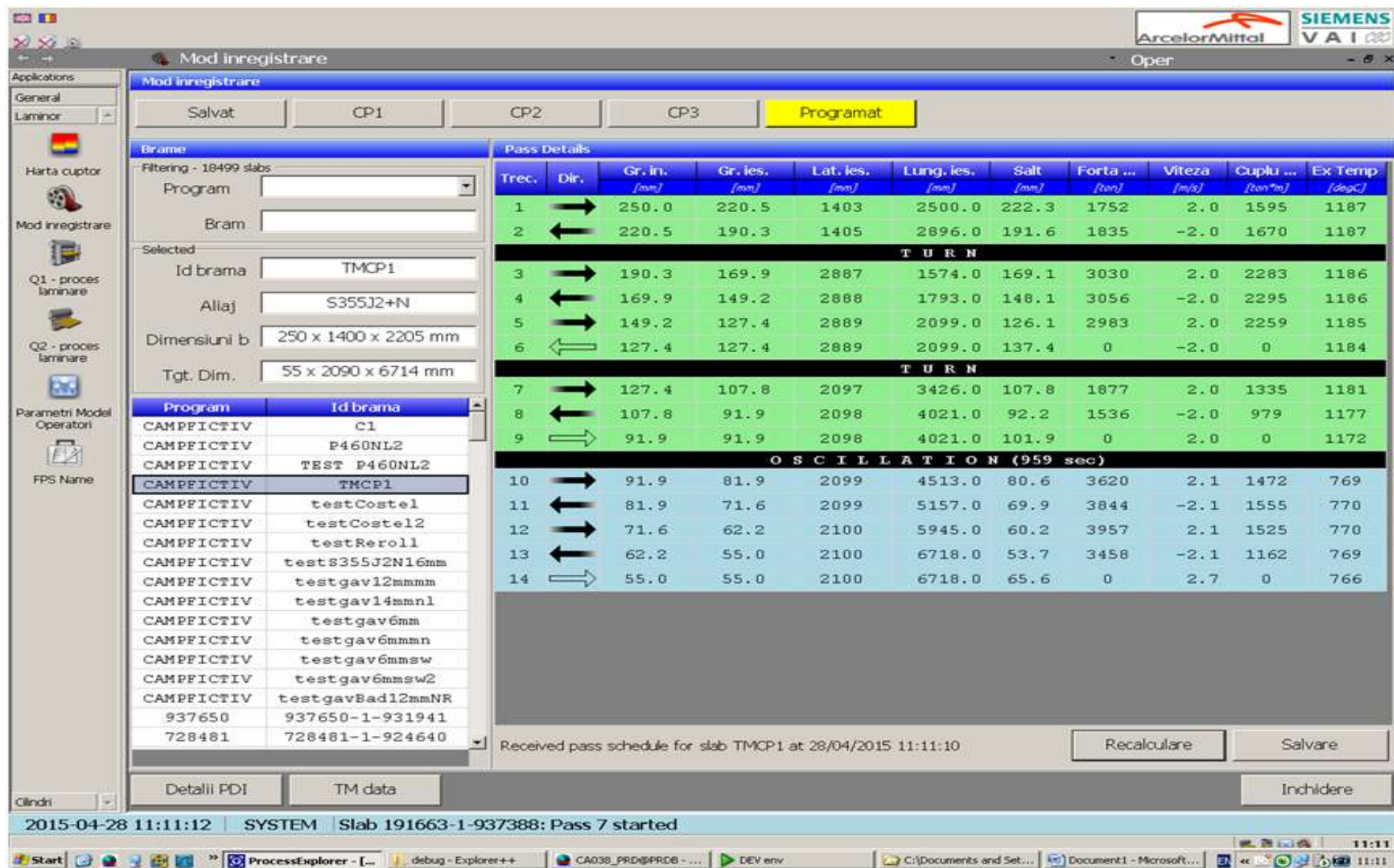


Figura 12 - Schemă laminare simulată

Laminarea în condiții industriale - Parametri de proces.

Laminarea controlată termomecanic este laminarea efectuată cu ajutorul modelării matematice **SIROLL** pe ruta metalurgică TMR descrisă în Cap.II.

$$\text{TSL} = \text{Ar}3 + 180/t \quad [^{\circ}\text{C}]$$

t = grosimea finală a tablei [mm] (2)

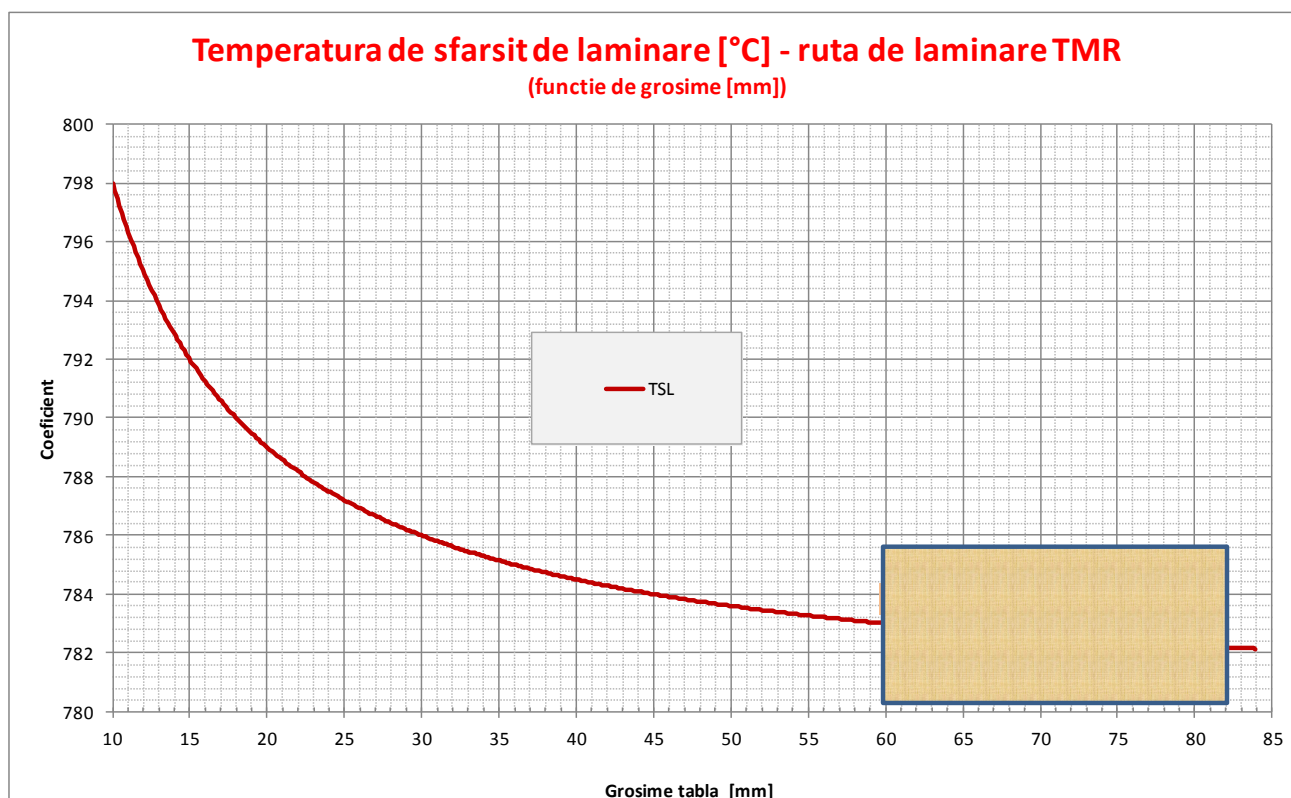


Figura 13 - TSL funcție de grosime.

Parametrii principali monitorizați: forța de laminare, cuplu de forță, temperaturile de început și sfârșit de laminare pe fiecare Secvența: egalizare, lățime semifabricat și finalizare grosime table sînt corespunzatori laminării termomecanice unde $\text{TSL} = \text{Ar}3 + 180/t$. Deformarea sub **Tnr** se produce la caja finisoare **Q2** după ce la caja degrositoare **Q1** se realizează lățimea semifabricatului și priza grosimii de transfer, Raportul maxim de deformare sub **Tnr** este dat de priza de grosime de transfer în acest caz de 92 mm $\approx 1,7$ coeficient de deformare reprezentând 60% din grosime de transfer.

Tabelul următor cuprinde datele de identificare pentru cele 4 brame cu compoziția chimică denumită **M1** din cadrul acestei laminări experimentale:

Table 10 - Date trasabilitate brame test M1

| Test | Program | bramă | șarjă | clasa de segregare amprenta Bauman | dimensiuni bramă [mm] | | | dimensiuni tabla [mm] | | |
|-----------|---------|-------|--------|--|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------------|----------------|-----------------|
| | | | | | lungime [mm] | lățime [mm] | grosime [mm] | lungime [mm] | lățime [mm] | grosime [mm] |
| M1 | 171120 | 1 | 935090 | 1 | 4355 | 1500 | 250 | 6000 | 2000 | 60 |
| | 171121 | 1 | 935090 | 1 | 2620 | 1500 | 250 | 6000 | 2000 | 70 |
| | 171121 | 2 | 935090 | 1 | 2620 | 1500 | 250 | 6000 | 2000 | 70 |
| | 171122 | 1 | 935090 | 1 | 2995 | 1500 | 250 | 6000 | 2000 | 80 |

Încălzirea bramelor s-a realizat în cuptorul cu propulsie CP1 cu temperatură țintă = 1250°C. Delta între temperatura țintă și cea realizată a fost de 30°C, ne semnificativă metalurgic pentru procesul de laminare la cald.

Principalii parametri ai procesului de laminare sînt redați în tabelul 5 următor:

Tabel 11 - Parametri proces table laminare cu grosimi 60, 70, 70 și 80 mm

| Test | Mod de laminare | presetari N SIROLL TÎL Q1 | TÎL Q1 realizat | presetari N SIROLL PGT | PGT realizat | presetari N SIROLL TÎL Q2 | TÎL Q2 realizat | TSL presetari N SIROLL Q2 | TSL realizat | durata producție | Observații |
|--------------|-----------------|---------------------------|-----------------|------------------------|--------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|------------------|---|
| | | [°C] | [°C] | [mm] | [mm] | [°C] | [°C] | [°C] | [°C] | [minute] | |
| M1-1 60mm | N2 | 1133 | 1133 | 173 | 173 | 857 | 860 | 783 | Eveniment de proces rebut | | Cuplul de forțe mare realizat a dus la un efect de schi ridicat rezultînd rebutarea bramei. |
| M1-3 70mm | N2 | 1148 | 1147 | 133 | 130.4 | 856 | 853 | 783 | Eveniment de proces rebut | | Cuplul de forțe mare realizat a dus la un efect de schi ridicat rezultînd rebutarea bramei. |
| M1-2 70mm | N2 | 1148 | 1147 | 133 | 130.4 | 856 | 853 | 783 | 781 | ≈18 | Valoarea cuplului de forță ridicată. Pentru evitarea efectului de schi datorat răcirii neuniforme cît și a opririi motoarelor. S-a redus valoarea cuplului de forță în mod manual |
| M1-4 80mm | N2 | 1153 | 1150 | 133 | 131.2 | 853 | 839 | 782 | 778 | ≈18 | Am utilizat valoarea redusă pentru cuplul de forță la 1500 tf/m ² |

Laminarea s-a derulat cu evenimente de proces.

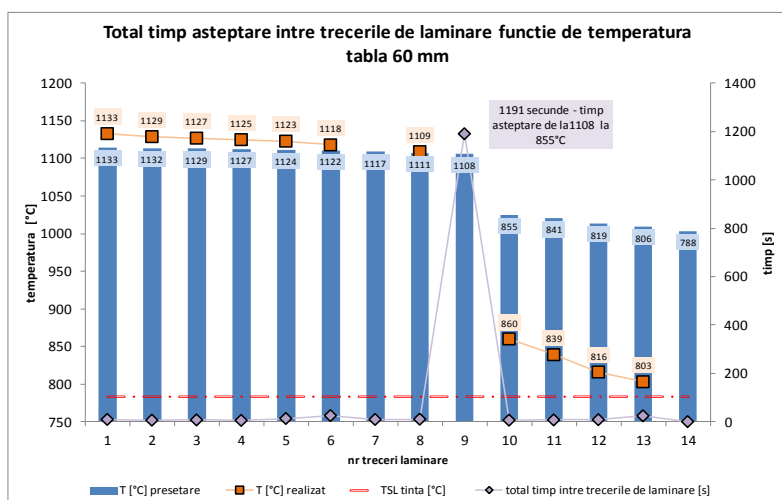


Figura 14 - Variația temperaturii în funcție de trecerile de laminare – tabla 60 mm

Timpul mare de așteptare coroborat cu cuplul de forță mare realizat a condus la răcirea neuniformă a tablei la grosimea realizată și a condus la rebutarea tablei datorită efectului de schi ce s-a produs și a ridicat capul tablei în sus orientînd-o pe cilindrul superior de lucru.

V.3.5. - Analize de laborator efectuate:

Amprenta Baumann

Clasa de segregare pentru brama 4 din șarjă 935090 de compoziție chimică **M1** este 1, o clasă de segregare foarte buna pentru acest tip de oțel și care nu necesita precautii speciale privind clasa de US .

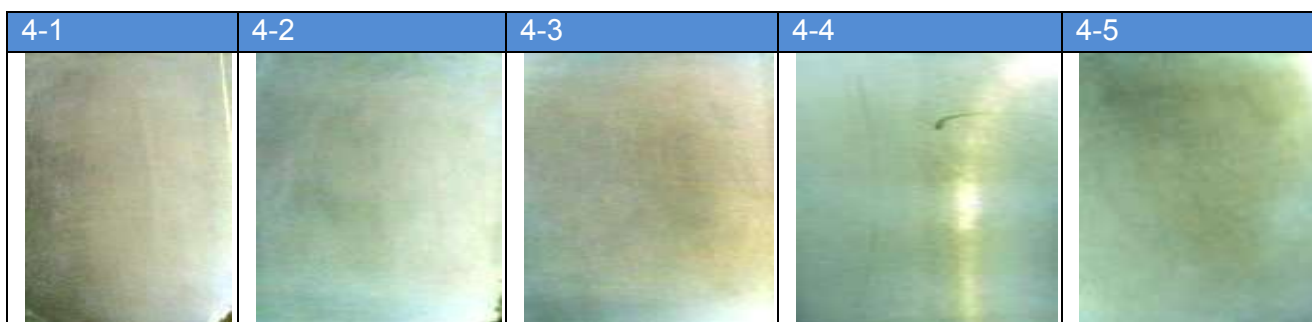


Figura 15 – Amprenta Baumann - șarja 935090 - M1

Segregația apare preponderent pe mijlocul secțiunii, nu se observă fisuri sau sufluri în masa bramei, desemelea nu apar fisuri în zona de răcire intensă a bramei (colt). Aceasta clasa de segregare nu impune măsuri privind mentenanța mașinii de turnat și ținînd cont de compoziția chimică a oțelului este în limite tehnice normale.

Tabel 12 – Analiză spectrală pe epruvete din cele 2 table de 70 și 80 mm

| Analiză spectrală | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------|-------|------|-------|--------|--------|-------|-------|------------------------|--------------|-----------------------|
| proba nr | șarjă nr | C | Mn | Și | S | P | Al | N | Σ (Ni+Cu+Cr) | Mo | Σ (Nb+Ti+V) |
| 3316 70mm | 935090 | 0,103 | 1,32 | 0,382 | 0,0014 | 0,0105 | 0,036 | 0,004 | 0,061 | 0,061 | 0,0646 |
| 3317 80mm | 935090 | 0,103 | 1,32 | 0,385 | 0,0014 | 0,0105 | 0,036 | 0,004 | 0,059 | 0,061 | 0,0650 |

Valorile din tabel sînt în limitele de minim și maxim pentru compoziția chimică **M1** și în acord cu cerintele euronormei EN 10025/4/2004.

Din cele trei cupoane de proba prelevata/tabla în stare laminată au fost efectuate următoarele teste:

- Tracțiune transversala – **Rm [MPa]**, **R_{p0.2} [MPa]**, **A [%]**,
- Test de reziliența transversala **KVt**:
- Încercarea de încovoiere la soc cu Ciocanul Pendul Charpy – [J].
- Test de rezistența la gatuire **Z [%]**

Tabel 13 - Date identificare probe

| Mod de laminare | proba nr | Program | tabla nr | șarjă nr | Grosime [mm] | Matrice | Marca de oțel analizata | Steel grade fit | Standard fit |
|---|----------|---------|----------|----------|--------------|---------|-------------------------|-----------------|--------------|
| laminare termomecanică în regim automat | 3316/F1 | 171121 | 1 | 935090 | 70 | M1 | S355M | S355ML | EN10025/4 |
| | 3316/F2 | 171121 | 1 | 935090 | 70 | M1 | S355M | S355ML | EN10025/4 |
| | 3317/F1 | 171122 | 1 | 935090 | 80 | M1 | S355M | S355ML | EN10025/4 |
| | 3317/F2 | 171122 | 1 | 935090 | 80 | M1 | S355M | S355ML | EN10025/4 |

Tabel 14– Valori rezultate – test tracțiune

| proba nr | Grosime [mm] | Standard fit | Rm min [MPa] | Rm min [MPa] | Rm rez. lab [MPa] | Rm max [MPa] | Rm max [MPa] | Rp0.2 min [MPa] | Rp0.2 min [MPa] | Rp0.2 rezultat [MPa] | A rez. lab [%] |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|
| | | | S355 M | S355M L | | S355 M | S355M L | S355 M | S355M L | | |
| 3316/F1 | 70 | EN10025/4 | 450 | 440 | 530 | 610 | 600 | 335 | 325 | 381 | 34,3 |
| 3316/F2 | 70 | EN10025/4 | 450 | 440 | 518 | 610 | 600 | 335 | 325 | 375 | 34,6 |
| 3317/F1 | 80 | EN10025/4 | 450 | 440 | 519 | 610 | 600 | 335 | 325 | 364 | 31,7 |
| 3317/F2 | 80 | EN10025/4 | 450 | 440 | 518 | 610 | 600 | 335 | 325 | 362 | 31,6 |

Tabel 15 - Tabel valori KV reziliențe longitudinale la -20 °C

| proba nr | Gros [mm] | Directie de testare proba | Temperatură de testare [°C] | KV1 [J] | KV2 [J] | KV3 [J] | KV medie [J] | KV min S355M |
|-------------------------------------|-----------|---------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|--------------|--------------|
| 3316/F1 1/4 din grosime | 70 | longitudinal | -20 | 238 | 240 | 229 | 235,7 | 40 |
| 3316/F1 1/2 în mijlocul grosimii | 70 | longitudinal | -20 | 110 | 98 | 107 | 105,0 | 40 |
| 3316/F2 2 mm adancime la față 2 | 70 | longitudinal | -20 | 192 | 202 | 184 | 192,7 | 40 |
| 3317/F1 1/4 din grosime | 80 | longitudinal | -20 | 210 | 224 | 218 | 217,3 | 40 |
| 3317/F2 1/2 în mijlocul grosimii | 80 | longitudinal | -20 | 58 | 59 | 42 | 53,0 | 40 |
| 3317/F2 2 mm adancime la față 2 | 80 | longitudinal | -20 | 220 | 219 | 208 | 215,7 | 40 |

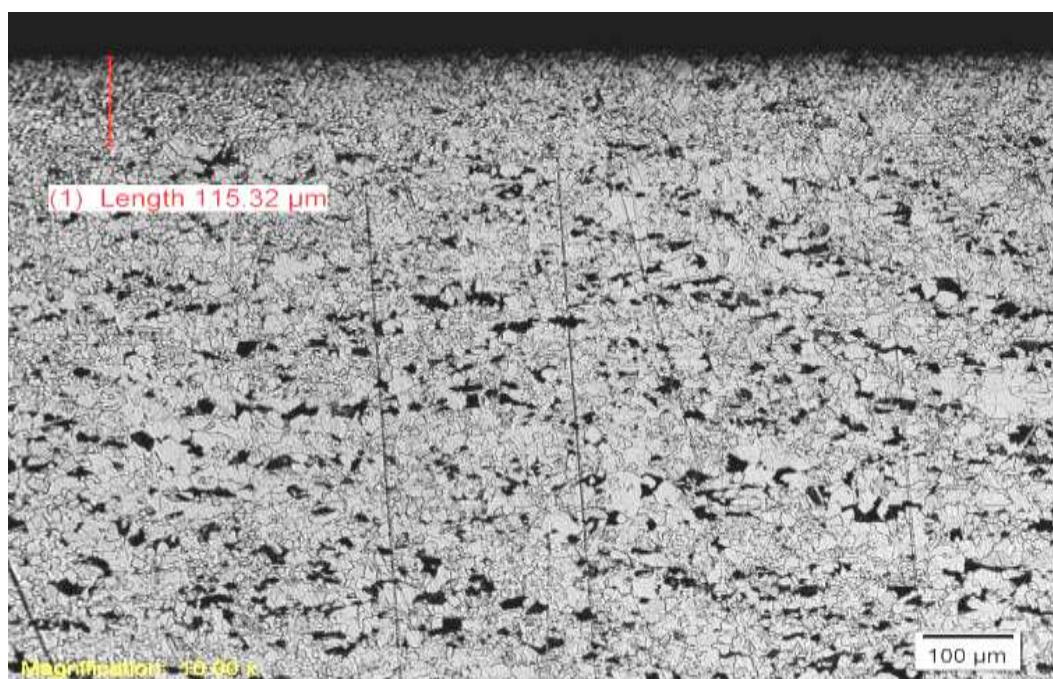
Tabel 16 - Valori test rezistența la stricțiune **Z** [%]

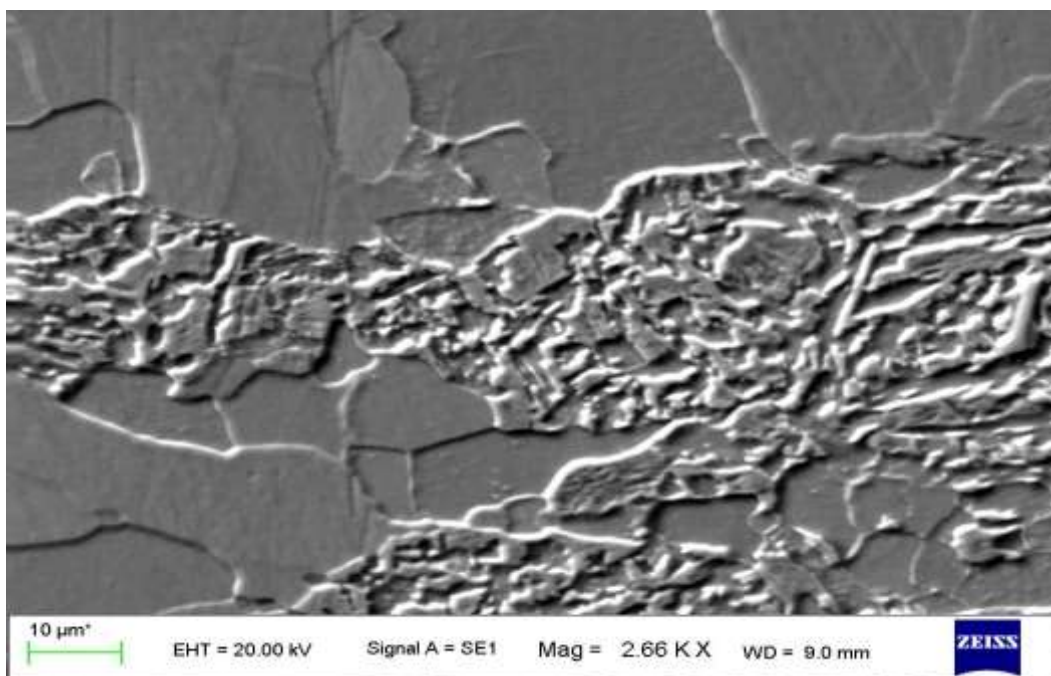
| proba nr | Grosime [mm] | Z min [%] | Z rezultate lab [%] |
|----------|--------------|-----------|---------------------|
| 3316/F1 | 70 | 35 | 39,3 |
| | | 35 | 38,2 |
| | | 35 | 39,1 |
| 3317/F2 | 80 | 35 | 36,9 |
| | | 35 | 38,2 |
| | | 35 | 38,3 |

V.3.6.a - Microstructura - proba 3316-1 – Tabla de 70 mm grosime.

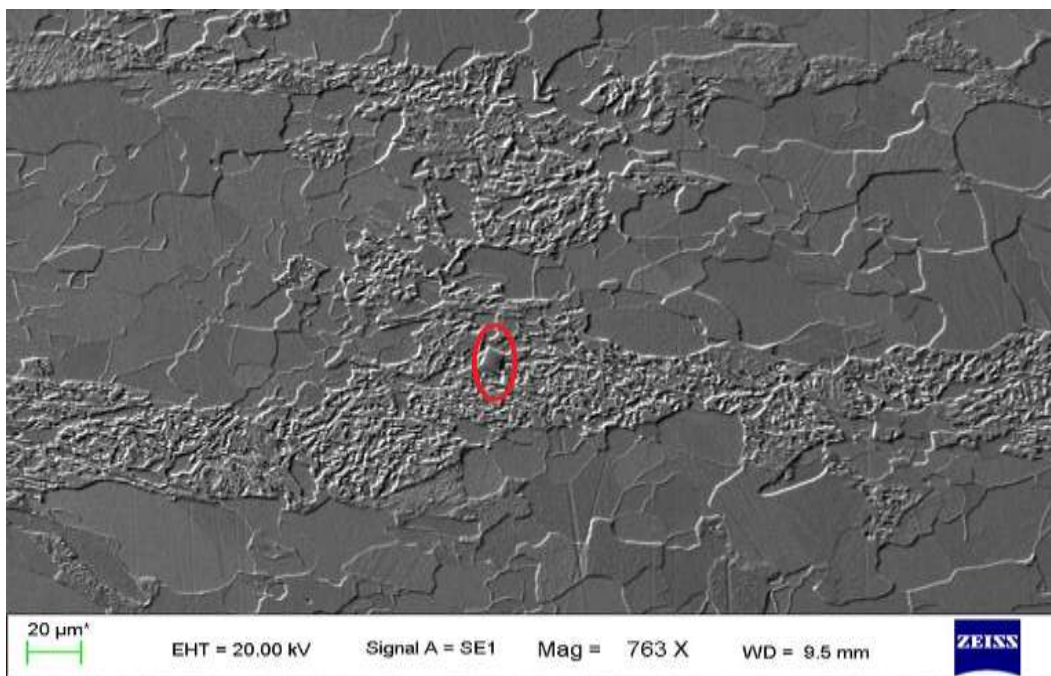
Tabel 17 - Date metalografie tabla 70 mm grosime

| Neatacat | | | Atac nital 2% | | |
|----------|---|------------------|----------------------------|--------|---------|
| | | | Față 1 | Mijloc | Față2 |
| Oxizi | - | Mărime graunte | 7,5-9,5 | 6.5-9 | 7,5-9,5 |
| Sulfuri | - | Structura | Ferito perlitică în sir A2 | | |
| silicați | - | Segregație | - | - | - |
| Nitruri | - | Strat decarburat | 115μm | | |

Figura 16 - **M1** 70 mm grosime - rezoluție 100 x la față 1
Structura ferito perlitică, margine cu decarburare parțială

Figura 17 - SEM - **M1** 70 mm

Insule de bainită în microstructură. Laminarea termomecanică cu TSL la Ar3 și combinată cu perdeaua de apă de la instalația de racire a cilindrilor de lucru au fost principalii factori care au condus la precipitarea elementului de aliere Molibden care a favorizat apariția acestor structuri de bainită superioară.

Figura 18 - SEM - **M1** 70 mm

Carbonitruri în microstructura oțelului.
Precipitate de Nb și Ti în formă tetragonală cu influență pozitivă în rezistența oțelului.

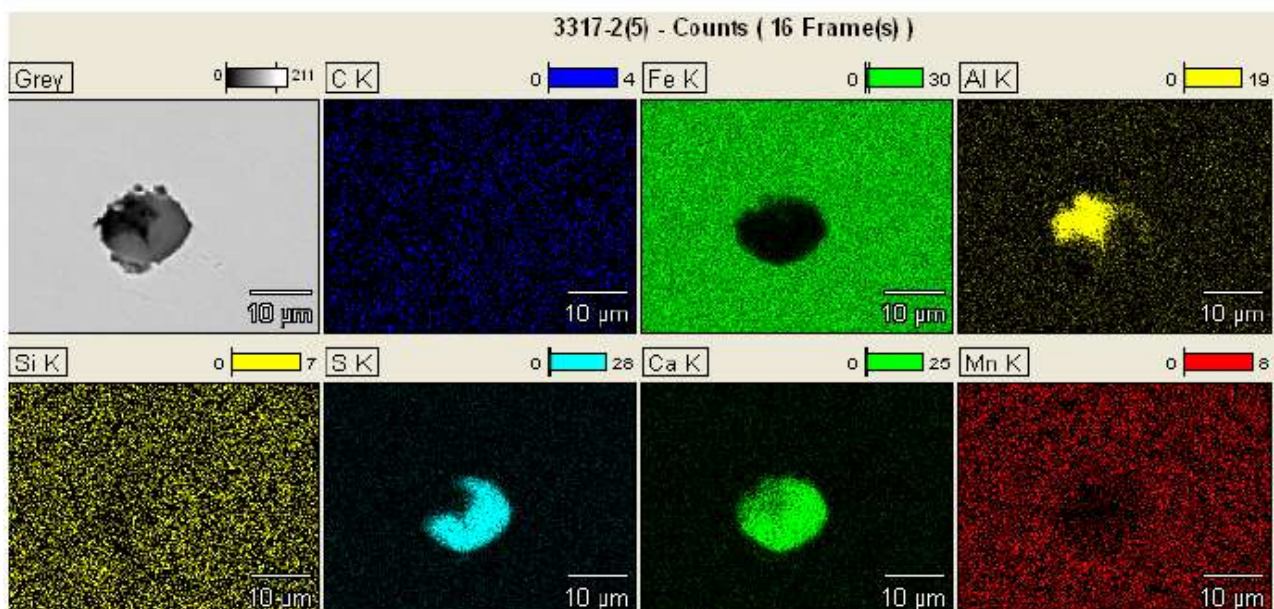


Figura 19 - SEM - **M1** 70 mm harta incluziuni
Sulfuri de Ca și Mn

V.3.8.a - Influență laminării Test M1 – 70-80 mm

- **R_m** valori pe mijlocul intervalului de minim-maxim 440-600 **MPa** pentru ambele marci de oțel **S355M/ML** cu o medie de 520 **MPa**
- **R_{p0.2}** valori cu o medie d 40 **MPa** peste limita minimă admisă în domeniu 335-325 **MPa** pentru ambele marci de oțel **S355M/ML**
- **M1_70 mm: KV** la -20°C: valori extrem de ridicate la ¼ din grosimea tablei, o medie de 230 J, la 2 mm adancime la față inferioară a table cu valori de 190 J și în mijlocul tablei cu o medie valorica de 100 J.
- **M1_70 mm: KV** la -40°C: valori bune la ¼ din grosimea tablei, o medie ≈ 170 J și la 2 mm adancime la față inferioară a table cu valori de 110 J, valori scăzute în mijlocul tablei, 2 din cele trei epruvete inregistrand valori mici sub limita minimă admisibilă de 31J
- **M1_80 mm: KV** la -20°C: valori extrem de ridicate la ¼ din grosimea tablei și la 2 mm adancime la față inferioară a tablei cu o medie ≈ 220 J; în mijlocul tablei cu o medie valorica de 53 J
- **M1_80 mm: KV** la -40°C: : valori ridicate la ¼ din grosimea tablei și la 2 mm adancime la față inferioară a tablei cu o medie ≈ 120 J; **valori foarte scăzute în mijlocul tablei, toate cele trei epruvete inregistrand valori foarte mici sub limita minimă admisibilă de 31J cu o medie ≈ 8,3 J**

V.3.9.a - Sumar concluzii:

- Temperatură de sfârșit de laminare apropiată de **Ar₃** influenteaza major caracteristicile mecanice, **R_m**, **R_{p0.2}** și valorile **KV**.
- Datorită valorilor caracteristicilor mecanice pe care le-am obținut în stare laminată, compoziția chimică **M1** poate fi utilizată pentru producerea mărcii comerciale de oțel **S355** cu stare de livrare **M**, conform reglementarii din norma europeana EN10025/3/2004.
- În ceea ce priveste dubla conditie **M** și **ML** pentru compoziția chimică cu principalele elemente de aliere **NbMoTi** se recomanda a fi utilizată în domeniul de grosimi 50.01÷80 mm doar pentru prima conditie, respectiv marca comerciala **S355M**.

- Datorită efectului de schi observat în timpul cercetării de laminare experimentale se deschid noi oportunitati privind optimizarea rutei de laminare în special adresata domeniului de grosimi 50.01÷80 mm.

Rezultatele pe care le-am obținut în urma laminării termomecanice experimentale în condiții industriale fără utilizarea răcirii accelerate pentru compoziția chimică **M1_NbMoTi** pe grosimile de 70 și 80 mm permit deschiderea fezabilitatii pentru marca de oțel **S355M** cu acest mod clasic de laminare pentru grosimile laminate. Deși rezultatele de laborator corelate cu impunerile din euronorma EN 10025/4/2004 pot califica produsul și pentru marca de oțel cu denumirea comercială **S355ML**, datorită deficiențelor apărute în procesul de laminare se impune optimizarea schemei de laminare, respectiv o nouă abordare și o nouă rută de laminare pentru tablele din domeniul de grosimi 50÷80 mm.

V.4 - Optimizare modelare matematică și introducerea modificărilor în software SIROLL:

V.4.1 Optimizare de cod programare (limbaj programare C++)

Cercetările experimentale din acest capitol urmăresc dezvoltarea unei noi rute de laminare ce se adresează tablelor din oțel **S355ML** în vederea creșterii fezabilitatii pe domeniul de grosimi de 50÷80 mm în vederea obținerii de avantaj maxim al capacitatii actuale de turnare brame din AMG pentru grosime maximă de 250 mm.

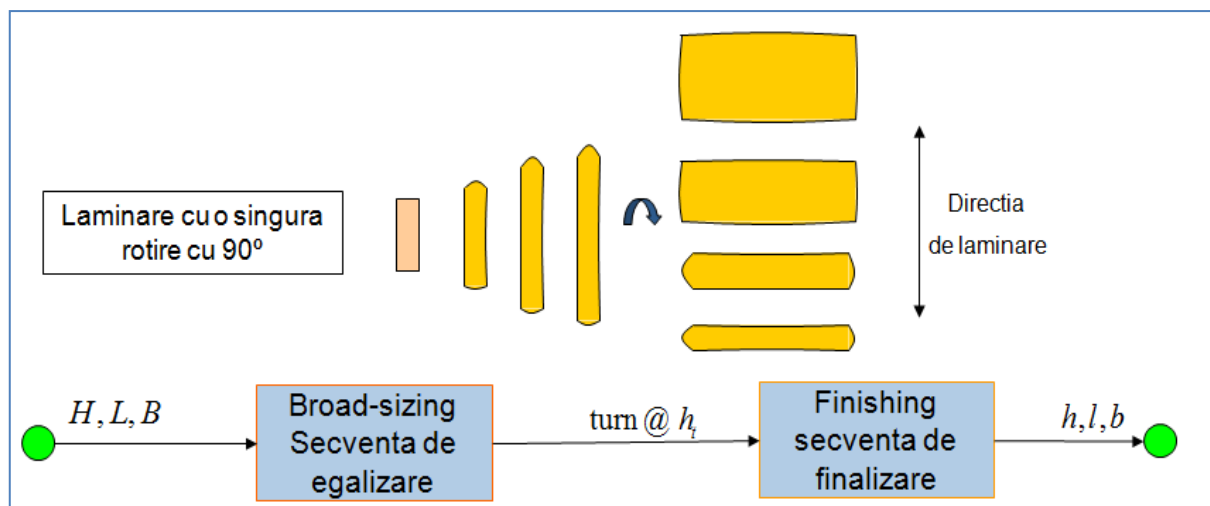
Scopul principal îl reprezintă un grad de deformare sever sub temperatură de recristalizare. Acesta se poate obține modificând valoarea **PGT**, dar limitările **N2** fac extrem de dificilă această abordare, astfel încât pentru realizarea acestui deziderat am modificat partea de cod sursă a **N2** astfel încât după efectuarea secvenței de obținere a lățimii produsul laminat intra în așteptare pînă la atingerea valorii temperaturii **T_{nr}** sub temperatură de recristalizare în domeniul austenitic. Calculul se efectuează conform Boratto et al. descrisă în STEEL FORMING AND HEAT TREATING HANDBOOK de Antonio Augusto Gorni, funcție de valoarea Nb după cum urmează:

$$T_{nr} = 887 + 464 C + (6445 Nb - 644 \sqrt{Nb}) + (732 V - 230 \sqrt{V}) + 890 Ti + 363 Al - 357 Si$$

Restricția impusă a fost valoarea maximă de **930°C** sub care poate reincepe laminarea în cazul în care datorită conținutului de Nb valoarea **T_{nr}** este mai mare.. Aceasta valoare a fost dedusă statistic la care a fost adăugat un coeficient termic de corecție = 1,1. În acest mod în funcție de strategia de laminare din **N2** (o singură rotire, două rotiri sau fără rotire în caja degrositoare **Q1**) pot apărea două puncte de răcire - primul în așteptare atingerii valorii **T_{nr}** sau a valorii de **930°C**, iar

al doilea după realizarea **PGT** conform ecuației 18 (Cap. III) $Gt = 16.396 * h^{0.454}$

În vederea obținerii unei grosimi cât mai mare în raportul de deformare aflat sub temperatură de recristalizare a fost impusă în **N2** laminarea cu o singură rotire (cazul 2 descris în Cap. III - fig. 42). Modificările pe care le-am adus în codul sursă al programului **SIROLL** scrise în limbaj de programare C++ se regăsesc în Anexa 3 la sfârșitul acestei teze.



Deosebirea semnificativa între rută metalurgică de laminare N și actuală rută de laminare CNR este faptul ca după efectuarea trecerilor de laminare în vederea obținerii lățimii țintă din PDI se așteaptă în oscilare atingerea temperaturii calculate T_{nr} , care conform regulii restrictive nu poate fi mai mare de 930°C. Pentru rută CNR funcție de procesele precalc / recalc / grosime țintă, modelarea SIROLL poate sa mai calculeze un nou timp de oscilare în vederea atingerii TSL impus conform ecuatiilor de mai jos:

$$TSL = Ac_3 + 720/t \quad [^{\circ}C] \quad (1)$$

$$t = \text{grosimea finală a tablei} \quad [mm] \quad (2)$$

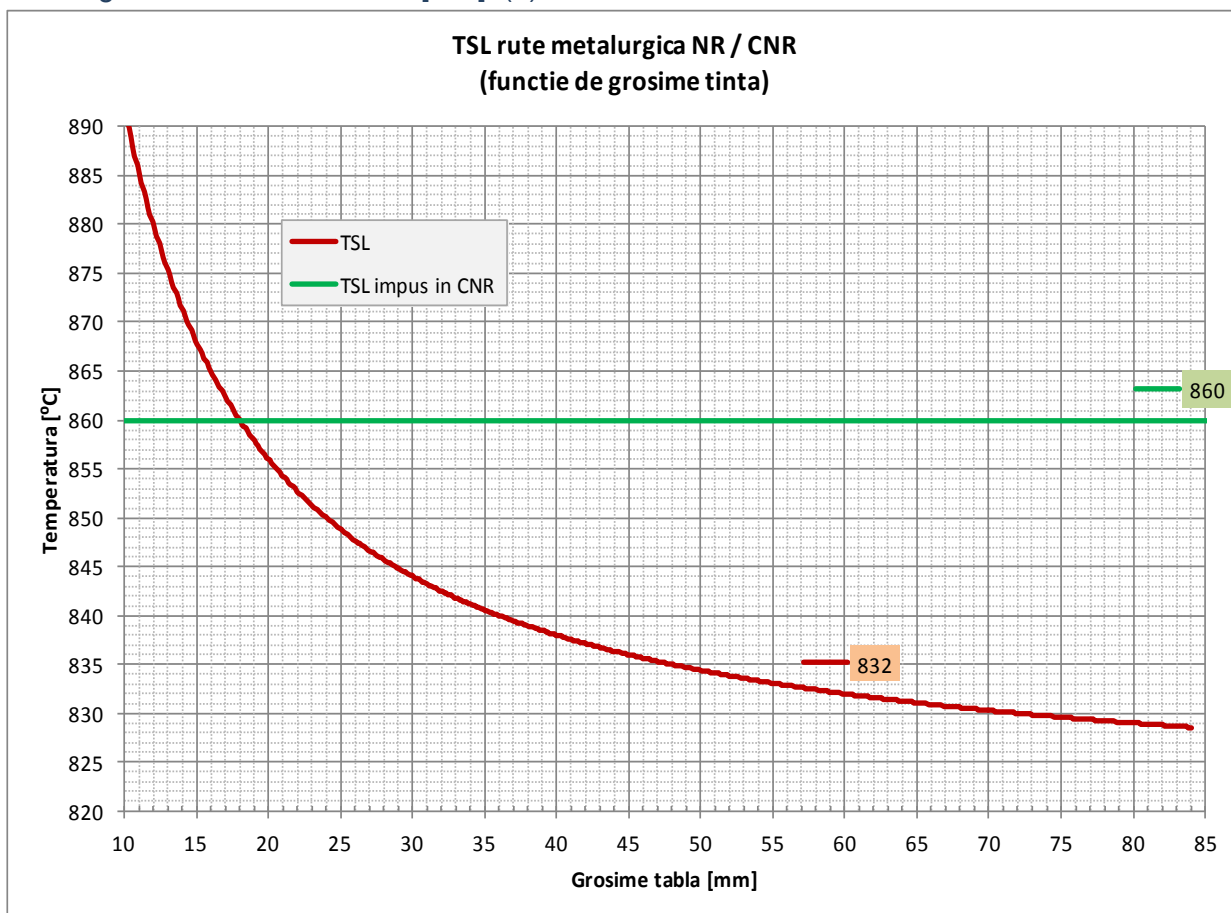


Figura 105 - Calcul al temperaturii de sfîrșit de laminare funcție de grosimea țintă a tablelor laminate

V.4.2 - Simulare laminare cu soft SIROLL

Laminarea a fost realizată pe cajele quarto reversibile din LTG2 în regim automat cu modelare de proces matematică asistată de soft **SIROLL** - (**N2_AGC**) cu următorii parametri:

- deschidere caja în regim impus;
- controlare grosime în regim impus cu ajutorul cilindrilor **AGC**;
- precalcare, recalculare schema laminare / pe trecere de deformare;
- precalcare / recalculare **TSL** (temperatură sfârșit de laminare) 855°C;
- precalcare / recalculare forța deformare;
- precalcare / recalculare cuplu forța;
- viteza cale cu role pentru prinderea semifabricatului la laminare. PGT precalculat de 109 mm

The screenshot shows the SIROLL software interface for 'Mod Inregistrare'. The main window displays the following parameters:

- Id brama:** 195273-1-915225
- Program:** 195273
- Me ID:** 1862684
- Pistaj:** 1
- Destinatia:** [Dropdown]
- Talari:** [Dropdown]

Target Parameters:

- Grosime: 60 [mm]
- Gr. min.: 59.7 [mm]
- Gr. max.: 60.6 [mm]
- Latime: 3100 [mm]
- Lung.: 10600 [mm]
- Temperatura: 855 [°C]

Chemistry Analyses [%] Table:

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|
| Ae | 0.0000 | Bi | 0.0000 | Co | 0.0000 | Mg | 0.0000 | Nb | 0.0246 | Pb | 0.0000 | Sn | 0.0000 | W | 0.0000 |
| Al | 0.0400 | C | 0.0950 | Cr | 0.0279 | Mn | 1.4500 | Ni | 0.2730 | S | 0.0018 | Ta | 0.0000 | Zn | 0.0000 |
| As | 0.0021 | Ca | 0.0007 | Cu | 0.2700 | Mo | 0.0700 | O | 0.0000 | Sb | 0.0000 | Ti | 0.0034 | Zr | 0.0000 |
| B | 0.0003 | Ce | 0.0000 | H | 0.0000 | N | 0.0050 | P | 0.0103 | Si | 0.4620 | V | 0.0020 | | |

At the bottom of the window, a message states: "Received pass schedule for slab 195273-1-915225 at 01/07/2015 11:46:13". The system status bar shows the date and time: "2015-07-01 11:40:23 | SYSTEM | Delay started at 2015/07/01 11:30:23 in section RM+FM".

Figura 20 - Simulare schema laminare – rută metalurgică N 60mm grosime
PGT calculat de 109 mm insemnind un raport de deformare de 82 % pentru grosimea țintă de 60 mm.

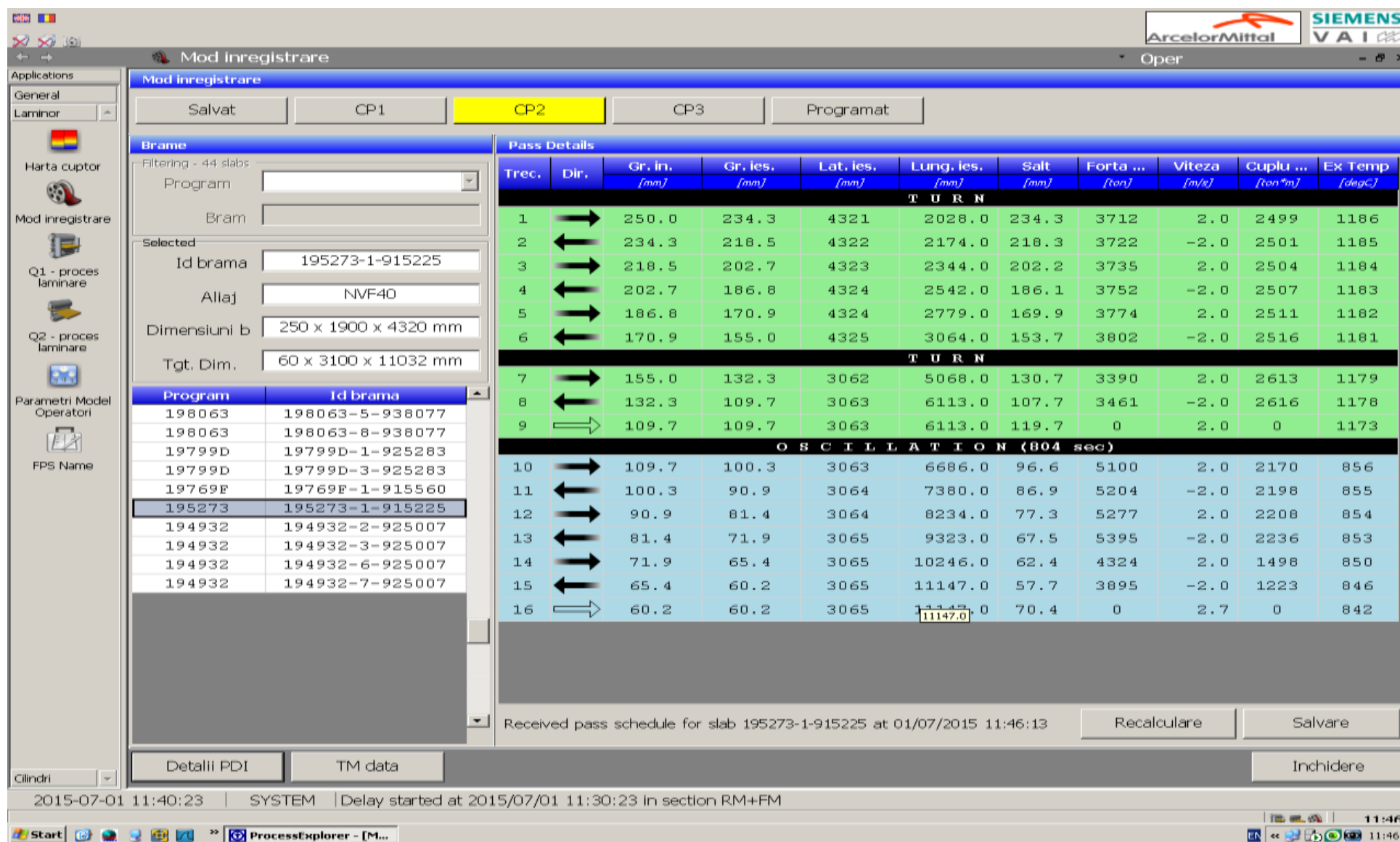


Figura 21- Schema laminare simulata - 60 mm grosime

Datorită lungimii de 6,1 metri a tablei înainte de intrarea în laminare la Q2 timpul de oscilare pentru atingere TÎL de 804 secunde nu prezintă un ric major de producere a efectului de schi.

The screenshot displays the 'Mod inregistrare' (Registration Mode) window in a Siemens software application. The interface is divided into several sections:

- Top Bar:** Contains the application name 'Mod inregistrare' and a 'Oper' button.
- Buttons:** A row of buttons includes 'Salvat', 'CP1', 'CP2' (highlighted in yellow), 'CP3', and 'Programat'.
- Pass Details:** A section with a table header including 'Gr. in.', 'Gr. les.', 'Lat. les.', 'Lung. les.', 'Salt', 'Forta ...', 'Viteza', 'Cuplu ...', and 'Ex Temp'.
- Detalii PDI (PDI Details):** A large central panel with multiple input fields:
 - General:** 'Id brama' (195273-1-915225), 'Program' (195273), 'Me ID' (1862684), 'Pistaj' (1), 'Destinatia', and 'Taleri'.
 - Brama (Slab):** 'Grosime' (250 [mm]), 'Latime' (1900 [mm]), 'Lung.' (4320 [mm]), 'Greut.' (16108 [kg]), and 'Calitate' (NVF40).
 - Proces laminare (Laminating Process):** 'Q1 Activ' (YES), 'Q2 Activ' (YES), 'Inregistrare ID', 'Mode' (Normal Rolling), 'Temp. descarcare' (1200), and 'Tt' (COSTEL).
 - Intoareri (Returns):** 'Inaintea primel' and 'Number'.
 - TCR (Temperature Control):** 'Grosime' (109.68 [mm]) and 'Temperatura' (0 [°C]).
 - Comanda (Command):** 'Latime' (3000 [mm]) and 'Lung.' (10602 [mm]).
 - Target (Target Values):** 'Grosime' (60 [mm]), 'Gr. min.' (59.7 [mm]), 'Gr. max.' (60.6 [mm]), 'Latime' (3100 [mm]), 'Lung.' (10600 [mm]), and 'Temperatura' (855 [°C]).
 - Turnare (Casting):** 'Sarja nr.' (915225) and 'Latime'.
- Chemistry Analyses [%]:** A table showing the composition of the material.

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|
| Ae | 0.0000 | Bi | 0.0000 | Co | 0.0000 | Mg | 0.0000 | Nb | 0.0246 | Pb | 0.0000 | Sn | 0.0000 | W | 0.0000 |
| Al | 0.0400 | C | 0.0950 | Cr | 0.0279 | Mn | 1.4500 | Ni | 0.2730 | S | 0.0018 | Ta | 0.0000 | Zn | 0.0000 |
| As | 0.0021 | Ca | 0.0007 | Cu | 0.2700 | Mo | 0.0700 | O | 0.0000 | Sb | 0.0000 | Ti | 0.0034 | Zr | 0.0000 |
| B | 0.0003 | Ce | 0.0000 | H | 0.0000 | N | 0.0050 | P | 0.0103 | Si | 0.4620 | V | 0.0020 | | |
- Bottom Bar:** Contains buttons for 'Creaza', 'Copiere', 'Modificari', 'Stergere', 'Salvare', 'Anulare', and 'Inchidere'. Below these, a message reads: 'Received pass schedule for slab 195273-1-915225 at 01/07/2015 11:46:13'. Further buttons include 'Recalculare', 'Salvare', and 'Inchidere'.
- Status Bar:** Shows the date and time '2015-07-01 11:40:23', the system name 'SYSTEM', and a note: 'Delay started at 2015/07/01 11:30:23 in section RM+FM'.

Figura 22 - Simulare schema laminare – rută optimizata CNR - 60 mm grosime

TSL țintă ramîne identic cu ruta precedent, se va modifica timpul de oscilare obținînd un PGT virtual la Q1 înainte de TÎL și PGT la Q2.

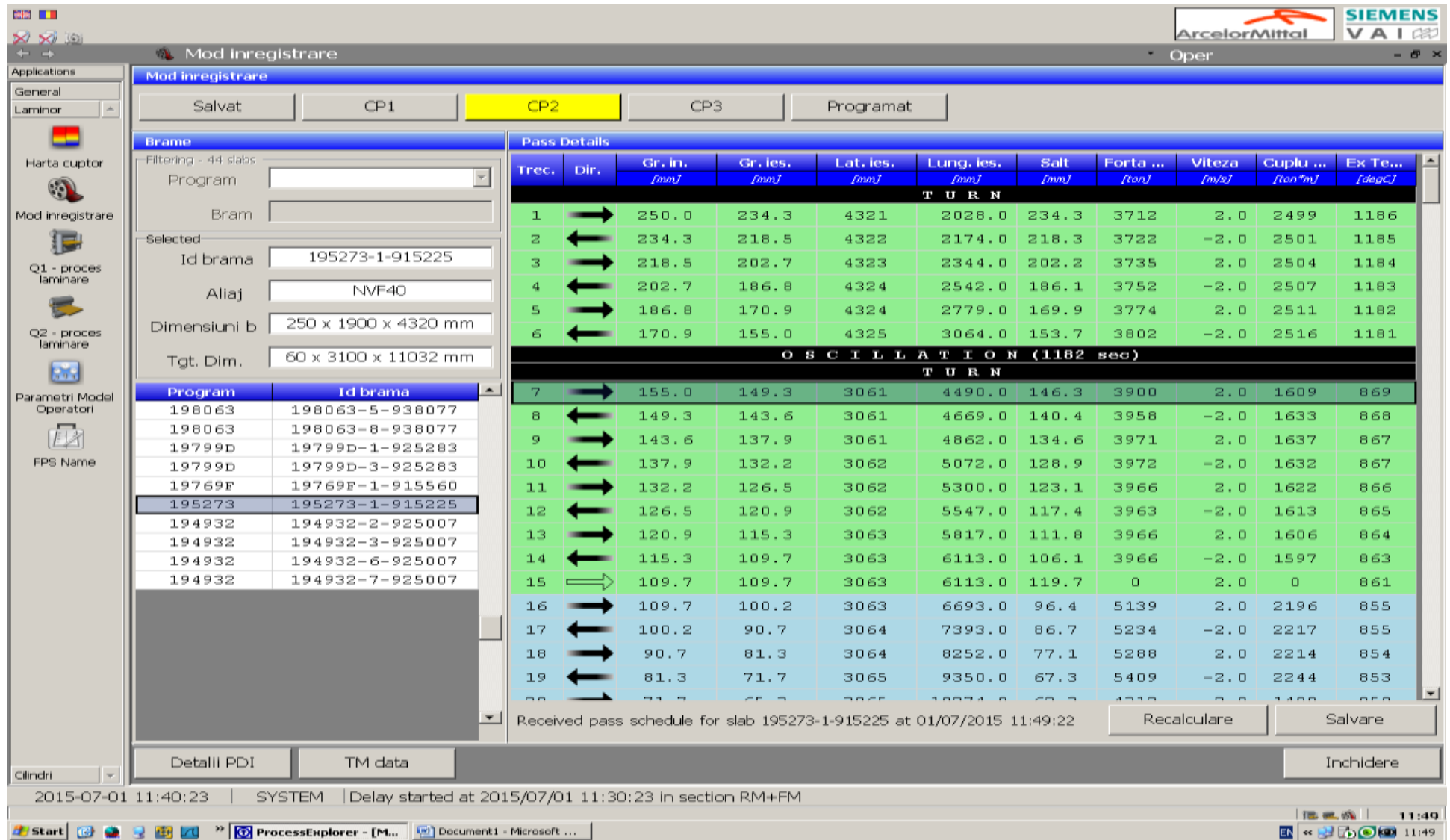


Figura 23 - Schema laminare simulată pe ruta metalurgică optimizată CNR

Mentținerea în oscilare a tablei după realizarea lățimii pînă la temperature de 930°C conduce la un PGT total de 155 mm grosime, în acest fel realizînd un raport total de deformare de 158 % pentru grosimea țintă de 60 mm.

Tabel 18 - Compoziție chimică **N2** - MnSiCuNiMoNbTi

| Rută oțelarie pentru matricea de compoziție chimică N2 : D_K_LF_RH_TC | | | | | | | | |
|--|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---|--|------------------|-----------------------------------|
| C min [%] | C max [%] | Mn min [%] | Mn max [%] | Și min [%] | Și max [%] | S max [%] | P max [%] | Al _{total} max [%] |
| 0,09 | 0,115 | 1,4 | 1,55 | 0,35 | 0,50 | 0,003 | 0,015 | 0,06 |
| N max [%] | N target [%] | Σ (Ni+Cu+Cr) [%] | Mo min [%] | Mo max [%] | Σ_{\max} (Nb+V) [%] | Σ_{\max} (Nb+Ti+V) [%] | Ca max [%] | H2 max [%] |
| 0,007 | 0,006 | 0,70 | 0,020 | 0,070 | 0,038 | 0,048 | 0,0015 | 0,0003 |

Laminarea în condiții industriale

Tabelul 5 cuprinde datele de identificare pentru cele 2 brame din șarjă cu matricea **N2** incluse în cercetare laminate pe cele 2 rute **N** și **CNR**

Table 19 - Trasabilitate program laminare

| Test | Trasabilitate | | | | dimensiuni bramă [mm] | | | dimensiuni tabla [mm] | | |
|-----------|---------------------------------------|-------|--------|--|-----------------------|----------------|-----------------|-----------------------|----------------|-----------------|
| | Program | bramă | șarjă | clasa de segregatie amprenta Bauman | lungime [mm] | lățime [mm] | grosime [mm] | lungime [mm] | lățime [mm] | grosime [mm] |
| N2 | 195273 Pistaj 1 CNR test | 1 | 915225 | 1 | 4320 | 1900 | 250 | 11000 | 3100 | 60 |
| | 195273 Pistaj 2 N test | 1 | 915225 | 1 | 4320 | 1900 | 250 | 11000 | 3100 | 60 |

Parametri de proces

Principalii parametri ai procesului de laminare pentru matricile **N2-CNR** și **N2-N** sînt redați în tabelul urmator:

Tabel 20 - Parametri laminare **N2** functie de rutele metalurgice

| Test | Mod de laminare | Presetari N2 TÎL Q1 [°C] | TÎL Q1 [°C] | presetari N2 PGT [mm] | PGT exit thick [mm] | presetari N2 TÎL Q2 [°C] | TÎL Q2 [°C] | TSL presetari N2 Q2 [°C] | TSL realizat Q2 [°C] | Total temp oscilare [s] | Observații |
|------------------------|-----------------|---|-----------------------|--|----------------------------------|---|-----------------------|---|---|----------------------------------|---|
| N2-N 60 mm | N2 | 1148 | 1140 | 110 | 110 | 857 | 860 | 855 | 844 | 545 | |
| N2-CNR 60 mm | | 1147 | 1142 | 148 | 110 | 900 | 891 | 855 | 856 | 656 | La grosimea de 148 mm semifabricătul a intrat în oscilare timp de 656 de secunde pînă la temperaturi de 928°C |

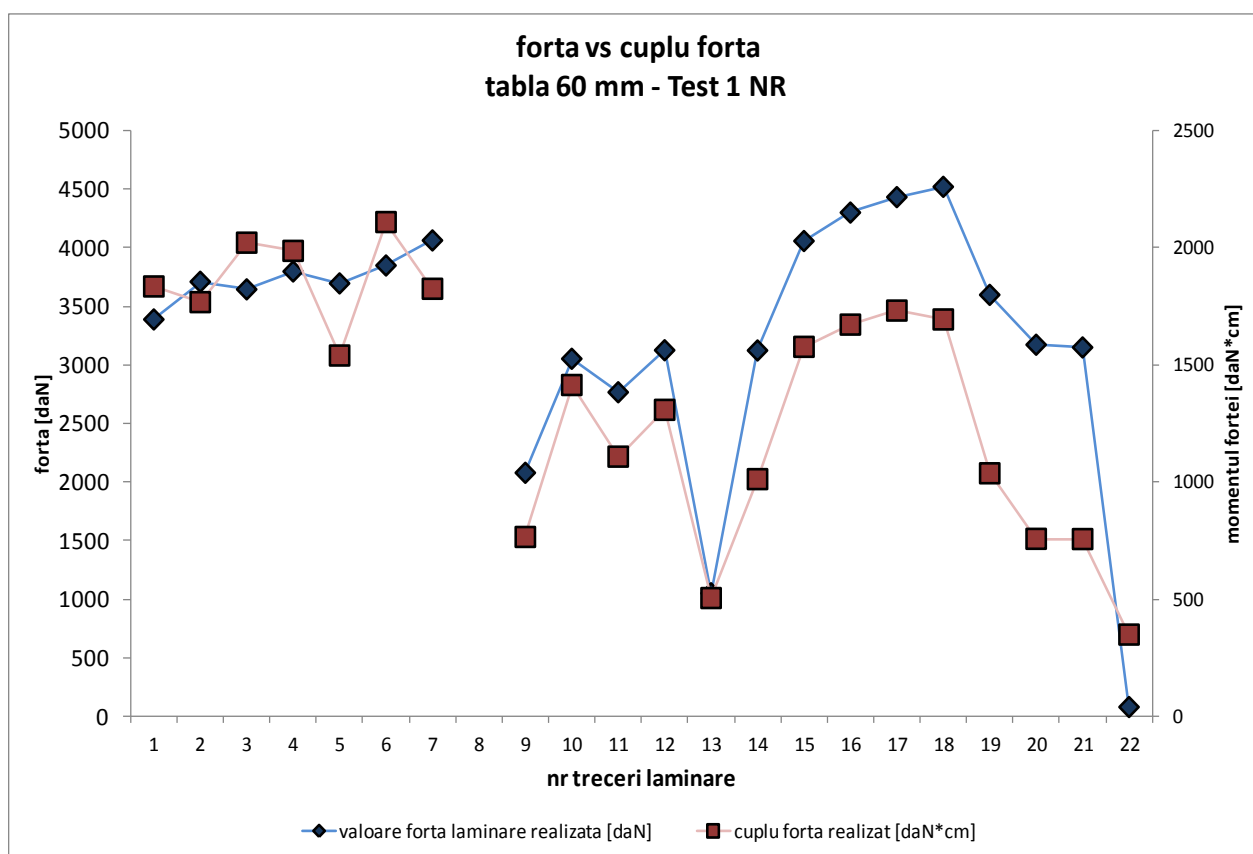
Laminarea am derulat-o pe rutele **N** (laminare normalizantă controlată) și **CNR**. Au fost laminate cite o bramă cu dimensiunile conform tabelului 59 pe fiecare rută. Încălzirea bramelor a fost

efectuată în CP1 cu temperatură țintă de 1200°C și am înregistrat în medie 1180°C la descărcarea bramelor din cuptor. Diferența între temperature realizată în CP1 și TÎL Q1 este dată de răcirea produsă în cutia de deșunderizare la o presiune de 170 bari.

Parametrii de laminare realizați sînt în marja de eroare de $\pm 3\%$ pentru **PGT** (priza grosime transfer între caja degrositoare **Q1** și cea finisoare **Q2**) și **TSL** (temperaturi sfîrșit de laminare). Mărimea de graunte țintită datorită temperaturii de sfîrșit de laminare apropiată de **Ar3** este de punctaj 9÷10 în stare laminată.

Parametrii principal de proces sînt corelați grafic funcție de numarul de treceri de laminare pentru fiecare test în parte după cum urmează:

- Forța laminare realizată comparativ cu presetarea Nivel 2.
- Forța laminare comparativ de cuplu de forța realizată.
- Evoluție temperaturi realizate comparativ cu presetare Nivel 2.
- Timpul de oscilare efectuat înaintea etapei de laminare în domeniul austenitic sub **T_{nr}**.
- Grosime realizată relaționată cu presetarea de Nivel 2.



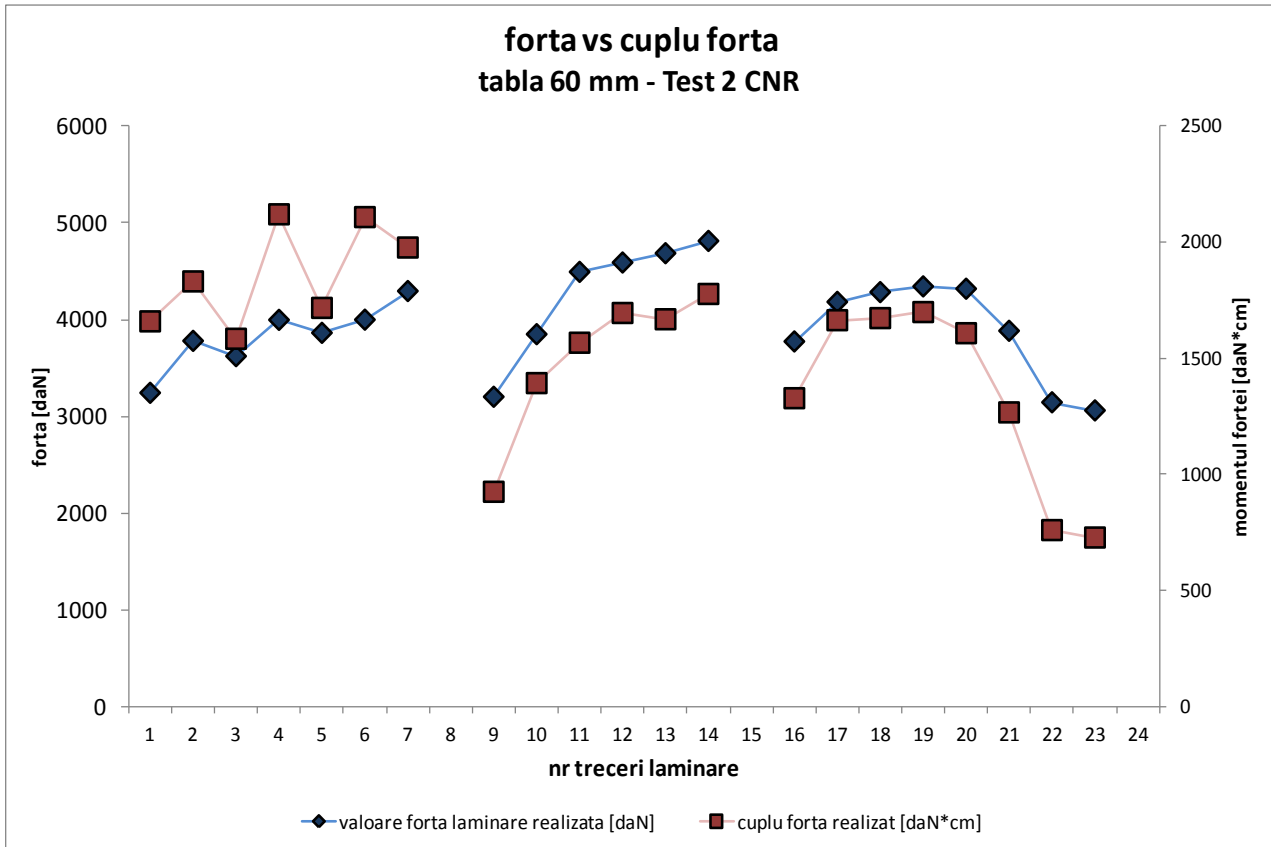


Figura 24 - variația forței și a cuplului de forța tabla 60 mm grosime pe ruta CNR

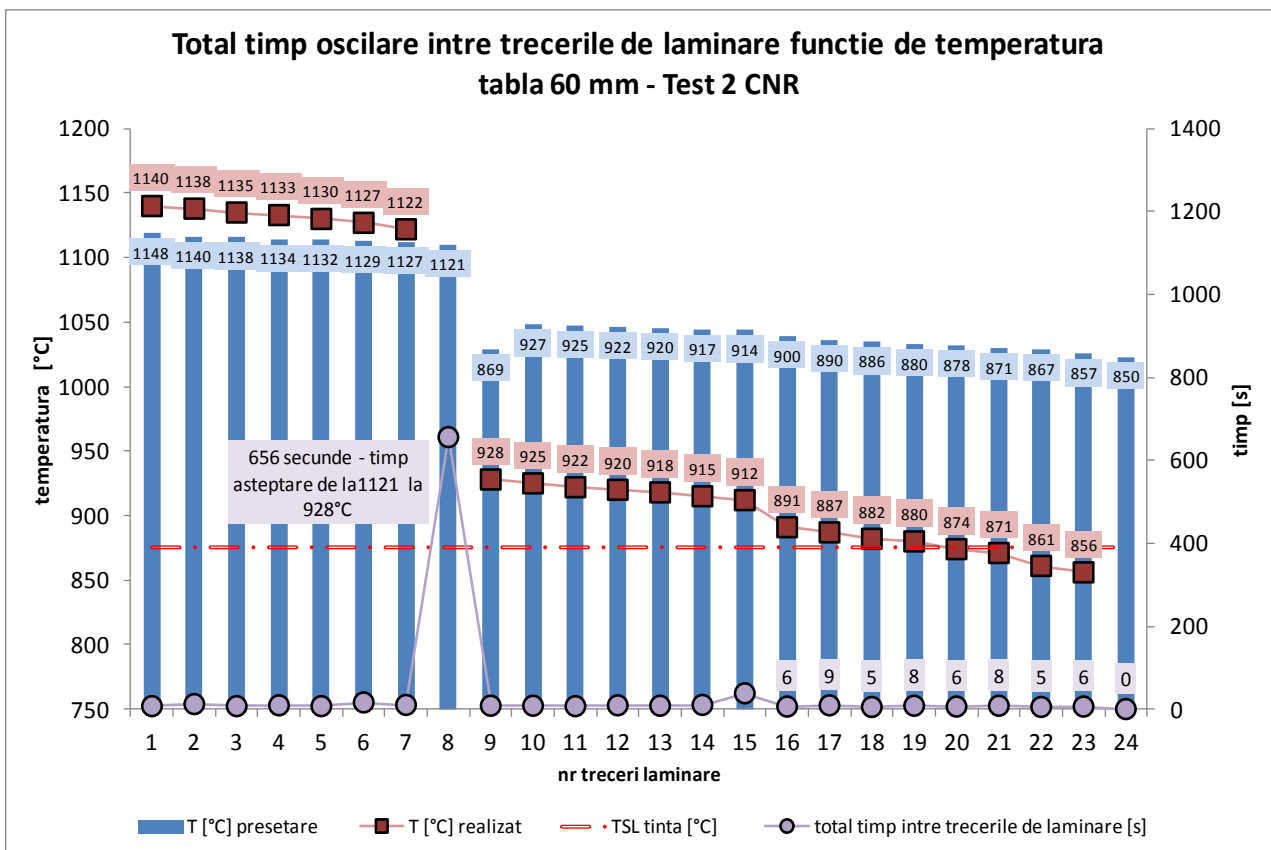


Figura 25 - timpi oscilare între trecerile de laminare – test 2 CNR

Pentru timpul total de oscilare apar diferențe între presetat și realizat de la 1152 secunde la 656. Diferența are drept cauză principală procesul de deșunderizare suplimentar aplicat pe fiecare trecere de laminare la cașa degrositoare Q1,

astfel încât în urma precal, recalc cu ajutorul procesului TempMon se optimizează calculul efectuat pentru durata totală de așteptare în vederea atingerii temperaturii de 930°C în vederea reînceperii laminării.

Table 21 - Valori: Rm [MPa]; table de 60 mm grosime funcție de stare epruvetă

| Stare epruveta | Rm min [MPa] | Rm NVF40 min [MPa] | rută laminare nouă CNR | rută laminare N | Rm max [MPa] |
|----------------|--------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------|
| N2_CR | 460 | 510 | 554 | 552 | 620 |
| N2_CN1 | 460 | 510 | 536 | 541 | 620 |
| N2_lab T0 | 460 | 510 | 537 | 530 | 620 |
| N2_lab T1 | 460 | 510 | 534 | 529 | 620 |
| N2_lab T2 | 460 | 510 | 529 | 533 | 620 |
| N2_lab T3 | 460 | 510 | 536 | 528 | 620 |

Tabel 22 - Valori rezultate – test Tracțiune: Rp0.2 [MPa]; tabla de 60 mm grosime

| Stare epruveta | Rp0.2 {ReH} [MPa] | min rută laminare nouă CNR | rută laminare N | rută laminare nouă CNR |
|----------------|-------------------|----------------------------|-----------------|------------------------|
| N2_CR | 335 | 421.5 | 428.1 | 417.9 |
| N2_CN1 | 335 | 353 | 357 | 336 |
| N2_lab T0 | 335 | 395 | 369 | 334 |
| N2_lab T1 | 335 | 401 | 389 | 369 |
| N2_lab T2 | 335 | 386 | 373 | 357 |
| N2_lab T3 | 335 | 395 | 389 | 362 |

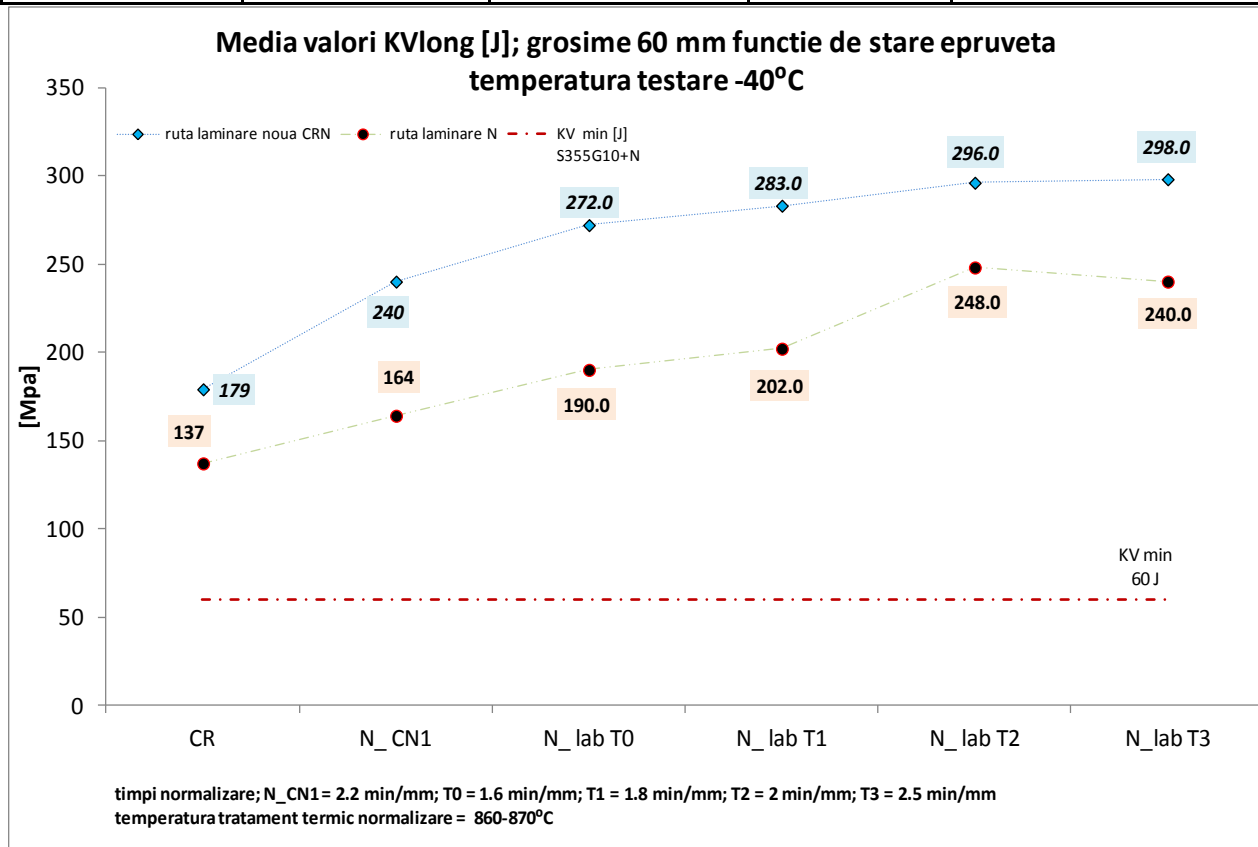


Figura 26 - Valori reziliența temperaturi testare la -40°C

Se observă diferența între cele două rute de laminare abordate cu un avantaj clar al noii rute optimizate.

Tabel 23 – Valori reziliența testate la -40°C

| Stare epruveta | KV NVF40 min [J] | rută laminare nouă CNR | rută laminare N |
|----------------|------------------|------------------------|-----------------|
| N2_CR | 46 | 141 | 107 |
| N2_CN1 | 46 | 190 | 124 |
| N2_lab T0 | 46 | 212.7 | 180.7 |
| N2_lab T1 | 46 | 237.3 | 182.7 |
| N2_lab T2 | 46 | 256.0 | 248.0 |
| N2_lab T3 | 46 | 236.0 | 240.0 |

Tabel 24 - Valori reziliența testate la -60°C

| | KV min [J] S355G10+N | rută laminare nouă CNR | rută laminare N |
|-----------|-------------------------|------------------------|-----------------|
| N2_CR | 60 | 179 | 137 |
| N2_CN1 | 60 | 240 | 164 |
| N2_lab T0 | 60 | 272.0 | 190.0 |
| N2_lab T1 | 60 | 283.0 | 202.0 |
| N2_lab T2 | 60 | 296.0 | 248.0 |
| N2_lab T3 | 60 | 298.0 | 240.0 |

Tabel 25 - Valori reziliența testate la -76°C

| | rută laminare nouă CNR | rută laminare N |
|-----------|------------------------|-----------------|
| N2_CR | 46.7 | 37 |
| N2_CN1 | 50.5 | 40.7 |
| N2_lab T0 | 72.0 | 50.0 |
| N2_lab T1 | 83.0 | 53.0 |
| N2_lab T2 | 86.0 | 58.0 |
| N2_lab T3 | 88.0 | 57.0 |

Tabel 26 - Valori test rezistența la gatuire Z [%] – tabla 60 mm

| proba nr | Grosime [mm] | Z min [%] | Z rezultate lab [%] |
|---|--------------|-----------|---------------------|
| 100 – N Stare epruveta: stare laminată | 60 | 35 | 70,3 |
| | | 35 | 70,2 |
| | | 35 | 71,1 |
| 101 – CNR Stare epruveta: stare laminată | 60 | 35 | 76,9 |
| | | 35 | 78,2 |
| | | 35 | 78,3 |

Microstructura

Table 27 - Date metalografice tabla 60 mm

| Neatacat | | | | Atac nital 2% | | |
|-------------------|---------------|-----|------------------|----------------------------|--------|-----|
| | | | | Față 1 | 1/4 | 1/2 |
| 100 N | Oxizi | 1 | Mărime graunte | 10 | 10-9.5 | 9,5 |
| | Sulfuri | 0,5 | Structura | Ferito perlitică în sir A2 | | |
| | Silicați | - | Segregație | - | - | - |
| | Nitruri | 0,5 | Strat decarburat | 115μm | | |
| | Duritate HV10 | | | 180 | 181 | 182 |
| 101 CNR | Oxizi | 0,5 | Mărime graunte | 10 | 10-9.5 | 9,5 |
| | Sulfuri | 0,5 | Structura | Ferito perlitică în sir A2 | | |
| | Silicați | - | Segregație | - | - | - |
| | Nitruri | 1,5 | Strat decarburat | 115μm | | |
| | Duritate HV10 | | | 171 | 171 | 170 |

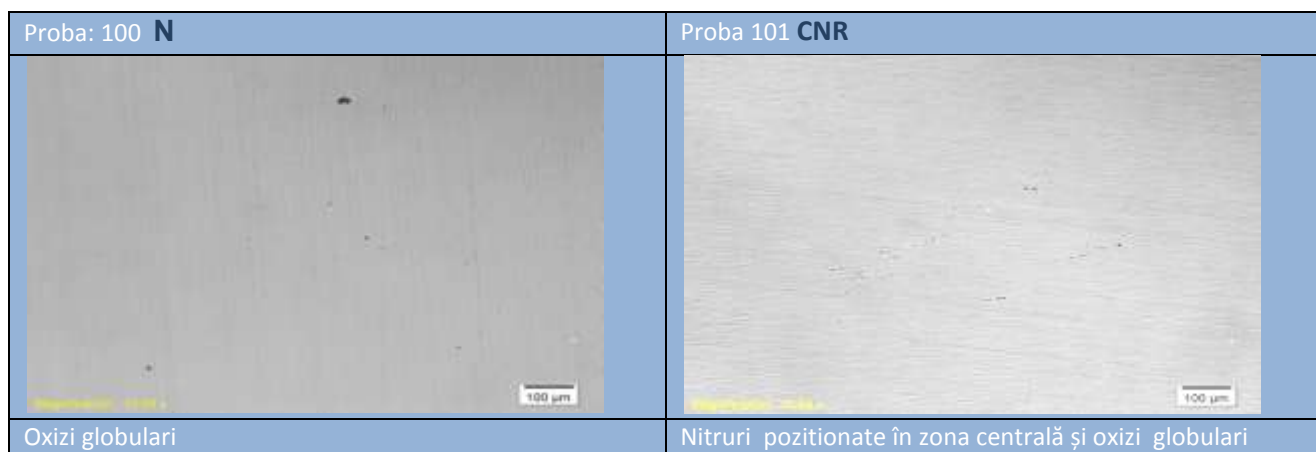


Figura 27 - Sumar analiză incluziuni

Mărime de incluziune este normală și vine din procesul de turnare. Forma oxizilor din imagine este sferică și prezintă riscul de apariție în cadrul unui control cu ultrasunete restrictiv, respectiv clasa de US S3E3. Pentru tabla laminată pe ruta CNR observăm și nitruri. Apariția nitrurilor la suprafața grosimii laminate se datorează creșterii PGT la Q1.

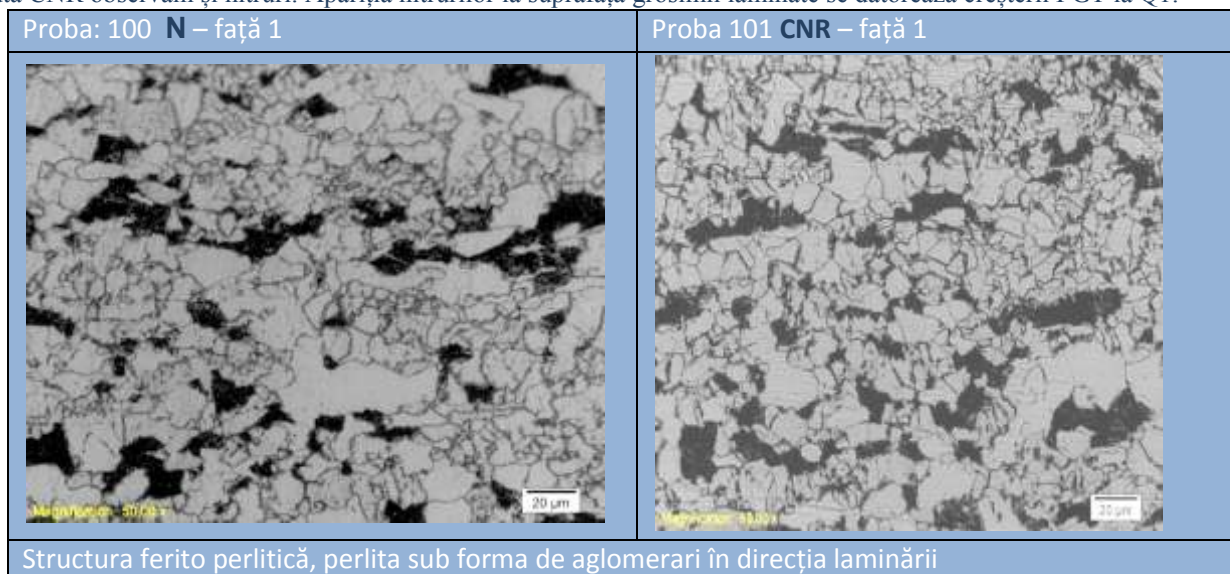


Figura 28 - Metalografie la suprafață probelor 100NR/101CNR

Structura cristalină care se observă la suprafața probei este o structură neomogenă austenitică, însemnând că TTN a modificat structura de laminare, dar nu a pătruns în profunzime lasînd aglomerări perlitice ce s-au dispus pe direcția laminării. Totuși observăm diferențe în difuzia acestor aglomerări între cele două probe, fiind evidentă o dispersie mai bună în cazul rutei CNR.

Proba 101 CNR

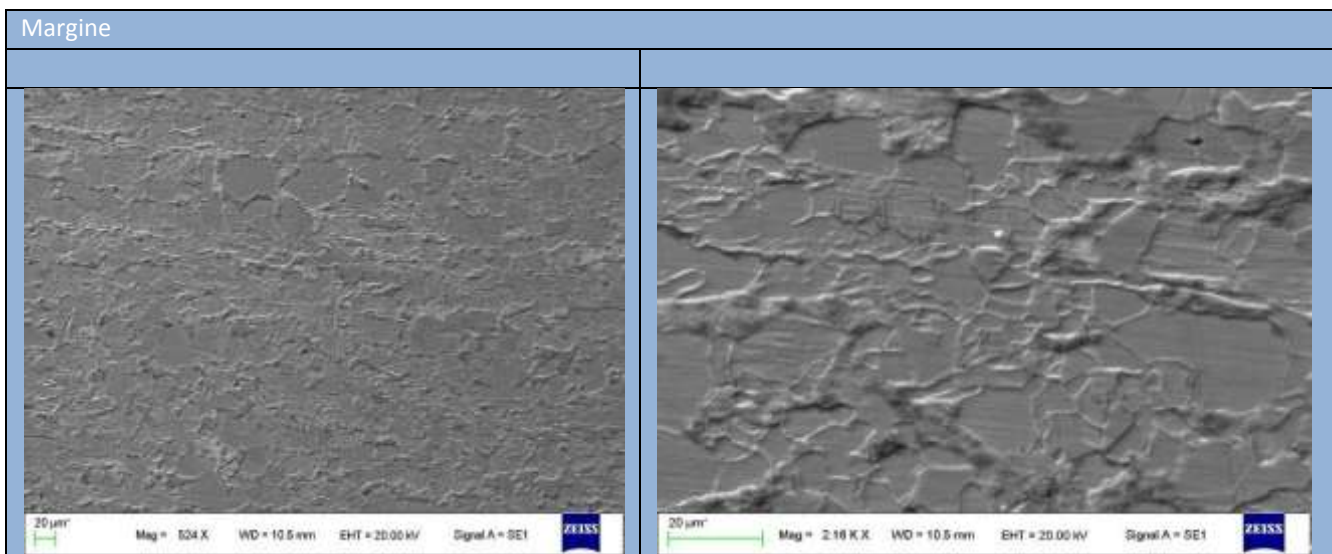


Figura 29 - Microstructura la 1/4 ruta CNR

Imagistica SEM – probe 100NR / 101CNR

100-(1)

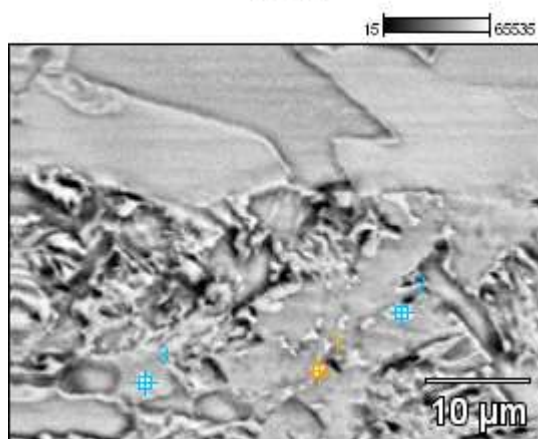


Image Name: 100-(1)

Accelerating Voltage: 20.0 kV

Magnification: 6091

Figura 30 - Harta microstructura proba 101 CNR

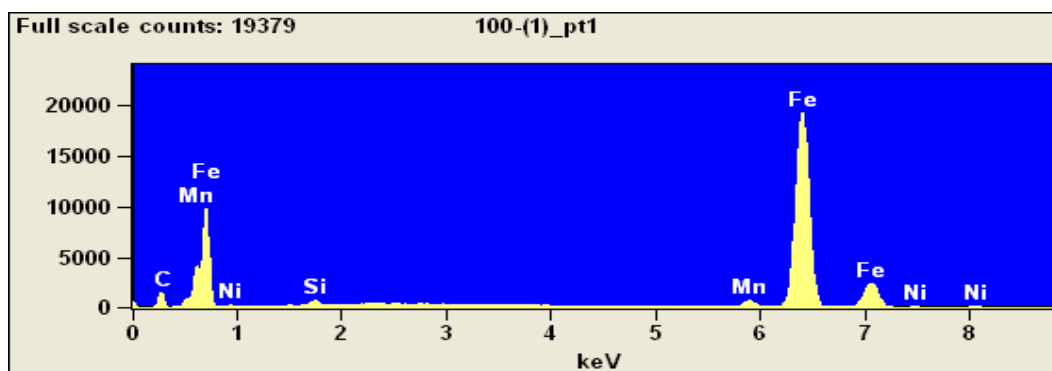


Figura 31 - Hartă microstructură

Analiza procesului de laminare și încercărilor de laborator.

Influență laminării

Laminarea N2 – 100_N în comparație cu 101_CNR

- **R_m** în stare laminată cu valori pe mijlocul intervalului de minim-maxim 460-620 **MPa** pentru cu o medie de 530 **MPa** pentru rută de laminare **N** și cu o medie de 535 **MPa** pentru rută de laminare **CNR**. Delta între cele două rute este mai mică de 10 **MPa** indiferent de starea epruvetei – normalizată în cuptor sau laminată – fără influență majoră în caracteristica de rezistență a oțelului.
- **R_{p0,2}** valori cu o medie de 375 **MPa** în stare laminată pentru rută de laminare **N** și cu o medie de 386 **MPa** pentru rută de laminare **CNR**. Delta cu valoare mai mare de 10 **MPa** în stare normalizată – influență minimă a celor 2 rute de laminare.

Analiza influenței microelementelor de aliere.

- Palierul de menținere a valorilor de reziliență a crescut de la -40°C la -60°C.
- **Mo** la 0,105% aliere cu o valoare mare, suficientă pentru a influența rezistența. Molibdenul s-a dizolvat parțial în ferită și cementită, parțial formând carburi și precipitate la limita de grăunte. În felul acesta a fost influențată caracteristica de rezistență la tracțiune și într-o oarecare măsură plasticitatea. Precipitatele formate la temperaturi peste temperatură de transformare A-F au o distribuție aleatoare, iar cele formate în cursul transformării austenitice sînt mai fine și dispuse în șiruri paralele
- **Nb** la 0,025 % a crescut valoarea temperaturii la 930°C care recristalizarea dinamică între cilindri de lucru este oprită. De asemenea carbonitrurile și precipitatele obținute au condus la o finisare a mărimii de grăunte de punctaj 10 în stare laminată cu impact direct în caracteristicile de rezistență și tenacitate.

Discutii și concluzii

Compoziția chimică **N2 – CMnSiCuNiMoNbN** satisface cerințele de rezistență mecanică și rezistența la curgere impuse în standardul European EN 10225/2009 pentru Mărcile de oțel S355G9+N, respectiv S355G10+N pentru ambele stări de livrare **N** și **N**. De asemenea și pentru marca de oțel Grad 50 conform API 2h.

În privința mărcii de oțel NVF40 – cerința de **R_{p0,2}** de minim 390 **MPa** nu este satisfăcută, desi cerința de reziliență la -60°C cît și cerința de rezistență mecanică **R_m** sînt indeplinite. Datorită valorilor sub limita minimă de 390 **MPa** cu o medie de 380 **MPa**, matricea de compoziție **N2** se încadrează cu succes o încadrare mai jos la limita de curgere, respectiv marca de oțel NVF36

Cap VI. Concluzii finale, contribuții personale la elaborarea tezei de doctorat și domenii de valorificare a rezultatelor. Direcții de orientare a cercetărilor viitoare

VI.1 Concluzii finale:

Multitudinea de încercări de laborator de la simulare tratamente termice la încercările mecanice ne arată complexitatea acestor cercetări și validează caracteristica inovatoare de ordin tehnologic.

Oțelurile de tip **HSLA** sunt printre materialele cele mai utilizate: în construcții industriale de masini, în diverse construcții sudate (nave maritime, vase sub presiune, platforme maritime, poduri, gazoducte, construcții civile etc.), datorită unui avantajos raport pret/performața. Pentru păstrarea acestui avantaj tehnologiile de fabricație sunt într-o continuă și dinamică dezvoltare urmărind:

- creșterea performanțelor de utilizare ale oțelurilor,
- diminuarea costurilor de producție;
- diminuarea impactului negativ asupra mediului.

Avantajul unui nivel ridicat de automatizare de la elaborare la laminare pe întreg fluxul de producție și corelarea compozițiilor chimice cu parametrii tehnologici de laminare permit obținerea oțelurilor **HSLA** la un înalt nivel calitativ. Preocuparea este de a răspunde cerințelor exigente ale clienților ce sunt mai restrictivi decât normele de standardizare ale oțelurilor. Competitivitatea pe piață poate fi menținută printr-o îmbunătățire continuă în domeniul deformării plastice la cald menținând costurile sub control și obținându-se reduceri de cost pentru anumite marci de oțel utilizate în construcții sudate.

În acest context în teza de doctorat am abordat și latura economică prin stabilitatea, creșterea fezabilității și dezvoltarea producției industriale în AMG a mărcilor comerciale de oțel.

- Prin aplicarea procesului de laminare controlată urmată de tratamentele termice de normalizare și revenire înaltă au adus stabilitatea de producere a marcii de oțel P460NL2 în mediu industrial.
- Aplicarea laminării termomecanice pe pe tablele cu grosimi 60-70-80 mm pentru marca de oțel structurală S355M a avut drept rezultat creșterea fezabilității.
- Prin dezvoltarea unei noi rute de laminare efectuată am asigurat posibilitatea de producție industrială pentru tablele groase în marcele de oțel cu cerințe de tenacitate ridicată la temperaturi joase în domeniul [-40; -50; -60°] și rezistența la curgere Rp0.2 de minim 355MPa.

VI.2 Contribuții personale la elaborarea tezei de doctorat și domenii de valorificare a rezultatelor

În urma cercetărilor, noutatea în domeniu adusă în cadrul acestei teze este dată de:

- Am identificat că aplicarea unui tratament termic secundar TTRÎ după tratamentul termic de normalizare pentru marca de oțel P460 cu compoziția chimică T1 se restabilesc valorile **Rp_{0,2}** pierdute după TTN cu o medie de 100 MPa..
- Am reproiectat compoziția chimică T2 pentru marca de oțel P460NL2 pe gama de grosimi 8÷12 mm astfel încât am obținut valoarea Rp0,2 mai mare de 460 MPa după TTN.
- Am obținut reducerea costurilor pentru compoziția chimică T2 cu 49€ pe tona de oțel prin reducerea procentelor elementelor de aliere.
- Astăzi în ArcelorMittal Galați se utilizează cele două compoziții chimice T1 pe gama de grosim 6-16 mm și T2 pe gama de grosimi 16,01-36 mm pentru producerea mărcilor de oțel P460NL1 și P460NL2. aceste mărci au fost certificate cu societatea de omologare TUV. Am coordonat procesul de omologare și testare a acestor mărci și începând din anul 2016 am crescut portofoliul de produse certificate ala AMG.
- Am utilizat ruta de laminarea termomecanică pe compoziția chimică M1 proiectată pentru oțelurile cu utilizare construcții industriale sudate marca de oțel S355M pe table cu grosimi între 60÷80 mm. Aceasta cercetare a pus în evidență riscul rebutării bramelor utilizate dacă lățimile acestora nu sunt corelate cu lungimea minimă necesară asigurării unui coroaiaj de

minim 1,33 ca și raport între lungime și lățime bramă programată pentru laminare. Datorită acestui risc s-a născut oportunitatea dezvoltării unei noi rute de laminare controlate care să ofere soluția de laminare pentru table cu grosimi mari.

- Datorită rezultatelor bune obținute pe tablele cu grosimile de 70 și 80 mm laminate experimental termomecanic am deschis fezabilitatea în catalogul de produse al AMG pentru marca comercială S355M până la grosimea de 80 mm
- Am proiectat o nouă compoziție chimică N2 cu elemente de aliere MoNbTi în vederea atingerii proprietăților mecanice solicitate pentru oțelurile ce sunt utilizate pentru construcția de platforme maritime exploatare în condiții severe și care solicită tenacitatea la temperaturi negative extrem de joase [-40°C; -50°C; -60°C.
- Am creat o nouă rută de laminare în vederea depășirii limitărilor de ordin tehnologic privind dimensiunile de bramă. Această nouă abordare a laminării controlate se adresează domeniului de grosimi de la 30÷60 mm. În această rută am crescut raportul de deformare plastică prin utilizarea unui artificiu de modelare matematică cu impunerea unui punct de răcire pornind de la un maxim de 930°C sub T_{nr}. Am obținut o finisare a mărimii de grăunte de punctaj 10 cu impact direct în tenacitatea oțelurilor obținând astfel valori ridicate ale rezilienței și în mijlocul grosimii tablei laminate.
- Am efectuat laminarea experimentală a compoziției chimice N2 pe rutele de laminare NR și cea nou dezvoltată CNR pe două brame pentru obținerea a două table de 60 mm grosime. Analiza comparativă ne-a oferit o bază de date importantă pentru parametrii tehnologici și pentru impactul în proprietățile mecanice.
- Datorită rezultatelor obținute în urma cercetării experimentale pe noua compoziție chimică N2 pe noua rută de laminare controlată CNR în acest moment coordonez proiectul de omologare un nou produs - marca de oțel grad naval VLF36 - certificat de societatea DNV-GL cu termen în iunie 2017. Gama de grosimi pe tabla groasă ce va fi omologată este în domeniul 6-60 mm.

VI.3 Direcții de orientare a cercetărilor viitoare

- Recuperarea unor valori între 50÷100 MPa după utilizarea unui tratament secundar de revenire înaltă pentru marca de oțel P460NL în gama de grosimi 6÷16 mm cercetată în aceasta teza deschide noi posibilitati și pentru alte marci de oțel cu elemente chimice de aliere ce formează carburi Nb, V, Ti și care au un carbon echivalent similar cu compoziția chimică T1 de aproximativ 0,50%
- Optimizarea efectuată în domeniul laminării controlate în vederea creșterii gamei de grosimi până la un maxim de 63 mm în vederea menținerii unui raport de deformare cât mai ridicat de la bramă de 250 mm grosime la grosimea finală a tablei respectiv de 4:1 se poate adresa mai multor tipuri de oțel HSLA.
- Condițiile și limitările ce au condus la crearea noii rute de laminare CNR pot fi extinse și pentru laminarea termomecanică conform rutelor actuale TMR și TMCP modificandu-se doar TSL odată în domeniul austenitic, la limita Ar₃ și odată în domeniul intercritic între Ar₃÷Ar₁.

Listă de lucrări științifice publicate

Articole

a) în reviste de specialitate de circulație internațională proceeding **ISI**

1. **Costel Durduc-Roibu, Elena Drugescu**, 2016 - Optimization of chemical composition for pressure vessel steel grade P460NL2, Advanced Materials Research - ISI Journal/Proceeding - (ISI Proceedings, Scientific.Net, Trans. Tec. Publications); accepted to be published in September 2016

b) în reviste BDI

1. **Costel Durduc-Roibu, Elena Drugescu**, 2012, Effect Of Intercritical Hot Rolling Deformation On Steel Grade For Welded Pipes With Lean Chemistry, THE ANNALS OF DUNAREA DE JOS UNIVERSITY OF GALATI, Fascicle IX, METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE, May 2012, page 171-178, (B+), ISSN 1453-083X
2. **Costel Durduc-Roibu, Liviu Gurau, Elena Drugescu, Viorica Mușat**, Industrial Research In Thicker Heavy Plates (70-80 Mm) HSLA Steel Micro-Alloyed With Mo-Nb-Ti - Thermo-Mechanical Control Process In ArcelorMittal Galati, THE ANNALS OF DUNAREA DE JOS UNIVERSITY OF GALATI, Fascicle IX, METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE, (B+), ISSN 1453-083X, Accepted to be published December 2016. Accepted to be published December 2016
3. **Costel Durduc-Roibu, Liviu Gurau**, 2015, Research In Industrial Trials To Improve Trough-Thickness Z35 Properties Of Hot Rolled Heavy Plates Up To 60 Mm Thickness For Structural Steels, THE ANNALS OF DUNAREA DE JOS UNIVERSITY OF GALATI, Fascicle IX, METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE, (B+), ISSN 1453-083X, Accepted to be published December 2016.

c) prezentate în sesiunile de comunicări științifice:

1. **Costel Durduc-Roibu, Elena Drugescu**, 2016 - Optimization of chemical composition for pressure vessel steel grade P460NL2, presented on oral section on UgalMat at 7th CONFERENCE ON MATERIAL SCIENCE & ENGINEERING, from "Dunarea de Jos" University of Galati in May 2016.
2. **Costel Durduc-Roibu, Liviu Gurau**, Industrial Research In Thicker Heavy Plates (70-80 Mm) Hsla Steel Micro-Alloyed With Mo-Nb-Ti - Thermo-Mechanical Control Process In ArcelorMittal Galati, May 2015, Published in: BOOK OF ABSTRACTS / SCIENTIFIC CONFERENCE OF DOCTORAL SCHOOLS FROM UDJ GALATI "Dunarea de Jos" University of Galati 2015 Section 3 Pster Presentation: Pag.156 P.P 3.21. Rewarded First Prize.
3. **Costel Durduc-Roibu, Liviu Gurau**, Research In Industrial Trials To Improve Trough-Thickness Z35 Properties Of Hot Rolled Heavy Plates Up To 60 Mm Thickness For Structural Steels, May 2014, BOOK OF ABSTRACTS / SCIENTIFIC CONFERENCE OF DOCTORAL SCHOOLS FROM UDJ GALATI Second Edition / CSSD-UDJG 2014 15-16 of May 2014, Section 3 Oral Presentation: Pag.40 PO 3.3 - Rewarded Third Prize.

Bibliografie:

1. http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/Busch_STAHL2014_Rolling_Mills.pdf
http://galati.arcelormittal.com/about-us/arcelormittal-profile/heavyplatemill.aspx?sc_lang=en; laminoare de tablă groasă
2. **ASM Handbook**, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys / Types of Steel Based on Deoxidation Practice (Ref 3)_page 241 / Table 20 SAE potential standard steel compositions page 256;
3. <http://www.totalmateria.com/articles/Art62.htm> - Classification of Carbon and Low-Alloy Steels
ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys / Types of Steel Based on Deoxidation Practice (Ref 3)_page 241 / Table 1 Carbon steel cast or heat chemical limits and ranges page 234.
4. **ASM Handbook**, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys / Types of Steel Based on Deoxidation Practice (Ref 3)_page 241 / Table 6 Product analysis tolerances for carbon and high-strength low-alloy steel bars, blooms, billets, and slabs _ page 239.
5. **B.S. Motagi, Ramesh Bhosle** - Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Medium Carbon Steel - International Journal of Engineering Research and Development ISSN: 2278-067X, Volume 2, Issue 1 (July 2012), PP. 07-13 www.ijerd.com
ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys / Carbon and Low-Alloy Steel Plate _ page 375/ Heat Treatment _ page 376.,
6. **Joseph R. Davis** - Alloying: Understanding the Basics - High-Strength Low-Alloy Steels -Chapter 38; Published in 2001 by ASM International.
ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys / Section: Carbon and Low-Alloy Steels / Table 4 Composition of high-strength low-alloy steel plate _ page 380.
7. **George E Totten** - Heat Treatment Handbook -Steel Heat Treatment - Metallurgy and Technology - second edition published in 2006 by Taylor & Francis Group.
8. **D. Gandy** _Carbon Steel Handbook _Final Report, March 2007_ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE: page 36 / 108÷141Mn [8] //
ASM International _ ALLOYING UNDERSTANDING THE BASICS December 2001 / page 8 to 16 / 124-127
9. **ASM International** _ ALLOYING UNDERSTANDING THE BASICS December 2001 / page 135-136-140_200-203_206_236-238
10. **ASM International** _ ALLOYING UNDERSTANDING THE BASICS December 2001 / page 179_206_209-294
11. **Alloys: Preparation, Properties, Applications 1998** _ ISBN 3-527-29591-7 _page 15 to 40
12. **Știința Materialelor - F.Potecasu – Europlus, 2006 - Editura Europlus Galati– Colectia Științifică - ISBN (10) 973 –7845 –27–7; ISBN 978 –973 - 7845 –27–6; 2006 Zhang Yongjia:** Research and Production of V-Cu-Ni Series High-strength Steel for Pressure Vessel - Bao SteelResearch Institute, Shanghai _ publicată în revista Buletinul Universității Tehnice de Stat Azov. Seria: Inginerie științelor avansate / Număr de emisiune 20/2010 _ page 81.
13. **Gâdea S., Petrescu M.**, Metalurgie fizică și studiul metalelor, vol. II., Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
14. **Silvia Vacu**, Elaborarea oțelurilor aliate , volumul I, Editura: Tehnica, 1980
15. **Rami Saban, Constantin Dumitrescu**, Tratat de știința și ingineria materialelor metalice Vol.3. Metale. Aliaje. Materiale speciale. Materiale compozite. ISBN: 978-973-720-261-1, **Editura: A.G.I.R** 2009
16. **RUUKI**, Hot rolled hardenable boron steels - 10 February 2015 / www.ruukki.com.
17. **D. O. BAI. S. YUET MACCAGaNdOJ J JONAS, ISIJ Internationai, Vol. 36 (1996). No. 8, pp. 1084-1093** Static Recrystallization of Nb and Nb-B Steels under Continuous Cooling Conditions
18. **Mehran Maalekian**, Technische Universität Graz - Christian Doppler Laboratory for Early Stages of Precipitation, **The Effects of Alloying Elements on Steels** - October 2007
19. **Mehran Maalekian**, Technische Universität Graz - Christian Doppler Laboratory for Early Stages of Precipitation, **The Effects of Alloying Elements on Steels** - October 2007

20. **Alloys: Preparation, Properties, Applications 1998**_ ISBN 3-527-29591-7 _page 15 to 40.,
21. **Zecheru Gh., Drăghici Gh.**, Elemente de științe și ingineria materialelor, vol. 1 și 2, Editura ILEX și Editura Universității din Ploiești, 2001
22. **Nicolae CANANAU & Dinel TANASE**, Bazele teoretice ale deformărilor plastice - Rezistența la deformare a materialelor metalice pagina 62, ISBN: 978-606-8348-06-3, Galati University Press - 2011:
23. **Nicolae CANANAU & Dinel TANASE**, Bazele teoretice ale deformărilor plastice - Rezistența la deformare a materialelor metalice pagina 62, ISBN: 978-606-8348-06-3, Galati University Press - 2011:
24. **Nicolae CANANAU & Dinel TANASE**, Bazele teoretice ale deformărilor plastice - Rezistența la deformare a materialelor metalice pagina 62, ISBN: 978-606-8348-06-3, Galati University Press - 2011:
25. **Gâdea S., Petrescu M.**, Metalurgie fizică și studiul metalelor, vol. II., Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
26. **Gâdea S., Petrescu M.**, Metalurgie fizică și studiul metalelor, vol. II., Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
27. **Christian Moretto** - Making Heavy Plate - plate mill rolling process - **ArcelorMittal University** 2014; **Ginzburg, Vladimir B.; Ballas, Robert** - Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing publisher : CRC Press - 2000 / **Studiu tehnic economic LTG2` 1979`** Procedura de fabricație a tablelor groase
28. **Studiu tehnic economic LTG2` 1979`** Procedura de fabricație a tablelor groase
29. **Studiu tehnic economic LTG2` 1979`** Procedura de fabricație a tablelor groase / **Charles Romberger** Making Heavy Plate - Slab preparation; **ArcelorMittal University** 2014^l
30. SIEMENS - SIROLL AGC - 2010 - Automatic gauge control Level 2 of automation AGC
31. **ASM Handbook**, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys, Section: Carbon and Low-Alloy Steels - **HSLA Steels. 01 Sep 2005**;
32. **COSTEL DURDUC-ROIBU, ELENA DRUGESCU**, 2012, Effect Of Intercritical Hot Rolling Deformation On Steel Grade For Welded Pipes With Lean Chemistry, THE ANNALS OF DUNAREA DE JOS UNIVERSITY OF GALATI, Fascicle IX, METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE, May 2012, page 171-178, (B+), ISSN 1453-083X
33. EN 10025/3-2004 Hot rolled products of structural steels / Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels _ page 10 / point 3,1 normalizing rolling.;
34. EN 10025/3-2004 Hot rolled products of structural steels / Part 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels _ page 10 / point 3,1 normalizing rolling.;
35. EN 10025/4-2004 Hot rolled products of structural steels / Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels_ page 10 / point 3,1 thermomechanical rolling
36. **NASTICH S.Y., MOROZOV Y.D., MATROSOV M.Y., GALKIN V.V., DENISOV S.V** - Microstructure Refinement and Precipitation Characteristics of TMCP-Processed Plates for Pipeline Applications - published in 2011 in CNKI Journal.
http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotol-YING2011S1084.htm -TMCP = laminare termomecanică asistată de un control al procesului și urmată de răcire accelerată sau răcire în aer în funcție de tipul oțelului intrat în procesul de laminare [37];
37. **D. O. BAI. S. YUET MACCAGaNdOJ J JONAS, ISIJ Internationai, Vol. 36 (1996). No. 8, pp. 1084-1093** Static Recrystallization of Nb and Nb-B Steels under Continuous Cooling Conditions.
38. **D. O. BAI. S. YUET MACCAGaNdOJ J JONAS, ISIJ Internationai, Vol. 36 (1996). No. 8, pp. 1084-1093** Static Recrystallization of Nb and Nb-B Steels under Continuous Cooling Conditions
39. **Caryn Nicole Homsher** - DETERMINATION OF THE NON-RECRYSTALLIZATION TEMPERATURE (TNR) IN MULTIPLE MICROALLOYED STEELS - PHD thesis of Colorado School of Mines;
Gumar Ray, Ratan Indu Gangulay andAshok Kumar Panda - Determination of Recrystallization stop temperature (TR) of an HSLA steel - Journal of Steel and related Materials - published in 2004; archived at <http://dspace.nitrkl.ac.ind/dspace>
40. **Antonio Augusto Gorni** - STEEL FORMING AND HEAT TREATING HANDBOOK - 20 February 2014 - São Vicente SP Brazil
41. **Taku Sakaia, Andrey Belyakovb,, Rustam Kaibyshev, Hiromi Miuraa, John J. Jonasc** - Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions Progress in Materials Science / Volume 60, March 2014, Pages 130–207 <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002>

42. **Ginzburg, Vladimir B.; Ballas, Robert** - Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing publisher : CRC Press - 2000
43. **Ginzburg, Vladimir B.; Ballas, Robert** - Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing publisher : CRC Press - 2000
44. **Paulino José García Nieto , Victor Manuel González Suárez, Juan Carlos Álvarez Antón, Ricardo Mayo Bayón** - A New Predictive Model of Centerline Segregation in Continuous Cast Steel Slabs by Using Multivariate Adaptive Regression Splines Approach / Materials 2015, 8, 3562-3583; doi:10.3390/ma8063562.
45. **Mike Hernandez, Eileen Sparks** - ZEISS ULTRA-60 FIELD EMISSION SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (FE-SEM) PROCEDURE / Documentation updated in 11/13/2009.
46. **George E Totten** - Heat Treatment Handbook -Steel Heat Treatment - Metallurgy and Technology - second edition published in 2006 by Taylor & Francis Group.:
47. **George E Totten** - Heat Treatment Handbook -Steel Heat Treatment - Metallurgy and Technology - second edition published in 2006 by Taylor & Francis Group.:
48. **Don Percival, Applied Physics Lab, University of Washington** - Introduction to Spectral Analysis 1999.
49. **SIEMENS - SIROLL AGC - 2010^[18]** - Automatic gauge control Level 2 of automation
50. https://library.e.abb.com/public/471ff9a683fc2a37c1257562004456c0/3BSE057389R0001_-001.pdf
51. http://www.smg.de/english/pages/2-1-2_herstellung.html
52. https://www.dillinger.de/imperia/md/content/dillinger/publikationen/stahlbau/technischeliteratur/dh_heavy_plates_with_special_process.pdf
53. **Ginzburg, Vladimir B.; Ballas, Robert** - Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing publisher: CRC Press - 2000; Chapter 3 - CHEMICAL COMPOSITIONS OF STEEL; 3.2 Austenite Formers - page_29 to 64;
54. **PAN Tao, CUI Yin-hui, SU Hang, ZHANG Yong-quan, YANG Cai-fu**; Effect of Vanadium on the Strength and Toughness of Wheel Steel at Different Reheat Temperatures; Institute for Structural Materials, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. Technology Center of Maanshan Iron & Steel Co., Ltd., Maanshan 243000, China);
55. **Ginzburg, Vladimir B.; Ballas, Robert** - Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing publisher: CRC Press - 2000; Chapter 3.2 Austenite Formers; Chapter 6.5 Effect of Grain Size on Strengthening ; Chapter 13.6 Effect of Temperature and Microalloying ; Page 42, 133, 134
56. **H. Baumgardt, H. de Boer and F. Heisterkamp**, in "Niobium - Proc. of an Int. Conf.", TMS of AIME, Warrendale (PA), 1984, p. 883-915 Niobium Information No 8/95;
57. **Ginzburg, Vladimir B.; Ballas, Robert** - Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing publisher: CRC Press - 2000; Chapter 3.2 Austenite Formers; Chapter 6.5 Effect of Grain Size on Strengthening ; Chapter 13.6 Effect of Temperature and Microalloying ; Page 46, 132, 133;
58. **WANG Li, PARKER Sally, ROSE Andrew, WEST Geoff, THOMSON Rachel** - The effect of niobium on transformations from austenite to ferrite in low carbon steels - June 2011 in HSLA Steels Conference, Beijing, China; 1. Department of Materials, Loughborough University, Loughborough, LE11 3TU, UK; 2. Steel Metallurgy Department, Tata Steel RD&T, Swinden Technology Centre, Rotherham, S60 3AR, UK;
59. **3. R König, W. Scholz and H. Ulmer**, Arch. für d. Eisenhüttenw. 32 (1961), No 8, p. 541-556;
60. **Prabal Kumar Ray, Ratan Indu Ganguly and Ashok Kumar Panda** - Determination of Recrystallization Stop Temperature (TR) of an HSLA Steel - 2004 Steel Grips: Journal of Steel and Related Materials; Archived with Dspace@nitr; <http://dspace.nitrkl.ac.in/dspace>;
61. **ASM International - 2001**; Alloying: Understanding the Basics - Chapter 38 High-Strength Low-Alloy Steels; page 193 to 201; www.asminternational.org
62. **Jian Fang** - EXPERIMENTAL STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN IMPACT FRACTURE PROPERTIES AND TITANIUM ADDITION FOR HSLA STEELS - Technical Center, Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;
63. **Abbas Sheyaa Alwan** - Effect of Normalizing Process on Mechanical Properties of Submerged-arc Weldment - 2011 - Eng. & Tech. Journal, Vol. 29, No. 8, 2011;
64. **Vinod Joshi, Sohith Singh, Shahzaad Ali, Saurabh Bohra, Saurabh Kumar** - A Review on Effect of Heat Treatment Process on Micrograin Structure of Steel; International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online): 2319 – 6734, ISSN (Print): 2319 – 6726; www.ijesi.org; Volume 3 Issue 5 | May 2014 | PP.46-52;

65. **D.GOLDSTEIN** - Heat treatment technology -2010 Luxembourg -Heavy Plate Training- ArcelorMittal University
66. **George E Totten** - Heat Treatment Handbook -Steel Heat Treatment - Metallurgy and Technology - second edition published in 2006 by Taylor & Francis Group. page 134, 159, 162;
67. **Robert D. Pehlke, W. Fergus Porter, Richard F. Urban** - BOF steelmaking, Volumul 2 - Process Technology Division, Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1975; - page 28, 86,170;
68. **John D. Sharp** - Elements of steelmaking practice; Pergamon Press, 1 mar. 1966; - page 15, 16, 150
69. <https://barfatigueblog.org/2012/03/28/looking-at-a-comparison-of-as-rolled-and-normalized-properties-4/>
70. **U.P. Singh, B. Roy, S. Jha & S.K. Bhattacharyya** - Microstructure and mechanical properties of as rolled high strength bainitic rail steels; Pages 33-38 | Published online: 19 Jul 2013; Journal; **Materials Science and Technology**;
71. **Ginzburg, Vladimir B.; Ballas, Robert** - Fundamentals of Flat Rolling Manufacturing Engineering and Materials Processing publisher: CRC Press - 2000; Chapter 12.3 Continuous-Type Slab Reheating Furnaces
72. [http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2008/industry_solutions/is12076827.htm&content\[\]=IS&content\[\]=ISD&content\[\]=IMT&content\[\]=PDMT](http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2008/industry_solutions/is12076827.htm&content[]=IS&content[]=ISD&content[]=IMT&content[]=PDMT)
73. <http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/index.php?content%5B%5D=PDMT&search=GALATI&date-1-dd=20&date-1-mm=11&date-1=2007&date-2-dd=20&date-2-mm=11&date-2=2016&intern=1>
74. <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=182>
75. **The Chinese Society for Metals** - HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015;
76. **Kunishige K, Nagao N.** - Strengthening and toughening of hot-direct-rolled steels by addition of a small amount of titanium. ISIJ International. 1989;29(11):940-6.
77. **Sugimoto KI, Murata M, Muramatsu T, Mukai Y.** - Formability of C-Si-Mn-Al-Nb-Mo ultra high-strength TRIP-aided sheet steels. ISIJ international. 2007;47(9):1357-62.
78. **Hashimoto, Shunichi, et al.** - "Effects of Nb and Mo addition to 0.2% C-1.5% Si-1.5% Mn steel on mechanical properties of hot rolled TRIP-aided steel sheets." ISIJ international 44.9 (2004): 1590-1598
79. **C.G.H. Brun and M.J.M. Munier, 1986,** - HSLA steels metallurgy and applications, ASM International, p. 941
80. **8. K. Olsson, 1988** - Processing microstructure and properties of HSLA steels, TMS, Warrendale (PA), p. 331
81. **Hui Su, Zhenqi Yan, Stanley J.T.,** - Fractal analysis of microstructure and properties of HSLA steels, Journal of Materials Science Letters 14, 1436-1439, 1995;
82. **Tamura, I., Ouchi, C., Tanaka, T., Sekine, H** - Thermo-mechanical processing of HSLA steels, Butterworths, Stoneham, MA, 1988. [10] * * * Guide to Engineerred materials, CNRS, 2008
83. **W Maurer, W Ernst, R Rauch, R Vallant, N Enzinger** - Evaluation of the factors influencing the strength of HSLA steel weld joint with softened HAZ + - Welding in the World, 2015 – Springer,
84. Effect of cooling rate on microstructure and properties of microalloyed HSLA steel weld metals - L Zhang, A Pittner, T Michael, M Rhode... - ... and Technology of ..., 2015 - Taylor & Francis
85. **Craven AJ, He K, Garvie LA, Baker TN.** Complex heterogeneous precipitation in titanium–niobium microalloyed Al-killed HSLA steels—I.(Ti, Nb)(C, N) particles. Acta Materialia. 2000 Sep 25;48(15):3857-68.
86. Temper resistance of pressure hull steel microalloyed with niobium, titanium, and vanadium - **IM Robertson** - Materials science and technology, 1993 - Taylor & Francis
87. **1. R. Uemori, R. Chijiwa, H. Tamehiro and H. Morikawa,** “AP-FIM study on the effect of Mo addition on microstructure in Ti-Nb steel”, Applied Surface Science 1994, 76:255. 58.
88. **Octavian POTECAȘU, Florentina POTECAȘU, Tamara RADU, Petrică ALEXANDRU** - Research regarding the influence of the deformation degree on the characteristics of deep drawing sheet steel, Metalurgia International, nr. 4/2008, ISSN 1582 – 2214, pag. 16 – 23;
89. **Florentina POTECAȘU, Octavian POTECAȘU** - The structure and the critical degree of cold deformation for sheets of steel with low carbon - METALURGIA NR.6, ISSN 0461-9579, (2010), pag. 10 – 16.
90. **Lee WB, Hong SG, Park CG, Park SH.** Carbide precipitation and high-temperature strength of hot-rolled high-strength, low-alloy steels containing Nb and Mo. Metallurgical and materials transactions A. 2002 Jun 1;33(6):1689-98.
91. Stiinta si ingineria materialelor- **F.Potecasu** –2007 - Editura Europlus Galati– ISBN 973 –7845 –10–2; ISBN 978 – 973 - 7845 –10–8;

92. Metalurgie fizică, vol 1- **F.Potecasu** – 2007 - Editura FRM-ISBN-978 - 973-8151-48-1; ISBN-978 - 973-8151-49-9
93. Transformari structurale in materiale cristaline - **F.Potecasu** – 2014 (e-book platforma electronica a UDJ).
94. **Florentina POTECASU, Octavian POTECASU, Elena DRUGESCU, Petrică ALEXANDRU** - The Influence of Cold Rolling on the Microstructure for Drawing Steels –The Annals Of ‘Dunărea De Jos’ University Of Galați , Fascicle IX Metallurgy And Material Science, ISSN 1453 –083X, 2007 nr2, , pag.40-46.
95. **Misra RD, Nathani H, Hartmann JE, Siciliano F.** - Microstructural evolution in a new 770MPa hot rolled Nb–Ti microalloyed steel. *Materials Science and Engineering: A.* 2005 Mar 15;394(1):339-52
96. **Misra RD, Teneeti KK, Weatherly GC, Tither G.** - Microstructure and texture of hot-rolled Cb-Ti and V-Cb microalloyed steels with differences in formability and toughness. *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2003 Oct 1;34(10):2341-51
97. **Funakawa Y, Shiozaki T, Tomita K, Yamamoto T, Maeda E.** Development of high strength hot-rolled sheet steel consisting of ferrite and nanometer-sized carbides. *ISIJ International.* 2004;44(11):1945-51
98. **Chen CY, Yen HW, Kao FH, Li WC, Huang CY, Yang JR, Wang SH.** Precipitation hardening of high-strength low-alloy steels by nanometer-sized carbides. *Materials Science and Engineering: A.* 2009 Jan 15;499(1):162-6.
99. **Wang XD, Huang BX, Wang L, Rong YH.** Microstructure and mechanical properties of microalloyed high-strength transformation-induced plasticity steels. *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2008 Jan 1;39(1):1-7.
100. **Rodrigues PC, Pereloma EV, Santos DB.** Mechanical properties of an HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling. *Materials Science and Engineering: A.* 2000 May 15;283(1):136-43.
101. **Octavian POTECASU, Florentina POTECASU, Petrica ALEXANDRU, Tamara RADU** - The Influence of Cold Rolling on the Mechanical Characteristics for Drawing Steels, *Octavian The Annals Of ‘Dunărea De Jos’ University Of Galați , Fascicle IX Metallurgy And Material Science, ISSN 1453 –083X, 2008 nr1, , pag.55-61*
102. Calculation of hardness distribution in the HAZ of micro-alloyed steel - **M Rahman, W Maurer, W Ernst, R Rauch** - *Welding in the World, 2014* - Springer
103. Austenite grain growth and microstructure control in simulated heat affected zones of microalloyed HSLA steel - **L Zhang, T Kannengiesser** - *Materials Science and Engineering: A, 2014* – Elsevier.
104. **Misra RD, Jia Z, O’Malley R, Jansto SJ.** Precipitation behavior during thin slab thermomechanical processing and isothermal aging of copper-bearing niobium-microalloyed high strength structural steels: The effect on mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A.* 2011 Nov 15;528(29):8772-80.
105. **Park DB, Huh MY, Shim JH, Suh JY, Lee KH, Jung WS.** Strengthening mechanism of hot rolled Ti and Nb microalloyed HSLA steels containing Mo and W with various coiling temperature. *Materials Science and Engineering: A.* 2013 Jan 10;560:528-34.
106. **Wang XD, Huang BX, Wang L, Rong YH.** Microstructure and mechanical properties of microalloyed high-strength transformation-induced plasticity steels. *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2008 Jan 1;39(1):1-7.
107. **Park DB, Huh MY, Shim JH, Suh JY, Lee KH, Jung WS.** Strengthening mechanism of hot rolled Ti and Nb microalloyed HSLA steels containing Mo and W with various coiling temperature. *Materials Science and Engineering: A.* 2013 Jan 10;560:528-34.
108. **Rodrigues PC, Pereloma EV, Santos DB.** Mechanical properties of an HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling. *Materials Science and Engineering: A.* 2000 May 15;283(1):136-43.
109. **Hu J, Du LX, Wang JJ.** Effect of cooling procedure on microstructures and mechanical properties of hot rolled Nb–Ti bainitic high strength steel. *Materials Science and Engineering: A.* 2012 Sep 30;554:79-85.
110. **F Potecașu, O Potecașu** The structure and the critical degree of cold deformation for sheets of steel with low carbon. - *Metalurgia, 2010 (6)* - search.ebscohost.com.
111. **Misra RD, Thompson SW, Hylton TA, Boucek AJ.** Microstructures of hot-rolled high-strength steels with significant differences in edge formability. *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2001 Mar 1;32(13):745-60.
112. **Sugimoto KI, Tsunezawa M, Hojo T, Ikeda S.** Ductility of 0.1-0.6 C-1.5 Si-1.5 Mn ultra high-strength TRIP-aided sheet steels with bainitic ferrite matrix. *ISIJ international.* 2004;44(9):1608-14.

Anexa 2 – Tabele date și grafice

| | |
|---|----|
| Tabel 1 - Legendă abrevieri | 5 |
| Tabel 2 - Matricile compozițiilor chimice cercetate | 19 |
| Tabel 3 - Parametri laminare T1 | 20 |
| Tabel 4 - Date TTN - T1 | 21 |
| Tabel 5 - Analiză spectrală T1 | 22 |
| Tabel 6 - Rezultate laborator T1 | 22 |
| Tabel 7 - Metalografie T1 | 22 |
| Tabel 8 - Analiză microstructura T1 | 22 |
| Tabel 9- Compoziția chimică M1 | 25 |
| Table 10 - Date trasabilitate brame test M1 | 29 |
| Tabel 11 - Parametri proces tablele laminate cu grosimi 60, 70, 70 și 80 mm | 30 |
| Tabel 12 – Analiză spectrală pe epruvete din cele 2 table de 70 și 80 mm..... | 31 |
| Tabel 13 - Date identificare probe | 32 |
| Tabel 14– Valori rezultate – test tracțiune | 32 |
| Tabel 15 - Tabel valori KV reziliențe longitudinale la -20 °C..... | 32 |
| Tabel 16 - Valori test rezistența la stricțiune Z [%] | 33 |
| Tabel 17 - Date metalografie tabla 70 mm grosime..... | 33 |
| Tabel 18 - Compoziție chimică N2 - MnSiCuNiMoNbTi | 42 |
| Table 19 - Trasabilitate program laminare..... | 42 |
| Tabel 20 - Parametri laminare N2 functie de rutele metalurgice | 42 |

| | |
|---|----|
| Table 21 - Valori: Rm [MPa]; table de 60 mm grosime funcție de stare epruvetă | 45 |
| Tabel 22 - Valori rezultate – test Tracțiune: Rp _{0,2} [MPa]; tabla de 60 mm grosime | 45 |
| Tabel 23 – Valori reziliența testate la -40 ⁰ C | 46 |
| Tabel 24 - Valori reziliența testate la -60 ⁰ C | 46 |
| Tabel 25 - Valori reziliența testate la -76 ⁰ C | 46 |
| Tabel 26 - Valori test rezistența la gatuire Z [%] – tabla 60 mm | 46 |
| Table 27 - Date metalografie tabla 60 mm | 47 |

Anexa 3 - Cuprins figuri

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Elementele componente ale unei caje de laminare cu cilindri orizontali: | 10 |
| Figura 2 - Harta nivel 2 de automatizare | 13 |
| Figura 3 - Sinteza generală generare schema laminare Nivel 2 -SIROLL | 15 |
| Figura 4- Schema laminare fără rotire | 15 |
| Figura 5 - Schemă laminare cu o singura rotire la 90 ⁰ | 16 |
| Figura 6 - Schemă laminare cu doua rotiri la 90 ⁰ | 17 |
| Figura 7 - Calcul TSL funcție de grosime | 20 |
| Figura 8 - Amprenta Baumann - clasa de segregatie 2 - T1 | 22 |
| Figura 9 - Atac nital rezoluție 100x T1- 10 mm grosime | 23 |
| Figura 10 - Atac nital rezoluție 500x T1- 10 mm grosime | 23 |
| Figura 11 - Simulare rută metalurgică TMR | 27 |
| Figura 12 - Schemă laminare simulată | 28 |
| Figura 13 - TSL funcție de grosime | 29 |
| Figura 14 - Variația temperaturii în funcție de trecerile de laminare – tabla 60 mm | 30 |
| Figura 15 – Amprenta Baumann - șarja 935090 - M1 | 31 |
| Figura 16 - M1 70 mm grosime - rezoluție 100 x la față 1 | 33 |
| Figura 17 - SEM - M1 70 mm | 34 |
| Figura 18 - SEM -M1 70 mm | 34 |
| Figura 19 - SEM - M1 70 mm harta incluziuni | 35 |
| Figura 20 - Simulare schema laminare – rută metalurgică N 60mm grosime | 38 |
| Figura 21- Schema laminare simulata - 60 mm grosime | 39 |
| Figura 22 - Simulare schema laminare – rută optimizata CNR - 60 mm grosime | 40 |
| Figura 23 - Schema laminare simulată pe ruta metalurgică optimizată CNR | 41 |
| Figura 24 - variația forței și a cuplului de forța tabla 60 mm grosime pe ruta CNR | 44 |
| Figura 25 - timpi oscilare între trecerile de laminare – test 2 CNR | 44 |
| Figura 26 - Valori reziliența temperaturi testare la -40 ⁰ C | 45 |
| Figura 27 - Sumar analiză incluziuni | 47 |
| Figura 28 - Metalografie la suprafață probelor 100NR/101CNR | 47 |
| Figura 29 - Microstructura la 1/4 ruta CNR | 48 |
| Figura 30 - Harta microstructura proba 101 CNR | 48 |
| Figura 31 - Hartă microstructură | 48 |

Anexa 3 - modificări aduse în N2-AGC

```

“.....
if(COSTEL == tmrCode)
{
cooling_type::cooling_point_type cp;

```

```

value_type aTNR = calculateNormalRollingTemperature(material());
cp.setThickness(lastTurningThickness(*this) - 0.005);
cp.upperTemperature().setValue(3000.0);
cp.upperTemperature().setPosition( cooling_type::temperaturi_target_type::position_type::AVERAGE );
cp.upperTemperature().setActive(BCfalse);
cp.lowerTemperature().setValue(aTNR);
cp.lowerTemperature().setPosition( cooling_type::temperaturi_target_type::position_type::AVERAGE );
cp.lowerTemperature().setActive(BCtrue);
cooling().coolingPoints().push_back(cp);
}
cooling_type::cooling_point_type cp;
cp.setThickness(BC_STD(min)(lastTurningThickness(*this), calculateWaitingThickness(slab(), target(), primDat)));
cp.upperTemperature().setValue(3000.0);
cp.upperTemperature().setPosition( cooling_type::temperaturi_target_type::position_type::AVERAGE );
cp.upperTemperature().setActive(BCfalse);
cp.lowerTemperature().setPosition( cooling_type::temperaturi_target_type::position_type::AVERAGE );
if((TMCP == tmrCode) || (TMR == tmrCode))
{
value_type aTNR = calculateNormalRollingTemperature(material());
value_type aQ2EntryTemp = calculateStartingTemperatureForNormalRolling(aTNR, target());
cp.lowerTemperature().setValue(aQ2EntryTemp);
cp.lowerTemperature().setActive(BCtrue);
}
else
{
cp.lowerTemperature().setValue(3000);
cp.lowerTemperature().setActive(BCfalse);
}
target().temperaturi().setPosition( target_type::temperaturi_target_type::position_type::AVERAGE );
if(AR == tmrCode)
{
target().temperaturi().setValue(3000.0);
target().temperaturi().setActive(BCfalse);
}
else if((COSTEL == tmrCode))
{
value_type anAr3 = calculateAr3(material());
value_type aFinalTemp = calculateFinalRollingTemperatureForAr3(anAr3, target());
target().temperaturi().setValue(aFinalTemp);
target().temperaturi().setActive(BCtrue);
}
value_type anAr3 = calculateAr3(material());
value_type finalThickness = target().minThickness();
value_type finalEpsilon = 0.2;
value_type secondWaitingThickness = finalThickness / (1.0 - finalEpsilon);
cooling_type::cooling_point_type cp;
cp.setThickness(BC_STD(min)(secondWaitingThickness, cooling().coolingPoints().front().thickness() - 0.01));
cp.upperTemperature().setValue(anAr3+15.0);
cp.upperTemperature().setPosition( cooling_type::temperaturi_target_type::position_type::AVERAGE );
cp.upperTemperature().setActive(BCtrue);
cp.lowerTemperature().setValue(anAr3-15.0);

```

```

cp.lowerTemperature().setPosition( cooling_type::temperaturi_target_type::position_type::AVERAGE );
cp.lowerTemperature().setActive(BCtrue);
cooling().coolingPoints().push_back(cp);
.....
void CusPscPrimaryData::show(ostream& out) const
.....
PMPscPrimaryData<double, PMPscPrimaryDataSlab<double>, PMPscPrimaryDataTarget<double, 7>,
PMPscPrimaryDataMaterial<double>, PMPscPrimaryDataCooling<double, 4>,
PMPscPrimaryDataStrategy<double> >::output(out);
.....
CusPscPrimaryData::value_type CusPscPrimaryData::calculateAr3(const material_type& aMaterial) const
value_type result = 915;
result -= 292.0 * aMaterial.chemistry().C;
result -= 72.0 * aMaterial.chemistry().Mn;
result -= 50.0 * aMaterial.chemistry().Ni;
result -= 11.0 * aMaterial.chemistry().Cr;
result -= 50.0 * aMaterial.chemistry().Mo;
result -= 9.0 * aMaterial.chemistry().Cu;
return result;;
CusPscPrimaryData::value_type CusPscPrimaryData::calculateFinalRollingTemperatureForAr3(value_type anAr3,
const target_type& aTarget) const
BC_BEGIN_TRY();
value_type result = anAr3;
value_type finalThickness = aTarget.minThickness();
if(finalThickness < 1e-10)
throw_BCEException("thickness (%f) is zero or even minus", finalThickness);
finalThickness *= 1e3;
result += 180.0 / finalThickness;
return result;
BC_END_TRY("CusPscPrimaryData::calculateFinalRollingTemperatureForAr3() const");
CusPscPrimaryData::value_type CusPscPrimaryData::calculateAc3(const material_type& aMaterial) const
value_type result = 854;
result += 45.0 * aMaterial.chemistry().Si;
result += 1.7 * aMaterial.chemistry().Cr;
result -= 180.0 * aMaterial.chemistry().C;
result -= 14.0 * aMaterial.chemistry().Mn;
result -= 18.0 * aMaterial.chemistry().Ni;
return result;;
CusPscPrimaryData::value_type CusPscPrimaryData::calculateFinalRollingTemperatureForAc3(value_type anAc3,
const target_type& aTarget) const
BC_BEGIN_TRY();
value_type result = anAc3;
value_type finalThickness = aTarget.minThickness();
if(finalThickness < 1e-10)
throw_BCEException("thickness (%f) is zero or even minus", finalThickness);
finalThickness *= 1e3;
result += 50.0;
return result;
BC_END_TRY("CusPscPrimaryData::calculateFinalRollingTemperatureForAr3() const");
.....

```

```

CusPscPrimaryData::value_type CusPscPrimaryData::calculateNormalRollingTemperature(const material_type&
aMaterial) const
if(aMaterial.chemistry().Nb < 0.005 && aMaterial.chemistry().Ti < 0.004 && aMaterial.chemistry().V < 0.005)
    return 935;
value_type result = 887.0;
result += 464.0 * aMaterial.chemistry().C;
result += 890.0 * aMaterial.chemistry().Ti;
result += 363.0 * aMaterial.chemistry().Al;
result -= 357.0 * aMaterial.chemistry().Si;
result += 732.0 * aMaterial.chemistry().V;
result -= 230.0 * sqrt(aMaterial.chemistry().V);
if(aMaterial.chemistry().Nb <= 0.06)
    result += 6445.0 * aMaterial.chemistry().Nb;
    result -= 644.0 * sqrt(aMaterial.chemistry().Nb);
else
    result += 1500.0 * aMaterial.chemistry().Nb;
}
return result;
}
CusPscPrimaryData::value_type CusPscPrimaryData::calculateStartingTemperatureForNormalRolling(value_type
aNormalRollingTemp, const target_type& aTarget) const
{
    BC_BEGIN_TRY();
    value_type result = aNormalRollingTemp;
    value_type finalThickness = aTarget.minThickness();
    if(finalThickness < 1e-10)
        throw_BCEException("thickness (%f) is zero or even minus", finalThickness);
    finalThickness *= 1e3;
    result -= 0.5 * finalThickness;
    return result;
    BC_END_TRY("CusPscPrimaryData::calculateStartingTemperatureForNormalRolling() const");
}
CusPscPrimaryData::value_type CusPscPrimaryData::calculateWaitingThickness(const slab_type& aSlab, const
target_type& aTarget, const PrimaryData::STR_PRIMARYDATA& originalPd) const
{
}
}....."

```


Seria I5 Ingineria materialelor Nr. 8

GALAȚI - 2016



GALAȚI - 2016

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETARI INDUSTRIALE PRIVIND ÎMBUNĂȚĂȚIREA TEHNOLOGIEI DE LAMINARE A OTELURILE
SLAB ALIATE CU CONTINUT DE C ARBON MAI MIC DE 0,2%**

Doctorand

Ing. Costel Durdac (Roibu)

Conducător științific

Profesor Dr. Ing. Elena Drugescu