



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI**

**ȘCOALA DOCTORALĂ  
DE ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR**

**TEZĂ DE DOCTORAT  
REZUMAT**

**CONCEPTE MODERNE PRIVIND OȚELURILE  
PENTRU STRUCTURA DE REZISTENȚĂ A  
AUTOVEHICULELOR RUTIERE**

**Doctorand: ing. Mircea Cristian Pantilimon**

**Coducători de doctorat:**

**Prof. Univ. Dr. Ing. Cristian PREDESCU**

**Prof. Univ. Dr. Ing. Constantin BACIU**

**Comisia pentru evaluare și susținere publică**

**Președinte**

**Prof. dr. ing. Vasile ANTONIAC**

*Universitatea Politehnica din București*

**Conducător de doctorat**

**Prof. dr. ing. Cristian PREDESCU**

*Universitatea Politehnica din București*

**Prof. dr. ing. Constantin BACIU**

*Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași*

**Referenți științifici**

**Prof. dr. ing. Petrică VIZUREANU**

*Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași*

**Prof. dr. ing. Aurel CRIȘAN**

*Universitatea TRANSILVANIA din Brașov*

**Conf. dr. ing. Sorin CIUCĂ**

*Universitatea Politehnica din București*

**București, 2020**



## Cuprins

<b>INTRODUCERE .....</b>	<b>5</b>
<b>Listă de Tabele .....</b>	<b>9</b>
<b>Listă de Figuri .....</b>	<b>10</b>
<b>Cap 1. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL OȚELURILOR UTILIZATE LA CONSTRUCȚIA STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A AUTOMOBILELOR .....</b>	<b>13</b>
1.1. Oțeluri utilizate la structura de rezistență a autovehiculelor .....	13
1.2. Clasificarea oțelurilor utilizate la fabricarea autovehiculelor.....	16
1.2.1.Oțeluri cu deformabilitate ridicată .....	16
1.2.2. Oțeluri IF de înaltă rezistență.....	16
1.2.3.Oțeluri avansate de înaltă rezistență – AHSS.....	18
1.2.4.Oțeluri martensitice.....	20
1.3 Concluzii.....	22
<b>Cap.2. OȚELURI TRIP UTILIZATE LA FABRICAȚIA AUTOVEHICULELOR .....</b>	<b>23</b>
2.1. Aspecte generale ale transformării martensitice.....	24
2.1.1. Transformarea plastică .....	25
2.1.2. Elemente de aliere în oțelurile TRIP.....	25
2.2. Etape de procesare a oțelurilor TRIP .....	27
2.3. Performanța mecanică a oțelurilor TRIP.....	27
2.3.1. Rezistența la impact .....	28
2.3.2. Rezistența la oboseală .....	29
2.4. Proprietăți speciale.....	29
2.4.1. Deformabilitatea.....	29
2.4.2. Deformabilitatea la întindere.....	30
2.4.3. Factorii care afectează performanța.....	30
2.5. Tratamente termice de formare a oțelurilor TRIP .....	32
2.6. Teste mecanice pentru caracterizarea oțelurilor TRIP .....	34
2.7. Rezultate ale testelor mecanice documentate în literatura de specialitate .....	39
2.7.1 Exemplul 1 (CMnAl-TRIP) .....	39
2.7.2 Exemplul 2 (oțel Fe-Mn – Al – C laminat la cald) .....	43
2.7.3 Exemplul 3 (Oțeluri de mare rezistență Fe - Mn - (Al, Si) TRIP / TWIP).....	45
2.8 Concluzii.....	46
<b>Cap. 3. METODOLOGIA CERCETĂRILOR ȘI TEHNICI DE ANALIZĂ FOLOSITE PENTRU REALIZAREA OBIECTIVELOR .....</b>	<b>47</b>
3.1. Scopul și obiectivele cercetărilor .....	47
3.2. Metodologia cercetărilor.....	47
3.3. Cercetările experimentale .....	49

3.4. Materiale utilizate în cadrul cercetărilor .....	49
3.5. Elaborarea oțelurilor TRIP pentru cercetarile experimentale.....	50
3.6. Tehnici de analiză utilizate pentru realizarea obiectivelor .....	50
3.6.1. Analiza compoziției chimice.....	50
3.6.2. . Analiza metalografică prin microscopie optică .....	51
3.6.3. . Analiza durității.....	51
3.6.4. Analiza prin microscopie electronică de baleiaj (SEM) și spectroscopie de raze X prin dispersie de energie (EDX) .....	52
3.6.5. Analiza structurală prin difracție de raze X (XRD) .....	52
3.6.6. Mașina de testare la impact .....	52
<b>Cap. 4. ELABORAREA OȚELURILOR TRIP ÎN CUPTORUL CU INDUCȚIE ÎN VID ȘI ATMOSFERĂ CONTROLATĂ .....</b>	<b>53</b>
4.1. Selecția compoziției chimice optime pentru oțelurile TRIP.....	53
4.2. Alegerea compozițiilor aliajelor și a materiilor prime utilizate la elaborare .....	56
4.3. Elaborarea oțelurilor TRIP .....	57
4.4. Analiza metalografică prin microscopie optică după turnare a oțelurilor elaborate .....	60
4.5. Incercari de duritate dupa turnarea oțelurilor TRIP .....	65
4.6. Laminarea și normalizarea oțelurilor TRIP elaborate .....	66
4.7. Analiza metalografică prin microscopie optică a probelor laminate și normalizate.....	70
4.8. Încercări la duritate pe oțelurile TRIP laminate și normalizate.....	75
4.9. Concluzii.....	77
<b>Cap. 5. CERCETĂRI PRIVIND TRATAMENTUL TERMIC AL OȚELURILOR TRIP REALIZATE ÎN VEDEREA FORMĂRII AUSTENITEI REZIDUALE NECESARE REALIZĂRII EFECTULUI TRIP .....</b>	<b>78</b>
5.1. Tratamentul termic al oțelurilor TRIP realizate .....	78
5.2. Investigarea structurii prin micoscopie optică după tratamentul termic neconvențional.....	80
5.3. Investigarea structurii prin Microscopie Electronică de Baleiaj (SEM) după tratamentul termic neconvențional.....	86
5.4. Încercări de duritate pentru oțelurile tratate termic .....	89
5.5. Determinarea conținutului de austenită reziduala prin metoda difracției de raze X.....	91
5.6. Concluzii.....	96
<b>Cap. 6. CERCETĂRI ASUPRA COMPORTĂRII LA IMPACT A OȚELURILOR TRIP EXPERIMENTATE .....</b>	<b>97</b>
6.1. Considerații teoretice .....	97
6.2 Scopul și cercetările experimentale.....	97
6.3 Metodică experimentală.....	98
6.3.1 Încercările la impact.....	98
6.3.2 Analiza cantitativă a austenitei reziduale .....	99
6.3.3 Analiza structurală prin microscopie electronică .....	101

6.3.4 Încercări asupra durității .....	101
6.4 Rezultate experimentale .....	101
6.4.1 Comportarea la impact.....	101
6.4.2 Mecanismul efectului TRIP .....	106
6.5 Evaluarea efectului TRIP .....	114
6.6 Concluzii .....	116
<b>Cap.7. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....</b>	<b>119</b>
7.1 Concluzii Generale.....	119
7.2 Contribuții originale .....	125
7.3 Direcții viitoare ale cercetărilor științifice .....	126
<b>Bibliografie .....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXE</b>	
<b>140</b>	

## **Cuvinte cheie:**

- **TRIP**
- **Oțel**
- **Microscopie electronica de baleiaj**
- **Austenită reziduală**
- **Teste mecanice**
- **XRD**
- **Microscopie optică**



## *Cuvânt înainte*

Autorul dorește să mulțumească pe aceasta cale tuturor acelor care au contribuit în mod deosebit la finalizarea tezei de doctorat.

Profundă recunoștință și mulțumiri domnilor profesori universitari Cristian Predescu și Constantin Baci, conducătorii științifici, pentru îndrumarea pe parcursul derulării cercetărilor, fiind permanent alături cu propuneri și indicații în fundamentarea teoretică și experimentală a tezei precum și la elaborarea finală a acesteia.

În mod deosebit aș dori să adresez mulțumiri referenților oficiali: domnului Prof. dr. ing. Petrică Vizureanu, domnului Prof. dr. ing. Aurel Crișan, domnului Conf. dr. ing. Sorin Ciucă pentru onoarea de a accepta să evalueze prezenta teză de doctorat și domnului Prof. dr. ing. Iulian Vasile Antoniac pentru onoarea că a acceptat calitatea de președinte al comisiei de evaluare.

Mulțumiri deosebite pentru sfaturile primite și pentru încrederea și sprijinul acordat în finalizarea și susținerea tezei de doctorat, domnului conferențiar universitar Sorin Ciucă. Mulțumiri domnului conf. Cătălin Ducu de la Centrul Regional de Cercetare-Dezvoltare pentru Materiale, Produse și Procese Inovatoare destinate Industriei de Automobile din cadrul Universității din Pitești.

Pentru ajutorul acordat în realizarea experimentelor, mulțumiri colegilor mei, profesor Mirela Sohaciu, profesor Ecaterina Matei, conf. Andra Predescu, șef lucrări Andrei Berbecaru, șef lucrări George Coman, asistent Claudia Tarcea, ACS Cătălin Grădinaru și tuturor celorlalți colegi de al căror ajutor m-am bucurat pe parcursul realizării tezei de doctorat.

Mulțumiri tuturor cadrelor didactice din Departamentul PMME, întregului personal tehnic de la Centrul ECOMET, colegilor doctoranzi, prietenilor care m-au încurajat și susținut.

Nu în ultimul rând, calde mulțumiri familiei care a fost alături de mine pe toată perioada elaborării lucrării.

## INTRODUCERE

Utilizarea oțelurilor cu proprietăți speciale în industria automobilelor este condiționată de doi factori majori: eficiența consumului de combustibil și sporirea siguranței habitaculului în caz de accident.

Eficiența consumului de combustibilului este dependentă în principal de greutatea pieselor de oțel, care, la rândul lor, sunt dictate de ecartament și de design.

Siguranța este determinată de capacitatea de absorbție a energiei în elementele de oțel din structura de rezistență a autovehiculului, elemente care se deformează în timpul impactului la accident.

Ambii factori sunt stimulente puternice pentru utilizarea oțelurilor avansate, de înaltă rezistență (AHSS) în construirea structurii de rezistență a autovehiculelor, înlocuind oțelurile convenționale utilizate pentru fabricarea pieselor auto. Oțelurile ușor deformabile sunt, în general, oțeluri cu conținut scăzut de carbon, complet sau parțial stabilizate prin elemente de aliere cum ar fi Ti sau Nb.

Cerințele stricte stabilite de industria auto pentru siguranța pasivă, reducerea greutateii și economisirea de energie, au dus la dezvoltarea unui nou grup de oțeluri cu proprietăți îmbunătățite. Recent, au fost dezvoltate diferite tipuri de oțeluri de înaltă rezistență menite să satisfacă aceste cerințe ale industriei automobilelor. Principala problemă a acestor oțeluri derivă din defectele multiple asociate cu deformabilitatea lor inferioară, astfel încât întărirea rezistenței fără deteriorarea caracteristicilor de deformabilitate rămâne una dintre cele mai importante obiective ale dezvoltării materialelor destinate industriei automotiv.

AHSS este un termen general folosit pentru a descrie diferite familii de oțeluri. Cel mai comun AHSS este oțelul duplex cu microstructură ferită-martensită.

O clasă importantă de AHSS este oțelul multifazat care are o microstructură complexă constând din diferiți constituenți de fază și un randament ridicat al raportului de rezistență la tracțiune. Oțelurile cu plasticitate indusă de transformare (TRIP) reprezintă cea mai recentă clasă de oțeluri AHSS care prezintă un interes crescut pentru producătorii de automobile. Aceste oțeluri constau dintr-o microstructură ferită-bainită cu o cantitate semnificativă de fază austenitică reziduală și se remarcă prin cea mai bună combinație de rezistență și alungire dintre oțelurile AHSS în uz. Pentru anumite părți componente ale caroseriei autovehiculelor se



folosesc, de asemenea, oțeluri martensitice cu rezistențe mecanice foarte mari.

Utilizarea acestor oțeluri este clasificată în două categorii majore: panouri de caroserie exterioară și elemente de structură de rezistență cuplate la caroserie.

În cazul panourilor de caroserie exterioară, eforturile de diminuare continuă a consumului de combustibil s-au concretizat în reducerea greutateii acestor elemente. Suplimentar față de rezistența la încovoiere, o altă cerință pentru panourile de caroserie exterioară este rigiditatea și, ca urmare, chiar în cazul oțelurilor cu o rezistență sporită grosimea nu poate fi redusă sub un anumit minim care îndeplinește cerința de rigiditate.

Pentru elementele de structură de rezistență cuplate la caroserie, obiectivul major este reducerea greutateii, cu un accent sporit asupra performanțelor de siguranță.

Oțelurile multifazice TRIP (Transformation Induced Plasticity) sunt o nouă generație de oțeluri aliate, caracterizate de o combinație îmbunătățită de rezistență și ductilitate care satisface cerințele industriei auto. Fabricarea oțelurilor utilizează fenomenul TRIP, care constă în transformarea austenitei reziduale în martensită odată cu deformarea plastică, aceasta fiind responsabilă pentru proprietățile rezultante remarcabile. Aceste oțeluri au rezistență mecanică ridicată și prezintă o alungire uniformă considerabilă înainte de rupere.

Prin urmare, în plus față de rezistență, siguranța automobilelor necesită ca aliajele să prezinte o ductilitate considerabilă. Deformabilitatea este necesară pentru a permite formele complexe ale pieselor auto, alegerea materialelor trebuind să fie potrivită pentru condițiile de încărcare și pentru mediul de exploatare al acestora.

Trei elemente asigură controlul asupra proprietăților mecanice ale oțelului: compoziția sa chimică, prelucrarea și tratamentul termic, toate conducând la setarea microstructurii finale a acestuia.

Transformarea martensitică indusă de stresul local are ca efect ameliorarea concentrațiilor de stres, creșterea vitezei de durificare prin prelucrare și promovarea deformării omogene, cu îmbunătățiri ulterioare ale rezistenței, ductilității și durității oțelurilor.

*Teza de doctorat își propune elaborarea, prelucrarea, tratarea și testarea unui nou oțel TRIP, cu proprietăți superioare comparativ cu alte trei oțeluri existente de același tip, cu o microstructură care să conducă la o creștere a rezistenței mecanice fără deteriorarea ductilității, oferind combinații foarte atractive de rezistență și ductilitate, datorate coexistenței*

*fazelor.*

Lucrarea cuprinde **6** capitole, conține **160** pagini, un capitol de concluzii și contribuții originale precum și bibliografia.

**Capitolul 1** prezintă stadiul actual al cunoașterii în domeniu pe plan internațional, raportat la cele mai recente referințe din literatura de specialitate.

În **capitolul 2** sunt prezentate condițiile de tratament termic prezente în literatură precum și influența fiecărui element de aliere utilizat în compozițiile oțelurilor TRIP ce vor fi elaborate și studiate în teza de doctorat. Capitolul 2 are în structura sa și rezultate din literatura de specialitate ale efectelor testelor de impact atât asupra structurii oțelurilor TRIP cât și asupra compoziției fazelor acestora.

Metodologia cercetărilor și tehnicile de analiză utilizate pentru realizarea obiectivelor sunt prezentate în **capitolul 3**. În acest capitol sunt prezentate ideile generale care au dus la studiul experimental al oțelului TRIP nou, precum și datele legate de materiile prime utilizate pentru elaborarea oțelurilor. De asemenea, sunt evidențiate analizele care s-au efectuat pentru determinarea structurii aliajelor, pentru demonstrarea prezenței efectului TRIP la deformare precum și echipamentele utilizate pentru aceste încercări și caracterizări.

**Capitolul 4** prezintă cercetările experimentale privind elaborarea celor 4 oțeluri TRIP în cuptorul cu inducție în vid și atmosferă controlată. Au fost elaborate, în vid și atmosfera controlată, trei oțeluri TRIP cunoscute și oțelul TRIP de concepție proprie. Acest capitol oferă informații legate de modul în care s-a ajuns la determinarea compoziției noi a oțelului TRIP elaborat, o detaliere a influenței elementelor de aliere introduse în compoziția oțelurilor, analize de microscopie optică și de duritate efectuate după elaborare, după deformare plastică și normalizare a structurii, fiind detaliată fiecare etapă de procesare.

În **capitolul 5** sunt prezentate cercetările experimentale privind tratamentul termic al oțelurilor realizate în vederea obținerii efectului TRIP. Acest capitol se concentrează pe evidențierea parametrilor tratamentului termic neconvențional aplicat pentru obținerea austenitei reziduale în compoziția fazică a oțelurilor precum și analize de microscopie optică, microscopie electronică de baleiaj, duritate și difracție de raze X efectuate pentru evidențierea structurii aliajelor elaborate.

**Capitolul 6** prezintă cercetările experimentale privind comportarea la impact a oțelurilor TRIP. Sunt prezentate atât modul de lucru pentru efectuarea testelor de impact precum și echipamentul utilizat. Rezultatele experimentale în urma testelor arată existența unei deformări care permite imediat după șoc o absorbție ridicată de energie în urma impactului, urmată de o

durificare semnificativă datorată transformării structurale prin transformarea unei părți importante din austenita reziduală în martensită. Analizele efectuate asupra oțelurilor evidențiază existența transformării în urma șocului mecanic a austenitei în martensită.

În **capitolul 7** sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile originale și noile direcții de cercetare.

## Cap 1. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL OȚELURILOR UTILIZATE LA CONSTRUCȚIA STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A AUTOMOBILELOR

Pentru a satisface într-un procent cât mai mare exigențele manifestate față de calitatea, performanțele, siguranța și costul autovehiculelor, preocupările specialiștilor converg în direcția valorificării în practică a celor mai noi tehnologii din domeniul metalurgiei, automatizării și robotizării proceselor de fabricație și montaj.

Un rol important în construcția autovehiculelor îl au materialele. Pentru modelele de viitor, firmele producătoare de autoturisme au extins nomenclatorul reperelor ce urmează a fi realizate din materiale neconvenționale. Astfel, se urmărește utilizarea în număr cât mai mare a reperelor realizate din materiale cu greutate specifică mică, sau de dimensiuni reduse, dar cu rezistență mecanică ridicată.

### 1.1. Oțeluri utilizate la structura de rezistență a autovehiculelor

Oțelul reprezintă în continuare un material de bază pentru construcția autovehiculelor. Alegerea oțelului pentru zonele critice de siguranță urmează două direcții generale. Aceste direcții se bazează pe principiul că, într-o decelerare bruscă ca urmare a unui accident, energia trebuie să fie disipată într-o manieră controlată, astfel încât decelerarea ocupanților să nu depășească anumite limite, maximizând supraviețuirea și minimizând riscurile de vătămare [1].

În figura 1.1 sunt prezentate oțelurile utilizate în industria automotive.

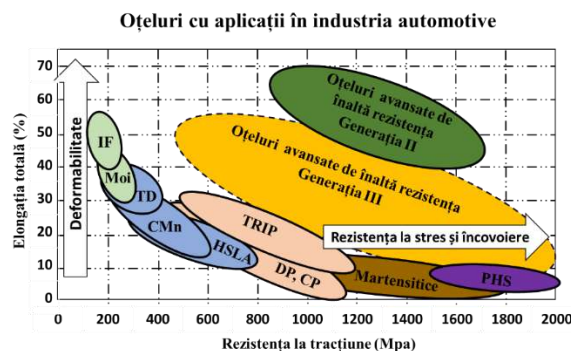
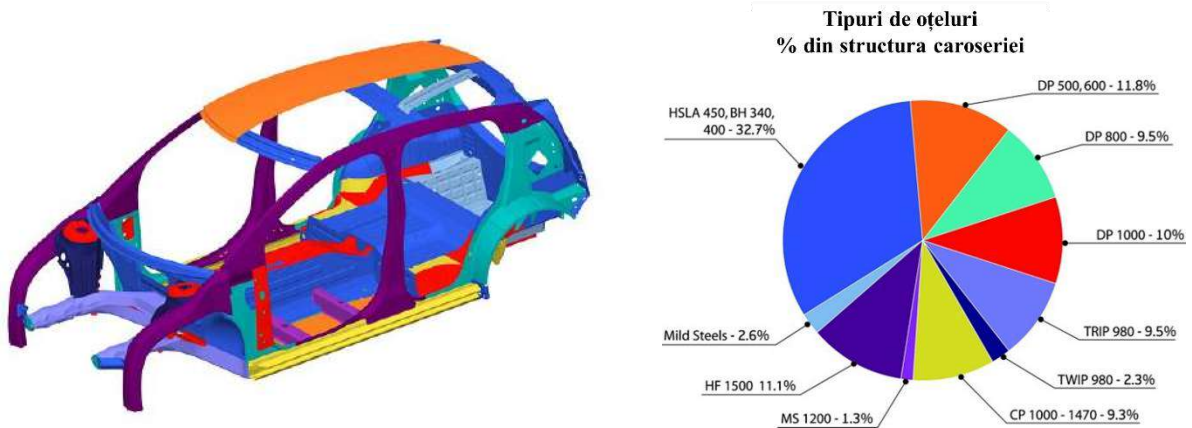


Fig. 1. 1. Oțeluri cu aplicații în industria automotive [2]

Cealaltă direcție pentru proiectarea unei structuri sigure a vehiculelor este așa-numita

"celulă de siguranță" care impune ca habitacul să reziste la impact și să-și mențină integritatea, protejând astfel pasagerii. Acest lucru permite inginerilor să proiecteze interiorul mașinii asigurând o poziție sigură a pasagerilor în timpul eventualelor evenimente datorate accidentelor [3]. În figura 1.2 este prezentat designul unei caroserii cu amplasarea elementelor de oțel din structura de rezistență a unui automobil.



**Fig. 1. 2** Amplasarea și ponderea fiecărui tip de oțel în elementele constructoare ale unui automobil - [4]

### Clasificarea oțelurilor utilizate la fabricarea autovehiculelor

- Oțeluri cu deformabilitate ridicată
- Oțeluri IF de înaltă rezistență
  - Oțeluri IF de înaltă rezistență - HSIF
  - B) Oțeluri IF de înaltă rezistență cu tratament de durificare - HSIF-BH
- Oțeluri avansate de înaltă rezistență – AHSS
  - Oțeluri duplex laminate la rece
  - Oțel duplex galvanizat și normalizat
  - Oțeluri duplex galvanizate
- Oțeluri martensitice

### Cap.2. OȚELURI TRIP UTILIZATE LA FABRICAȚIA AUTOVEHICULELOR

Dintre diferitele oțeluri aparținând familiei AHSS, oțelurile asistate TRIP posedă cele mai bune proprietăți mecanice în ceea ce privește o combinație de înaltă rezistență/ alungire și valoarea exponentului de durificare a tensiunii [5]. Acest lucru generează o deformabilitate excelentă în producție și face ca oțelurile asistate TRIP să fie utilizate la fabricarea componentelor structurale pentru automobile [6]. În plus, o siguranță sporită a pasagerilor este asigurată de îmbunătățirea calității acestor oțeluri [7].

Acronimul TRIP pentru plasticitatea indusă de transformare a fost inițial dat de Zackay et al. [8] pentru a clasifica toate aliajele cu o combinație unică de înaltă rezistență și deformabilitate îmbunătățită ca urmare a transformării induse de deformare a austenitei în martensită, rezultând în creșterea vitezei de durificare, ceea ce duce la o întârziere a debutului răsturnării (efectul TRIP).

În figura 2.1 este prezentată o ilustrație a microstructurilor tipice ale diferitelor tipuri de oțeluri AHSS.

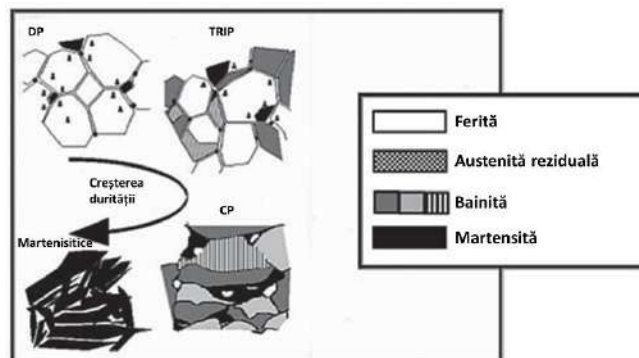


Fig. 2. 1 *Ilustrație a microstructurilor tipice ale diferitelor AHSS. (DP: oțel cu dublă fază, TRIP: oțel asistat TRIP, CP: oțel cu fază complexă, MART: oțel martensitic) [9].*

În tabelele 2.1 sunt prezentate dimensiunile tipice ale diferitelor faze în tipurile de oțeluri AHSS ilustrate în figura 3, iar în tabelul 2.2 sunt prezentate proprietățile mecanice ale oțelurilor TRIP.

**Tabel 2. 1 Dimensiuni tipice ale diferitelor faze [10]**

Oțel	Ferita (%)	Martensita (%)	Bainita (%)	Austenita retinuta (%)
DP	0.80-0.85	0.15-0.20	—	—
TRIP	0.55-0.65	—	0.25-0.35	0.05-0.20
CP	0.05-0.10	0.05-0.10	0.80-0.90	—
MART	—	1.0	—	—

**Tabel 2. 2 Proprietățile mecanice ale oțelurilor TRIP**

<b>Produs</b>	<b>T<sub>smîn</sub> (MPa)</b>	<b>YS (MPa)</b>	<b>Te<sub>mîn</sub> (%)</b>
<b>590 TRIP</b> (laminat)	590	350-495	31
<b>780 TRIP</b> (laminat)	780	410-500	21
<b>590 TRIP</b> (galvanizat și calit)	590	360-510	26
<b>590 TRIP</b> (galvanizat)	590	380-480	27
<b>780 TRIP</b> (galvanizat și calit)	780	410-560	19
<b>780 TRIP</b> (galvanizat)	780	440-500	21

### 2.1.2. Elemente de aliere în oțelurile TRIP

Carbonul îmbunătățește austenita prin întărirea soluției solide interstițiale și crește stabilitatea acesteia, difuzează și se poate îmbogăți în austenită în timpul transformării bainitice. Stresul sau nivelul de tensiune la care austenita reziduală începe să se transforme în martensită poate fi controlat prin ajustarea conținutului de carbon.

Austenita poate fi stabilizată de carbon numai dacă acesta nu este consumat prin formarea de cementită. Siliciul este adăugat pentru a inhiba formarea cementitei în timpul transformării bainitice. Nivelul minim de siliciu necesar pentru a suprima în mod eficient formarea cementitei este ~ 0,8%. Aluminiul are o influență mai scăzută decât siliciul pentru întârzierea formării cementitei, la aceeași concentrație în greutate. Prezența aluminiului în oțel contribuie la un efect TRIP remarcabil în timpul încercărilor de tracțiune datorită cantității mari de austenită reziduală.

Manganul din oțelul TRIP este necesar pentru a obține o duritate ridicată și nu are efecte adverse asupra umectării reactive în timpul acoperirii. Niobiu în soluție solidă scade temperatura de pornire a martensitei și întârzie precipitarea carburilor în timpul transformării bainitei, măbind astfel cantitatea de austenită reziduală [11-12].

Molibdenul este un agent de întărire a soluției solide de ferită și întârzie puternic formarea de perlită, scăzând atât rata de nucleere cât și rata de creștere. Aceste fenomene sunt cele mai eficiente elemente de suprimare a formării perlitului și, prin urmare, Molibdenul este deosebit de bun în reducerea ratei critice de răcire pentru formarea bainitelor [13].

Cuprul, fiind un stabilizator austenitic, ajută la menținerea austenitei. Pe lângă consolidarea soluției solide, precipitațiile fine de cupru din ferită pot crește puterea generală. Astfel, se poate avea în vedere înlocuirea siliciului cu cuprul atât în rolurile de reținere a austenitei, cât și în creșterea rezistenței feritei.[14]

**Tabel 2.3** Compozițiile chimice tipice (% în greutate) ale oțelurilor asistate de TRIP [11, 15-16]

C	Si	Mn	Al	P	Nb	Mo	Cu	Cr	Ni
0.38	1.53	0.83		0.007					
0.18	2.0	1.5	0.037	0.015					
0.19	2.48	1.49	0.036	0.014					
0.11	0.59	1.55	1.5	0.012					
0.14	0.53	1.57		0.204					
0.22	1.55	1.55	0.028		0.035				
0.20	1.48	1.44	0.04	0.004	0.109				
0.20	1.47	1.51	0.028	0.004	0.047	0.2			
0.20	1.6	1.6	0.028		0.041	0.3			
0.21	1.49	1.49	0.028	0.005	0.017	0.1			
0.14	1.49	1.51	0.04	0.0012			0.51		
0.15	1.52	1.51					0.51	0.39	
0.15	1.55	1.50					0.51		0.41

## 2.2. Etape de procesare a oțelurilor TRIP

Microstructura oțelurilor TRIP în prezent constă în mod obișnuit dintr-o matrice de ferită continuă, cu bainită și o fracție de volum de austenită reziduală metastabilă ca alte faze.

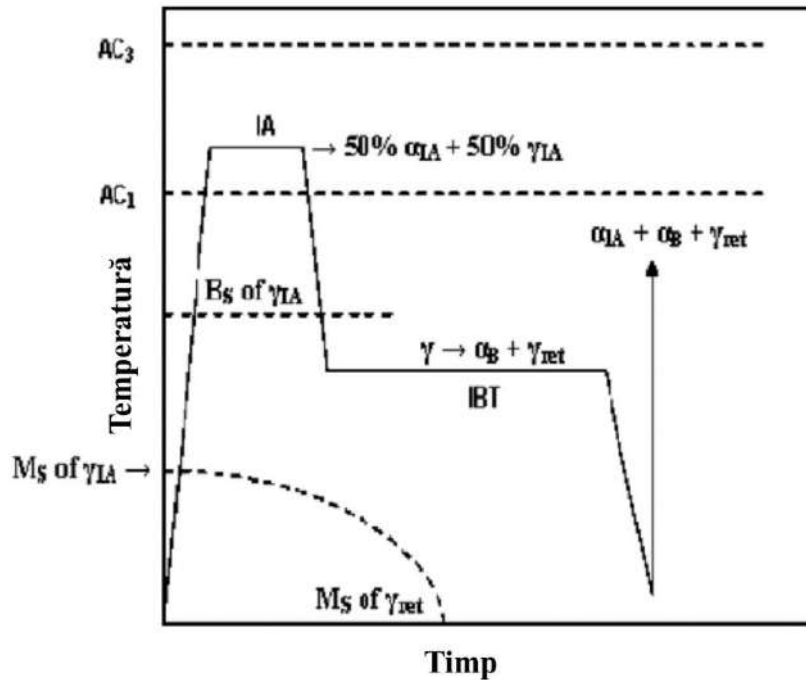
În general, se utilizează un tratament termic în două etape. Prima etapă a tratamentului termic se efectuează în regiunea de ferită ( $\alpha$ ) austenită ( $\gamma$ ) în două faze și se numește tratarea prin intercalare (IA). În timpul acestui tratament se recrystalizează structura laminată la rece, are loc dizolvarea particulelor de perlită și carbură și formarea austenitei.

Dezvoltarea microstructurală în diferite stadii ale tratamentului termic a fost elucidată de către Chen et al.[17]. Diversele transformări de fază care au loc în timpul diferitelor etape de prelucrare sunt clar evidențiate. Oțelurile TRIP, așa cum s-a descris mai sus, pot fi produse fie prin laminare la rece (CR), fie prin laminare la cald (HR), dar majoritatea oțelurilor moderne TRIP sunt produse prin laminare la rece.

## 2.5. Tratamente termice de formare a oțelurilor TRIP

Microstructura oțelurilor asistate TRIP se obține prin efectuarea unui tratament termic în două etape după laminarea la rece după cum se poate observa în figura 2.6.





**Fig. 2. 2** Représentarea schematică a ciclului termic utilizat pentru a obține microstructura tipică TRIP.[18]

Prima etapă a tratamentului termic se efectuează la o temperatură ușor mai ridicată în regiunea bidirecțională  $\alpha + \gamma$ , conducând la o microstructură de aproximativ 50% austenită și 50% ferită. O viteză rapidă de răcire după recoacere este utilizată pentru a evita orice formare majoră a feritei, iar transformarea finală se efectuează izoterm în regiunea bainitei (tratamentul termic în a doua etapă). În timpul formării bainitei, carbonul difuzează în insulele austenitice. Îmbogățirea austenitei cu carbon mărește stabilitatea termică și, în consecință, austenita poate fi menținută la răcirea la temperatura camerei.

## 2.6. Teste mecanice pentru caracterizarea oțelurilor TRIP

Majoritatea datelor publicate se referă la fiabilitatea unui oțel care prezintă absorbție de energie în timpul unui test dinamic; în mod obișnuit, teste la tracțiune [2, 4, 19] sau teste de compresiune [20]. Unele documente [2, 4, 20] au un punct de vedere mecanic, prezentând rezultate interesante ale testelor dinamice, care includ adesea metoda de finisare puternică (FEM) pentru a simula rezultatele. Cu toate acestea, aceste studii nu efectuează niciodată analize metalografice ale oțelurilor testate, cu excepția unui scurt comentariu asupra microconstituțiilor prezente, adnotate prin „laminare la cald” sau „laminare la rece”.

În cazul oțelurilor TRIP acestea trebuie analizate extensiv înainte testărilor pentru a determina posibilitatea utilizării acestora în domeniul construcțiilor de autovehicule.

În ceea ce privește oțelurile TRIP complet austenitice, răspunsul mecanic al oțelurilor multifazate ajutate de TRIP depinde foarte mult de tensiunea hidrostatică datorată componentei de dilatare a tensiunii de transformare [21].

Oțelurile multifazate de tip TRIP și oțelurile TRIP complet austenitice diferă, de asemenea, în ceea ce privește cantitățile de elemente de aliere, care influențează puternic energia defectelor de rețea a austenitei și, prin urmare, modul în care se transformă austenita.

## Cap. 3. METODOLOGIA CERCETĂRILOR ȘI TEHNICI DE ANALIZĂ FOLOSITE PENTRU REALIZAREA OBIECTIVELOR

### 3.1. Scopul și obiectivele cercetărilor

Scopul și obiectivul principal al cercetărilor îl reprezintă proiectarea și realizarea unui oțel TRIP cu compoziție chimică nouă cu caracteristici superioare, care să fie utilizat la structura de rezistență a caroseriei automobilelor. În acest sens, direcția de cercetare parcurge următorii pași:

- evaluarea datelor din literatura de specialitate referitoare la oțelurile TRIP utilizate la construcția autovehiculelor;
- elaborarea a trei tipuri de oțeluri TRIP existente în tehnologiile actuale și elaborarea unui nou oțel TRIP;
- prelucrarea mecanică prin laminare al oțelurilor elaborate;
- efectuarea tratamentelor termice ale oțelurilor elaborate;
- determinarea comportamentului la șoc al oțelurilor TRIP realizate; pentru experiment s-a ales o viteză de 60 km/h ca cea utilizată la testele Euro NCAP;
- caracterizarea fizico-mecanică a oțelului nou comparativ cu cele trei oțeluri existente, în toate fazele: elaborare, laminare, tratament termic, șoc;
- stabilirea cantității de austenită reziduală transformată în martensită după impact;
- diseminarea rezultatelor cercetării în vederea asigurării valorificării practice a oțelurilor concepute.

### 3.2. Metodologia cercetărilor

Metodologia de cercetare a avut ca baza de pornire stadiul actual al cercetărilor în domeniu, constatat în urma studierii literaturii de specialitate. Astfel, influența impactului asupra transformării austenitei reziduale în martensită la oțelurile TRIP și creșterea rezistenței mecanice a acestora nu este încă pe deplin fundamentată științific. Necesitatea continuării cercetărilor derivă din efectul de diminuare a impactului accidentelor de circulație asupra integrității oamenilor. Pentru atingerea acestui deziderat sunt necesare soluții și intervenții imediate privind calitatea materialelor metalice utilizate la structura de rezistență a autovehiculelor și a tehnologiei de realizare a acestora, în vederea preluării energiei de impact urmată de creșterea rezistenței mecanice.

În baza celor prezentate, a fost întocmit planul de cercetare având în vedere următoarele aspecte:

**1) Justificarea necesității abordării temei de cercetare**, ca subiect major al științei materialelor, cu accent pe comportarea la impact a oțelurilor TRIP din componența structurii de rezistență a autovehiculelor;

**2) Contribuțiile la dezvoltarea și perfecționarea tehnologiilor de elaborare și prelucrare a oțelurilor TRIP utilizate la fabricarea autovehiculelor.**

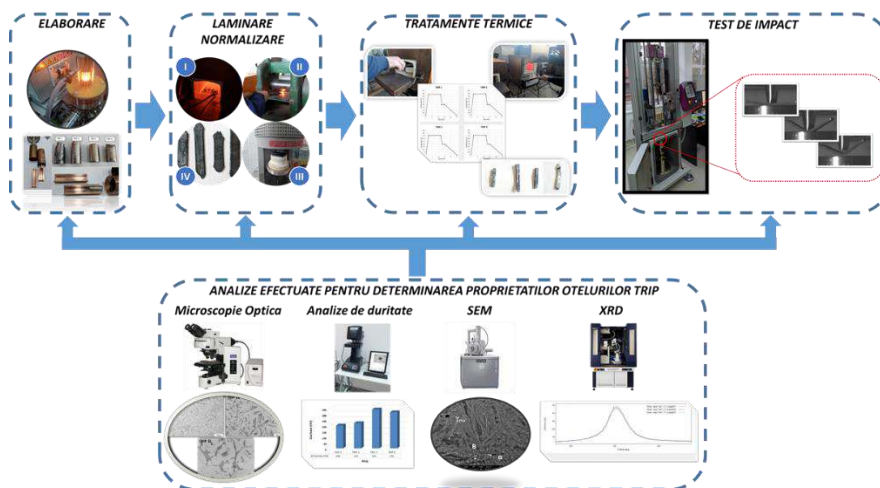
Prin acest obiectiv se fundamentează științific posibilitățile de definire, elaborare și prelucrare mecanică a unor oțeluri TRIP utilizate la structura de rezistență a autovehiculelor în scopul îmbunătățirii calității acestora. Astfel, vor fi abordate subiecte precum:

- a) Stadiul actual al cunoașterii în domeniul oțelurilor TRIP pe plan internațional, raportat la referințele din literatura de specialitate;
- b) Mecanismul procesului de formare a austenitei reziduale în oțelurile TRIP;
- c) Realizarea unui oțel TRIP nou cu compoziție precizată și cu proprietăți îmbunătățite;
- d) Analiza critică comparativă a rezultatelor cercetărilor.

**3) Contribuții la dezvoltarea tehnologiilor și tehnicilor de obținere a unor elemente din structura de rezistență a autovehiculelor**, vizând următoarele aspecte concrete:

- a) Cercetări experimentale privind îmbunătățirea calității oțelurilor utilizate la structura de rezistență a autovehiculelor;
- b) Cercetări experimentale privind comportarea la impact a oțelurilor TRIP.

În figura 3.1. este prezentată schematic structura planului de cercetare al tezei de doctorat.



**Fig. 3. 1** Schema procesului de elaborare și testare a oțelurilor TRIP cercetate

## Cap. 4. ELABORAREA OȚELURILOR TRIP ÎN CUPTORUL CU INDUCȚIE ÎN VID ȘI ATMOSFERĂ CONTROLATĂ

Pentru realizarea cercetărilor experimentale s-au realizat 4 tipuri de oțeluri TRIP, oțeluri care au fost supuse proceselor de prelucrare, tratamente termice, șoc și caracterizare fizico-structurală.

#### 4.1. Selecția compoziției chimice optime pentru oțelurile TRIP

Elementele de aliere prezente în compoziția chimică a celor 4 oțeluri propuse pentru experimentări – Mn, Si, Al au fost alese cu mult raționament. Pe de-o parte ele trebuie să asigure caracteristicile tehnologice clasice pentru care au fost elaborate și, pe de altă parte, să completeze într-o manieră modernă caracteristicile de exploatare.

În categoria caracteristicilor tehnologice, Mn, Si și Al nu trebuie să afecteze negativ deformabilitatea plastică (mai cu seamă la rece) la care sunt supuse tablele din care se confecționează părțile constitutive ale unei caroserii auto.

#### 4.3. Elaborarea oțelurilor TRIP

Elaborarea oțelurilor a fost realizată într-un cuptor cu inducție, vid și atmosferă controlată tip Five CELES(model ALU 600), prezentat în fig.4.1. Utilizarea acestui tip de cuptor de elaborare permite eliminarea posibilelor contaminări și oxidări a topiturii metalice și, de asemenea, asigură turnarea în condiții de omogenitate structurală și compozițională a șarjei.



**Fig. 4. 1** Cuptor de elaborare cu inducție, cu creuzet rece, vid și atmosferă de argon

Au fost elaborate 4 aliaje TRIP, 3 dintre acestea având compoziții chimice studiate în literatura de specialitate, dar elaborate utilizând alte tipuri de cuptoare, și un oțel TRIP de compoziție nouă. Compozițiile acestor oțeluri sunt prezentate în tabelul 4.1.

**Tabel 4. 1** Compoziția oțelurilor TRIP elaborate

<b>Material</b>		<b>C</b> (%)	<b>Mn</b> (%)	<b>Si</b> (%)	<b>S</b> (%)	<b>P</b> (%)	<b>Cu</b> (%)	<b>Al</b> (%)	<b>B</b> (%)	<b>Mo</b> (%)	<b>Cr</b> (%)	<b>Ni</b> (%)	<b>Ti</b> (%)
<b>TRIP 1</b>	<i>Referința1</i>	0,2	1,6	0,3	N/A	N/A	N/A	1,8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	<i>Elaborat</i>	0,199	1,58	0,281	0,035	0,023	0,020	1,77	0,003	0,002	0,016	0,024	0,014
<b>TRIP 2</b>	<i>Referința2</i>	0,25	1,8	0,3	N/A	0,021	N/A	1,3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	<i>Elaborat</i>	0,251	1,81	0,307	0,029	0,024	0,033	1,29	0,003	0,005	0,028	0,030	0,080
<b>TRIP 3</b>	<i>Referința3</i>	0,1	5,18	0,2	0,008	0,015	0,03	0,026	N/A-	0,02	0,04	0,03	N/A
	<i>Elaborat</i>	0,105	5,20	0,213	0,007	0,019	0,016	0,002	0,002	0,001	0,012	0,020	0,008
<b>TRIP 4</b>	<i>Calculat</i>	0,1	6,1	0,3				0,6					
	<i>Elaborat</i>	0,097	6,11	0,324	0,028	0,022	0,016	0,616	0,002	0,001	0,012	0,018	0,009

*Referința1:* Kruijver, Zhao et al. 2003

*Referința2:* Srivastava, Jha et al. 2006

*Referința3:* Merwîn 2007

### **Analiza metalografică prin microscopie optică după turnare a oțelurilor elaborate**

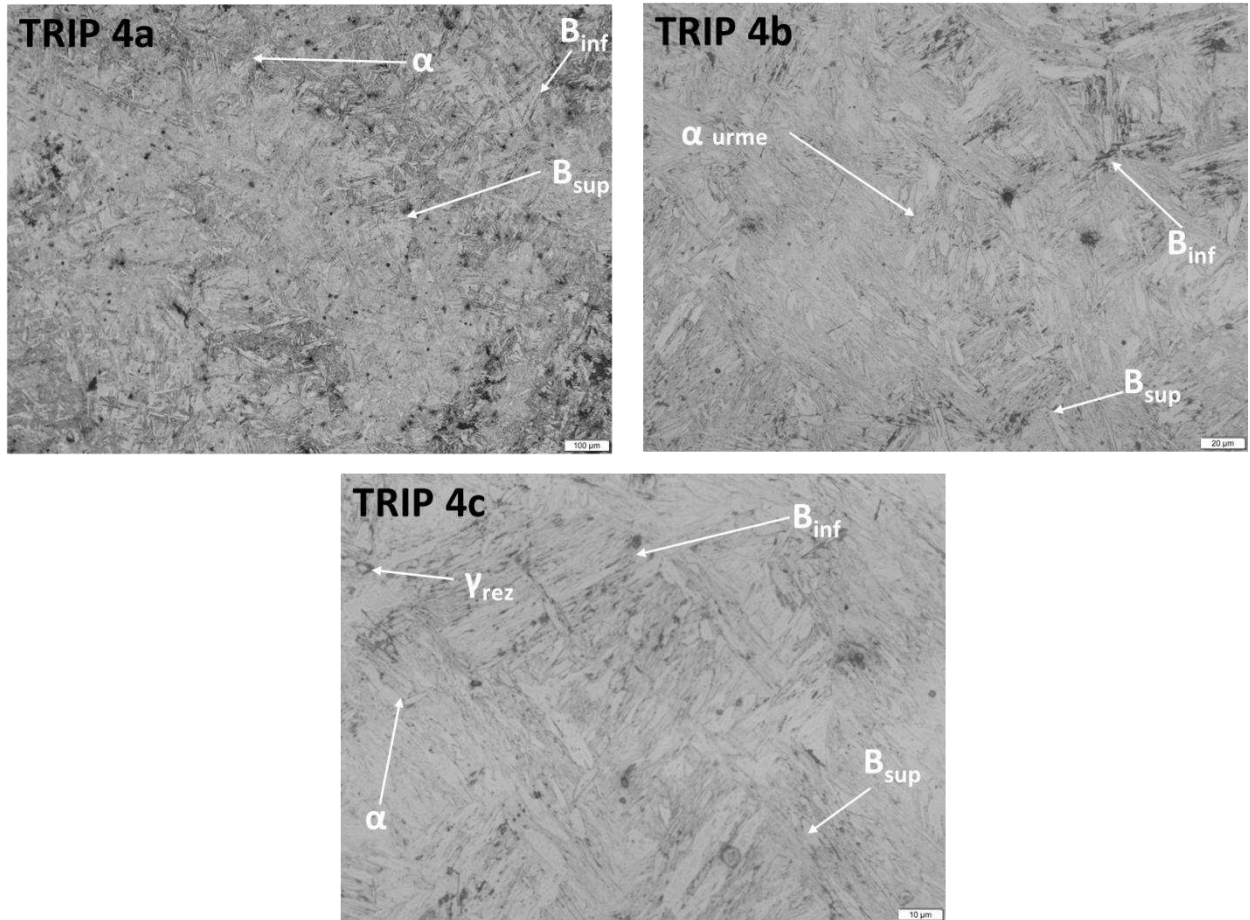
În urma elaborării oțelurilor, acestea au fost pregătite pentru examinarea metalografică și pentru efectuarea testelor de duritate.

Pentru pregătirea celor 4 probe experimentale, TRIP 1, TRIP 2, TRIP 3 și TRIP 4 s-a utilizat o linie completa de pregatire Struers (debitare, înglobare, șlefuire) din dotarea Centrului ECOMET. Din fiecare oțel a fost debitată o parte cilindrică de aproximativ 4 mm. Acestea au fost ulterior înglobate în rășină și șlefuite până la nivel de luciu metalic. În scopul analizei metalografice probele au fost atacate cu NITAL 2% pentru evidențierea grăunților și a structurii, apoi au fost examinate utilizând un microscop metalografic tip Olympus (BX 51 M), echipat cu posibilitate de investigații în câmp luminos sau întunecat și un domeniu de mărire de până la 1000x.

Global, structura probei TRIP 4 este destul de asemănătoare cu cea a probei TRIP 3. Aceeași tendință de supraîncălzire asociată cu creșterea călibilității este determinată tot de prezența în structură a Mn; și valoarea durității medii de 366HV se apropie de cea a probei TRIP 3. Particularitatea poate fi sesizată prin studii la puteri de mărire mai mari (M=500x). Alături de bainita superioară și cea inferioară, preponderente structural, se pot evidenția regiuni luminoase în cantitate mai mare, în care se observă prezența feritei. Cantitatea crescută de ferită este datorată prezenței în structură a Al (0.6%), cunoscut ca element alfagen.

Studiile la puteri de mărire maxime (M=1000x) permit evidențierea unui alt detaliu de structură, reprezentat de existența unor micro-regiuni poliedrice, luminoase, care sunt atribuite

austenitei reziduale. Existența acestor formațiuni este legată tot de prezența în cantitate semnificativă a Mn, cunoscut ca factor care determină reținerea în structură a austenitei netransformate, denumită și austenită reziduală.



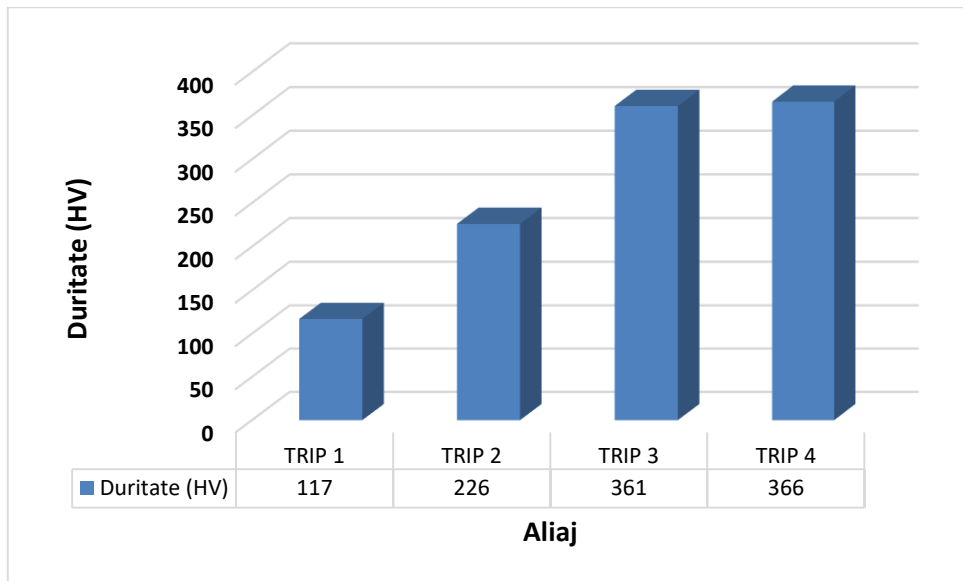
**Fig. 4. 2** Imagini de microscopie optică a probei TRIP 4, atac NITAL 2%, a)  $M=100x$ ; b)  $M=500x$ ; c)  $M=1000x$

### **Încercări de duritate după turnarea oțelurilor TRIP**

Testele de duritate pot să ofere informații utile legate de structura metalografică a materialului analizat. În cazul materialelor metalice duritatea poate indica prezența într-o proporție mai mare a unei faze față de celelalte. Ordinea descrescătoare a durității fazelor unui oțel este următoarea: Martensită → Bainită → Ferită → Austenită.

Încercările de duritate au fost efectuate pe durimetrul tip Innovatest Falcon 500, cu sistem inteligent de aplicare a sarcinilor, sarcină variată între 1g și 31 kgf și posibilitatea de efectuare a durităților Vickers, Brinell și Knoop. Oțelurile au fost testate la o sarcină de 5kgf, rezultatele fiind prezentate în tabelul 4.2 unde se află valorile pentru fiecare testare în parte

precum și valoarea medie a durtății după 3 măsurători.



**Fig. 4. 3** *Reprezentare grafică a durtăților medii înregistrate la analiza aliajelor TRIP după turnare*

#### 4.6. Laminarea și normalizarea oțelurilor TRIP elaborate

Pentru formarea unei structuri omogene, cu compactitate ridicată, fără tensiuni interne și cu constituenții necesari realizării proprietăților mecanice impuse, probele au fost laminate. Procedul oferă avantajul unei prelucrări eficiente a materialului metalic în întregul volum al acestuia, în condițiile asigurării unei bune precizii dimensionale și a unei suprafețe de bună calitate.

În cadrul experimentului, s-a utilizat aceeași temperatura de încălzire pentru toate oțelurile elaborate (1150°C). Utilizând un cuptor Caloris 1206 (cuptor electric cu rezistență) și fără atmosferă controlată, figura 4.12. Timpul de menținere pentru fiecare probă a fost de 10 minute.



**Fig. 4. 4** *Încălzirea probelor în cuptor la temperatura de 1150°C*



**Tabel 4. 2** Modificarea grosimii probelor în timpul procesului de laminare

Trecere	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Grosime [mm]	18	15	13	11	9	7,6	6,9	5,9	5

În urma procesului de laminare probele au fost tratate termic prin recoacere de normalizare. Recoacerea este un tratament termic care modifică proprietățile fizice și uneori chimice ale unui material pentru a-i crește ductilitatea și a-i reduce duritatea, făcându-l mai viabil. Recoacerea implică încălzirea unui material peste temperatura de recristalizare, menținerea unei temperaturi adecvate pentru o perioadă corespunzătoare de timp, iar apoi răcirea în aer. Această recoacere a fost realizată într-un cuptor de incalzire Caloris, la o temperatura de 1200°C în vid, figura 4.11.



**Fig. 4. 5** Introducerea oțelurilor laminate în cuptorul de incalzire în vid

#### 4.7. Analiza metalografică prin microscopie optică a probelor laminate și normalizate

În toate cazurile analizate, solidificarea după turnare a condus la structuri de supra-încălzire, incorecte din punct de vedere al tuturor caracteristicilor tehnologice (comportament în timpul prelucrării) și de exploatare. De aceea, ulterior s-a aplicat un tratament termic de tip recoacere de regenerare. Aceasta a fost de fapt o normalizare, la care așa cum s-a amintit în planul de lucru al tezei, temperatura a fost fixată la 925°C,  $t_{\text{ment}} = 0.5\text{h}$ , iar răcirea în aer. Se precizează că parametrii termici și temporali, acoperitori pentru toate probele (TRIP 1, TRIP 2, TRIP 3 și TRIP 4) au fost stabiliți conform principiilor tratamentelor termice:

- Temperatura să aibă o valoare ușor superioară temperaturii de austenitizare;
- Duratele de menținere (corelate cu dimensiunea probelor) să fie corespunzătoare;

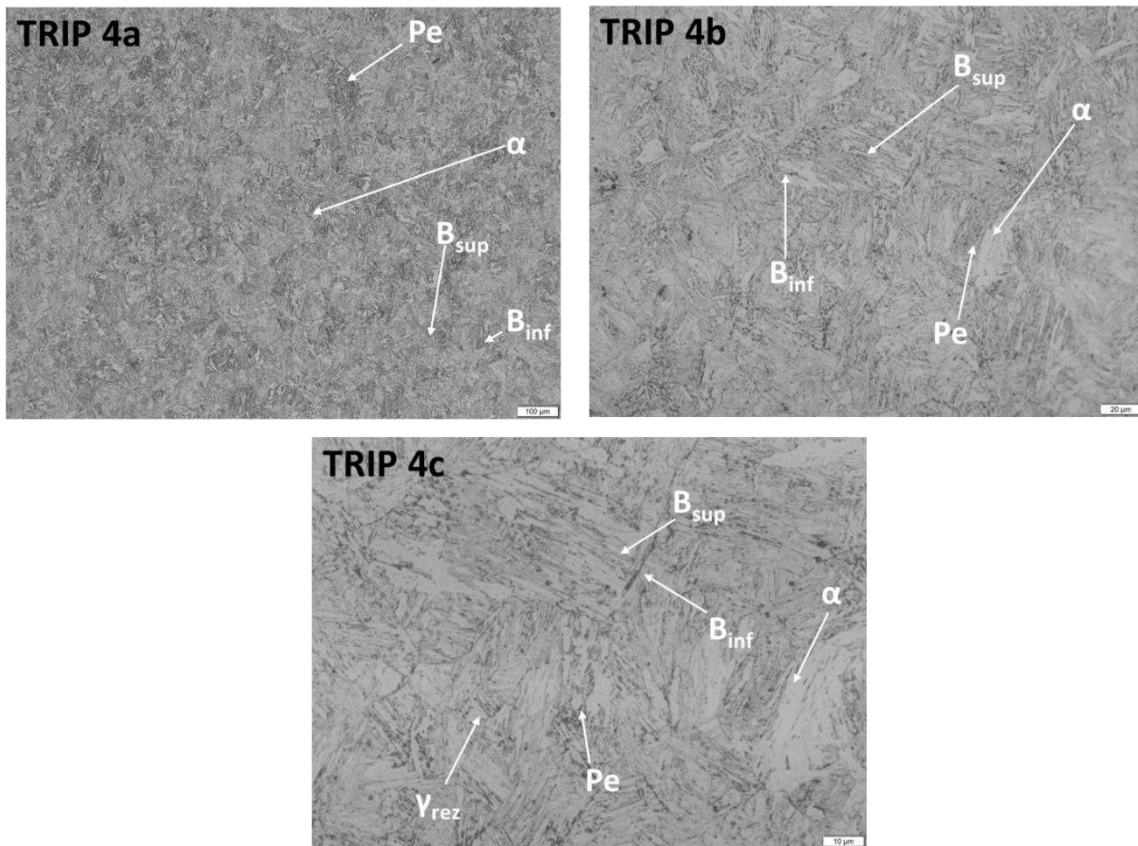
- Răcirea să se realizeze liber, în aer, conform definiției normalizării.

#### Microscopia optică a probei TRIP 4 (0.1% C, 6.1% Mn, 0.6% Al, 0.3% Si, rest Fe)

Analiza microgرافیilor corespunzătoare probei TRIP 4 încheie seria de structuri cărora li s-a aplicat recoacerea după elaborare – turnare, pentru regenerarea structurii.

Finisarea masivă a granulației este evidentă și în acest caz, fără a se constata modificări importante ale constituenților prin comparație cu cei identificați după turnare. Totuși, gradul lor de finețe mai ridicat facilitează ordonarea mai clară.

Astfel, structura majoritară este bainitică (bainită superioară și urme de bainită inferioară), similară cu cea a probei TRIP 3, ceea ce permite generalizarea observației că Mn în cantitate importantă crește călibilitatea. Caracterul său gamagen a putut fi evidențiat la puteri de marire maxime ( $M = 1000x$ ) când, particular pentru această probă, au putut fi observate mici regiuni cu austenită reziduală.



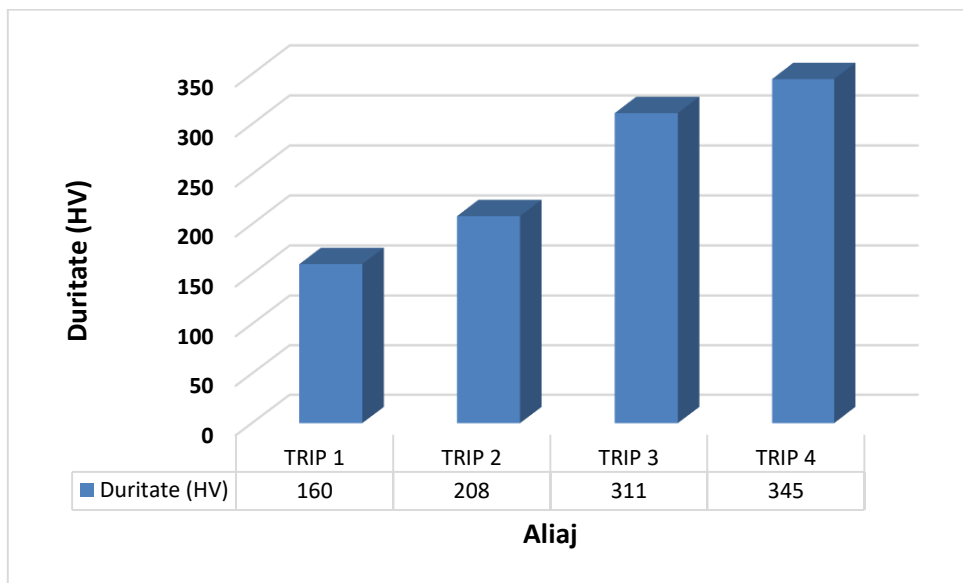
**Fig. 4. 6** Imagini de microscopie optică a probei TRIP 4 – normalizată. Atac Nital 2% ( $M = 100x$  (a);  $500X$  (b);  $1000x$  (c))

Analiza microgرافیilor corespunzătoare probei TRIP 4 încheie seria de structuri cărora li s-a aplicat recoacerea după elaborare – turnare, pentru regenerarea structurii.

Finisarea masivă a granulației este evidentă și în acest caz, fără a se constata modificări importante ale constituenților prin comparație cu cei identificați după turnare. Totuși, gradul lor

de finețe mai ridicat facilitează ordonarea mai clară.

Astfel, structura majoritară este bainitică (bainită superioară și urme de bainită inferioară), similară cu cea a probei TRIP 3, ceea ce permite generalizarea observației că Mn în cantitate importantă crește călibilitatea. Caracterul său gamagen a putut fi evidențiat la puteri de mărire maxime ( $M = 1000\times$ ) când, particular pentru această probă, au putut fi observate mici regiuni cu austenită reziduală.



**Fig. 4. 7** *Reprezentare grafică a durităților medii înregistrate la analiza oțelurilor TRIP după normalizare*

## Cap. 5. CERCETĂRI PRIVIND TRATAMENTUL TERMIC AL OȚELURILOR TRIP REALIZATE ÎN VEDEREA FORMĂRII AUSTENITEI REZIDUALE NECESARE REALIZĂRII EFECTULUI TRIP

### 5.1. Tratamentul termic al oțelurilor TRIP realizate

Tratamentele termice utilizate implică o încălzire rapidă la o temperatură în domeniul bidirecțional  $\alpha + \gamma$ , conducând la o microstructură de aproximativ 50% austenită și 50% ferită, cu menținere la această temperatură, urmată de o răcire rapidă în domeniul de formare a bainitei, care duce la o difuziune a carbonului în insule austenitice pentru formarea austenitei reziduale, finalizată de o răcire în aer.

În scopul obținerii acestui traseu termic s-a utilizat o baie de sare de Clorură de Bariu ( $\text{BaCl}_2$ ). Principiul tratamentului termic implică încălzirea aliajului până la o temperatură apropiată de cea critică superioară  $A_3$ , urmată de o răcire apropiată de temperatura de formare a bainitei. Aceste temperaturi variază în funcție de compoziția aliajului și implică un calcul matematic de determinare a temperaturilor critice  $A_1$  și  $A_3$  utilizând formulele:

$$A_1 = 727 - 14[\%Mn + \%Ni] + 22[\%Si + \%Cr + \%Al] \quad (5.1)$$

$$A_3 = 855 - 180[\%C] - 14[\%Mn] - 18[\%Ni] + 45[\%Si] + 1.7[\%Cr + \%Al] \quad (5.2)$$

În urma determinării valorilor  $TA_1$  și  $TA_3$  se poate calcula temperatura tratamentului termic ce trebuie aplicat fiecărui oțel în parte utilizând formula:

$$T_T = \frac{A_1 + A_3}{2} \quad (5.3)$$

Înainte de începerea procesului de tratare termică a oțelurilor acestea au fost secționare longitudinal în vederea utilizării pentru procesul termic.

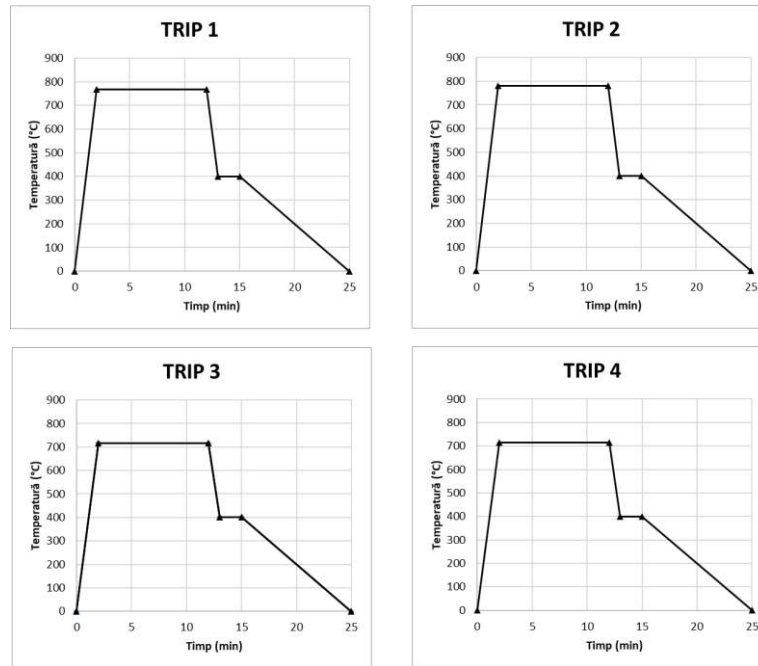
Utilizând aceste formule în funcție de compoziția fiecărui aliaj TRIP s-a putut determina temperatura necesară pentru obținerea cantității optime de austenită reziduală pentru fiecare oțel elaborat.

Calcululele compoziționale au dus la determinarea unui regim unic de tratare termică pentru fiecare aliaj în parte. Aceste regimuri de încălzire pot fi observate în figura 5.1.

**Tabel 5. 1** Valori  $TA_1$ ,  $TA_3$  și de tratament termic ( $T_T$ ) pentru oțelurile elaborate

Probă	$TA_1$ (°C)	$TA_3$ (°C)	$T_T$ (°C)
-------	-------------	-------------	------------

<b>TRIP 1</b>	750	813	781.5
<b>TRIP 2</b>	737	800	768.5
<b>TRIP 3</b>	659	773	716
<b>TRIP 4</b>	661	766	713.5



**Fig. 5. 1.** Regimuri de tratament termic aplicate oțelurilor TRIP

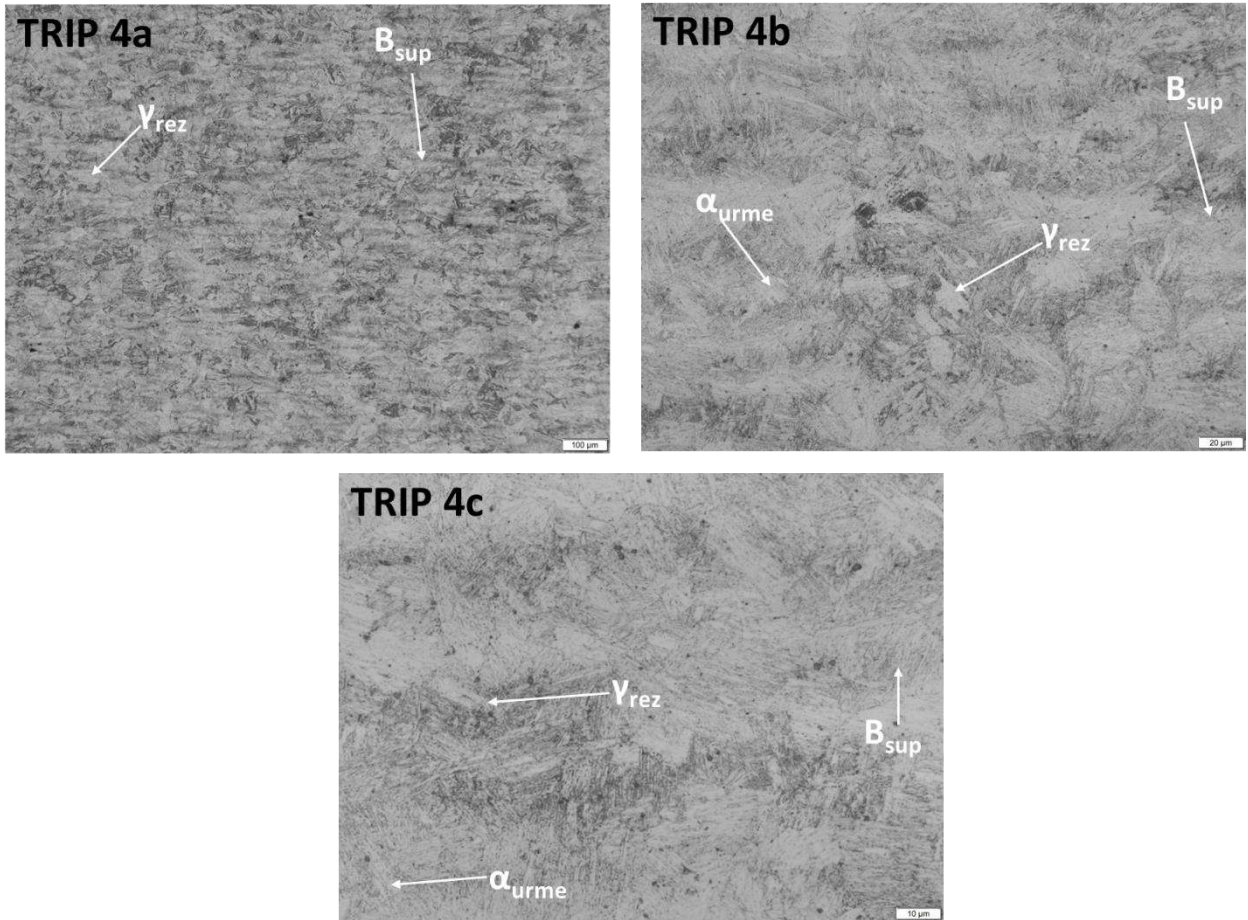
## 5.2. Investigarea structurii prin microscopie optică după tratamentul termic neconvențional

Conform cercetărilor efectuate de H. Bhadeshia [22], promotorul oțelurilor TRIP, o structură controlată, capabilă să răspundă cerințelor speciale atribuite acestor oțeluri nu se poate realiza decât aplicând un tratament termic neconvențional.

Oțelul standard brevetat de autorul menționat mai sus are compoziția chimică 0.15% C, 1.5% Si, 1.5% Mn, rest. Fe, iar structura propusă este următoarea:

- ferită, pentru asigurarea unei prelucrabilități corespunzătoare;
- bainită (superioară) care prin tenacitatea sa, dar și prelucrabilitate avantajoasă asigură caracteristici mecanice speciale;
- austenită reziduală în cantități mici, rezultată prin specificul transformării bainitice și care, în condiții de șoc, se transformă în martensită, asigurând o rezistență mecanică crescută la impact.

**Microscopia optică a probei TRIP 4**



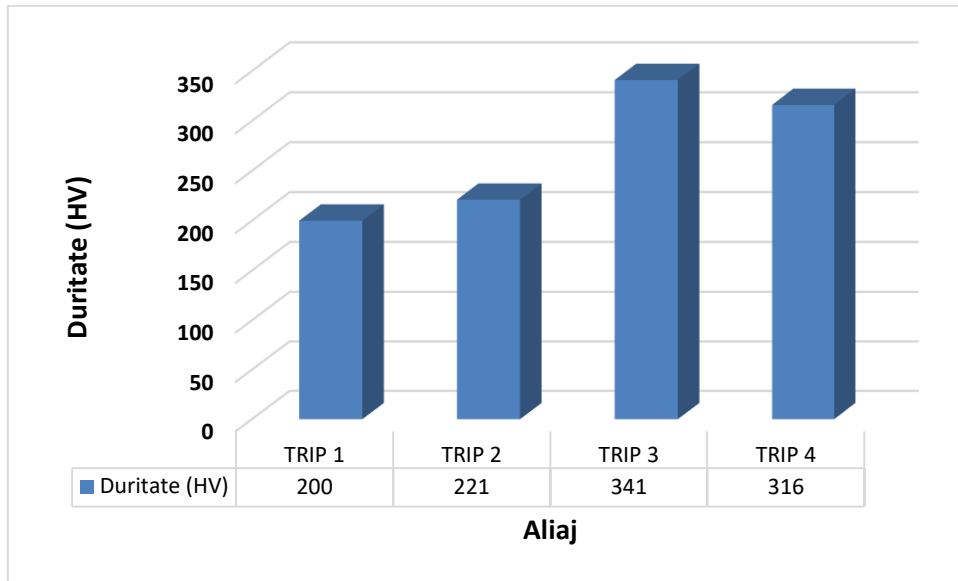
**Fig. 5. 2** Imagini de microscopie optică a probei TRIP 4 călită bainitic cu austenitizare – Atac Nital 2% (a-M=100X, b-M=500x, c-M=1000x).

Microstructura probei TRIP 4 prezintă o structură combinată față de structurile investigate anterior.

Principial, se aseamănă cu structura obținută în cazul TRIP 3, dar prezența în compoziția chimică a unei cantități mici de Al, element alfa-gen aduce unele varietăți de structură.

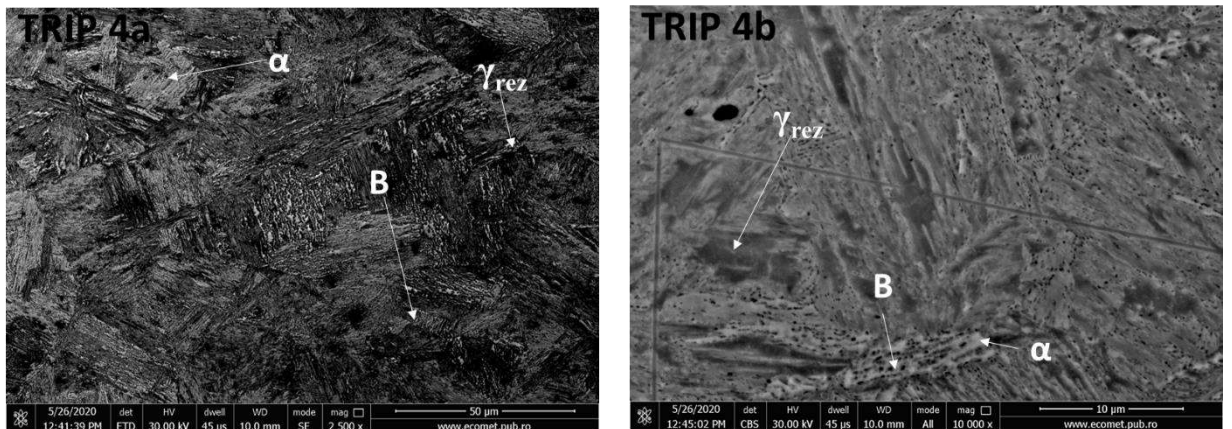
Astfel, structura predominant formată din bainită superioară este însoțită de zone mai largi de ferită proeutectoidă. Deși conținutul de carbon este același ca în cazul probei TRIP 3, ușoara majorare de Mn induce menținerea în structură a unei cantități mai mari de austenită reziduală, vizibilă destul de ușor chiar de la puteri de mărire de M=500x.

Valorile medii de duritate (316HV) sunt în deplină concordanță cu structura.



**Fig. 5. 3** Reprezentare grafică a durițărilor medii înregistrate la analiza aliajelor TRIP după tratamentul termic

#### Microscopia electronică a probei TRIP 4



**Fig. 5. 4** Micrograții SEM ale oțelului TRIP 4 la mărimi de 2500x și 10000x

Combi-nația compozițională a probei TRIP 4 aduce în prim plan structurile cele mai variate. Astfel, ferita proeutectoidă se unește cu ferita bainitică formând un tot unitar, structura majoritară fiind bainita superioară, cu o distribuție foarte clară în baghete.

În cadranul III al imaginii de compoziție este surprins momentul de precipitare a carburilor în interiorul plachetei de ferită, aspect morfologic specific bainitei superioare.

Un detaliu de structură mai vizibil în cadrul acestei probe este legat de zonele în care se identifică austenita reziduală. Fiind mai întinse, se observă clar distribuția lor insulară între plachetele de ferită bainitică. Această distribuție explică cu claritate mecanismul existenței

austenitei reziduale în procesul transformării bainitice.

### 5.5. Determinarea conținutului de austenită reziduală prin metoda difracției de raze X

Determinarea conținutului de austenită reziduală pe probe din oțel TRIP s-a efectuat utilizând tehnica difracției radiațiilor X, conform standardului ASTM E 975 - 03, *Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation*.

Echipamentul folosit a fost un difractometru Rigaku AUTOMATE II, utilizat în următoarea configurație:

- radiația  $Cr K\alpha$ , ( $\lambda = 2,29092\text{Å}$ );
- parametrii fasciculului de radiații X: 40kV, 40mA, *aria iradiată* =  $1,15 \cdot 1,15 \text{ mm}^2$ ;
- detector: D/teX Ultra 2000 silicon strip;
- suport de probă cu deplasare automată XYZ, microscop optic cu cameră CCD și funcție zoom pentru alegerea zonei iradiate cu precizie;
- relația de calcul a volumului de austenită reziduală conform ASTM E 975-03:

$$V_{\gamma} = \left[ \frac{I_{\gamma}}{R_{\gamma}} / \left( \frac{I_{\alpha}}{R_{\alpha}} \right) + \left( \frac{I_{\alpha}}{R_{\alpha}} \right) \right] (1);$$

în care:

$I_{\alpha}$  = intensitatea integrată corespunzătoare liniei de difracție  $\alpha_{(211)}$ ;

$R_{\alpha}$  = corecția corespunzătoare liniei de difracție  $\gamma_{(220)}$ ;

$I_{\gamma}$  = intensitatea integrate corespunzătoare liniei de difracție  $\gamma_{(220)}$ ;

$R_{\gamma}$  = corecție corespunzătoare liniei de difracție  $\gamma_{(200)}$ .

- linii de difracție utilizate în analiză:

**faza  $\alpha$** , structura cvc, constanta de rețea  $a_o = 2,8664\text{Å}$ ,  $(hkl) = (211)$ ,  $2\theta = 156,40^\circ$ ,  $R_{\alpha} = 190,8$ ; **faza  $\gamma$** , structura cfc, constanta de rețea  $a_o = 3,60\text{Å}$ ,  $(hkl) = (220)$ ,  $2\theta = 128,30^\circ$ ,  $R_{\alpha} = 47,88$ .

Probele au fost prelucrate metalografic pentru analiza în secțiune, cu suprafața adusă la luciu metalic. Pentru analiza cantitativă au fost achiziționate liniile de difracție  $\alpha_{(211)}$  ( $2\theta = 156,40^\circ$ ,  $t = 100s$ ) și  $\gamma_{(200)}$  ( $2\theta = 128,40^\circ$ ,  $t = 300s$ ) în trei puncte pe suprafața de analiză, situate la aproximativ 2mm distanță unul de altul. Pentru probele supuse la testele de impact, analiza s-a efectuat în secțiune, în mijlocul zonei deformate plastic și la  $\pm 2$  mm stânga/ dreapta de punctul central. S-au determinat pentru fiecare linie de difracție intensitățile integrale, cu corecțiile conform ASTM E 975-03. Volumul de austenită reziduală a fost determinat cu



ajutorul relației (1), utilizând valoarea medie a intensității integrale.



Fig. 5. 5 *Difractometru Rigaku AUTOMATE II cu tub de Cr pentru determinarea austenitei reziduale*

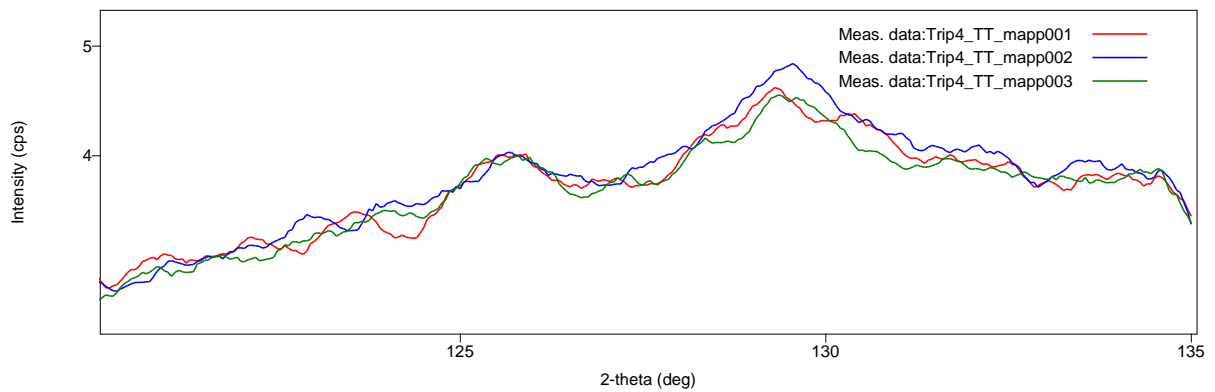


Fig. 5. 6 *Peak de difracție măsurat în trei puncte pe proba TRIP 4, corespunzător fazei  $Fe_{\alpha}$*

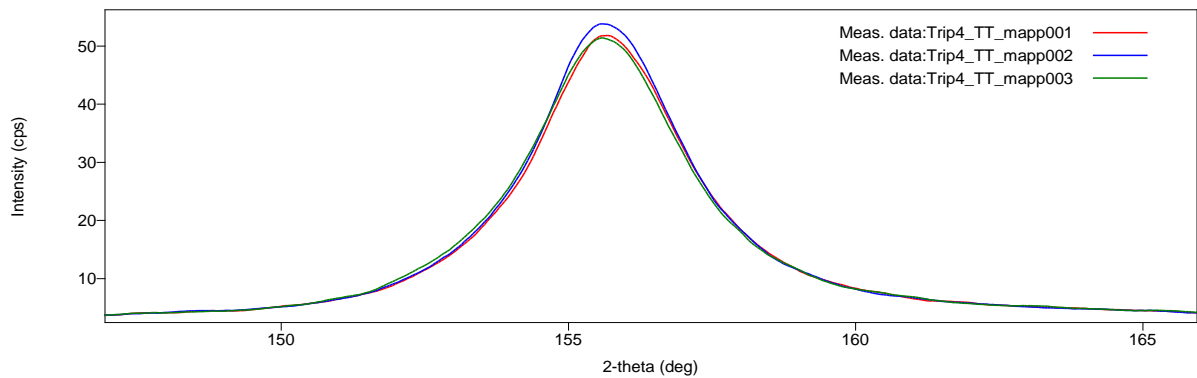


Fig. 5. 7 *Peak de difracție măsurat în trei puncte pe proba TRIP 4, corespunzător fazei  $Fe_{\gamma}$*

Valorile calculate ale conținutului de austenită reziduală, din prelucrarea datelor

experimentale, sunt prezentate în tabelul 5.3.

**Tabel 5. 2** *Valori calculate ale nivelului de austenită reziduală în urma tratamentului termic*

<b>Nr.crt.</b>	<b>Cod proba*</b>	<b><math>V_{\gamma}</math></b>
1	TRIP 1	9,29
2	TRIP 2	7,40
3	TRIP 3	4,63
4	TRIP 4	10,63

## Cap. 6. CERCETĂRI ASUPRA COMPORTĂRII LA IMPACT A OȚELURILOR TRIP EXPERIMENTATE

### 6.2 Scopul și cercetările experimentale

Cercetările experimentale efectuate asupra comportării la impact a oțelurilor TRIP studiate au avut ca scop caracterizarea procesului de durificare a acestor materiale supuse acțiunii forței de impact. Pentru aceasta obiectivele încercărilor realizate au urmărit:

- evidențierea existenței forței de răspuns ( $F_r$ ) a materialului și a modului de variație a acesteia pe durata impactului ( $t_r$ );
- analiza transformărilor structurale produse în material sub acțiunea forței de impact ( $F_i$ );
- evaluarea efectului TRIP specific oțelurilor investigate.

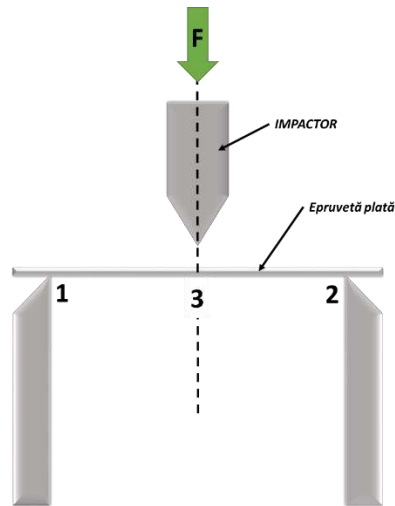
### 6.3.1 Încercările la impact

Încercările experimentale la impact au fost realizate pe un echipament INSTRON Ceast 9340, fig. 6.1, prevăzut cu modul pentru achiziții de date și soft-ware specializate VisualIMPACT V.6 și CeastVIEW.



**Fig. 6. 1** *Ansamblul experimental destinat încercărilor dinamice la impact: 1 – echipament INSTRON Ceast 9340 (SUA); 2 – unitate PC prevăzută cu sistem de achiziții de date;*

Deformarea plastică a avut caracter dinamic, impactul prin șocuri mecanice fiind realizat cu o viteză de aprox. 60 km/h și aplicarea unei mase de lovire de 3,219 kg ce va genera o energie de impact de 18J. Probele plate supuse încercărilor au fost realizate din oțelurile investigate, aflate în stare tratată termic și cu suprafețele exterioare curățate de pelicula de sare formată în timpul călirii baintice în băi de săruri. Poziționarea epruvetelor în raport cu direcția de aplicare a forței de impact ( $F$ ) corespunde metodei celor trei puncte de contact, fig. 6.2.



**Fig. 6. 2** Modul de efectuare a încercărilor dinamice la impact

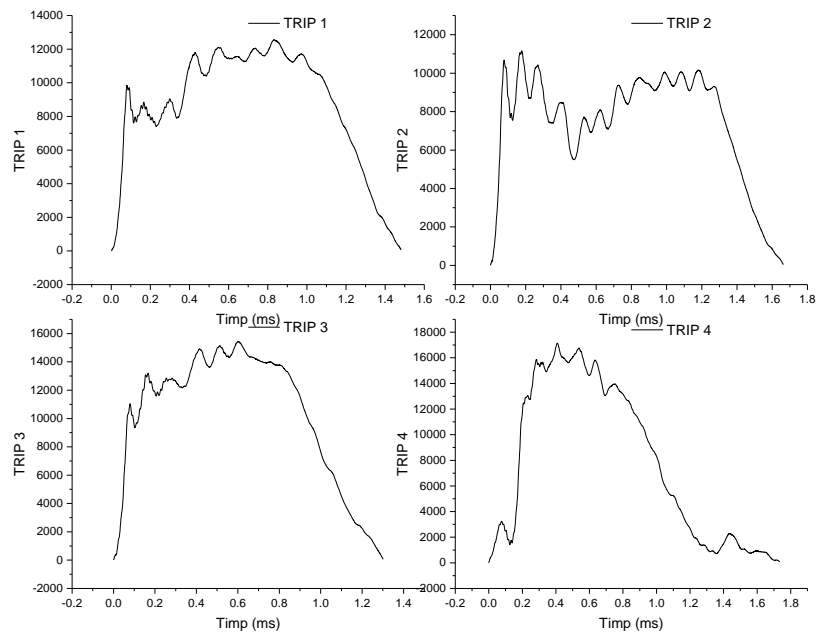
Investigațiile efectuate asupra transformărilor structurale produse sub acțiunea sollicitării la impact au făcut referire la:

- evaluarea cantității de austenită reziduală prezentă în structura inițială a oțelurilor TRIP,
- evidențierea transformărilor structurale produse.

**Tabel 6. 1** Condiții impuse solicitărilor la impact și valorile reziliențelor pentru oțelurile TRIP

Proba	Viteza de impact, [m/s]	Energia de impact, [J]	Reziliența, [kJ/m <sup>2</sup> ]
TRIP 1	3,344	18	491,84
TRIP 2			478,21
TRIP 3			480,07
TRIP 4			499,36

Comportarea la impact a celor patru tipuri de oțeluri TRIP studiate a urmărit modul de variație a forței de răspuns ( $F_r$ ) a fiecărui material, pe durata considerată a sollicitării mecanice produsă. Pe baza valorilor înregistrate de modulul de achiziții de date, au fost trasate curbele de variație  $F_r = f(t_r)$ , pentru fiecare aliaj investigat, fig. 6.3.



**Fig. 6.3** Curbele de variație  $F_r = f(t_r)$  specifice oțelurilor TRIP investigate: a – oțelul TRIP 1; b – oțelul TRIP 2; c – oțelul TRIP 3; d – oțelul TRIP 4.

Efectuarea analizei comparative evidențiază următoarele:

- oțelurile TRIP slab aliate (TRIP 1 și TRIP 2) au cele mai mici valori ale forțelor de răspuns și duratele cele mai lungi pentru timpul de răspuns. Probabil, cantitatea redusă de elemente de aliere a condus la un grad de ecrusare mic, fapt care a permis materialului metalic să opună o rezistență limitată acțiunii forței de deformare;
- cantitatea mică de elemente de aliere a diminuat considerabil posibilitatea formării fazelor structurale de tipul particulelor de precipitate, care ar fi reprezentat bariere în calea deplasării defectelor liniare (dislocațiilor), limitând astfel procesul de deformare plastică sub acțiunea forței de impact. Durificarea superficială a materialelor (ecrusare), realizată prin blocarea dislocațiilor ar fi reprezentat o modalitate de creștere a capacității de răspuns a materialului;
- oțelurile TRIP mediu aliate (TRIP 3 și TRIP 4) au prezentat cele mai mari capacități de răspuns. Creșterea cantității de compuși chimici formați, în prezența elementelor de aliere a contribuit la durificarea structurală a celor două oțeluri

#### 6.4.2 Mecanismul efectului TRIP

Pentru oțelurile TRIP este caracteristică producerea unei transformări structurale indusă prin plasticitate. Oțelurilor investigate le este specifică transformarea  $A_{rez} \rightarrow M$  ca modalitate de evaluare a efectului TRIP.

În cazul elementelor din construcția structurii de rezistență a autovehiculelor sunt

specifice două particularități:

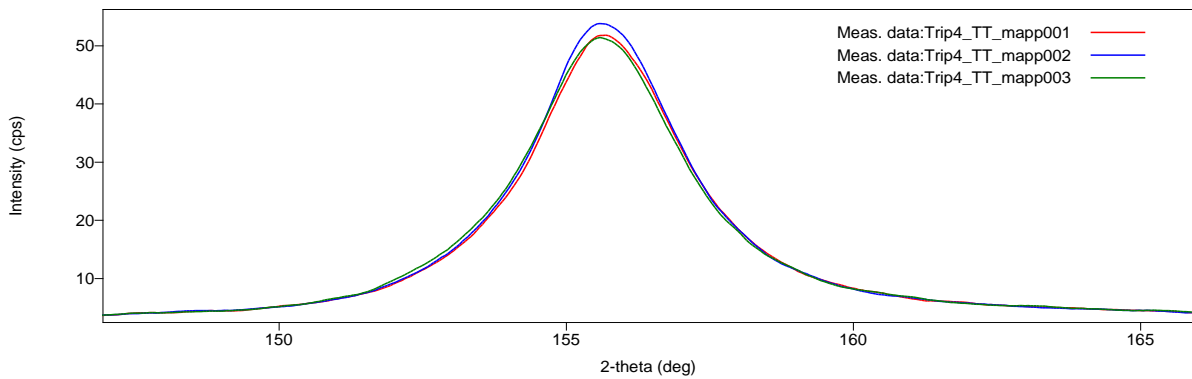
- deformarea plastică care asigură energia necesară transformării structurale este rezultată ca efect al șocului mecanic produs prin impact;
- modificarea structurală care caracterizează efectul TRIP al acestor oțeluri face referire la posibilitatea transformării austenitei reziduale în martensită pe baza energiei absorbite în urma producerii impactului mecanic.

Intensitatea efectului TRIP a fost evidențiată în două moduri:

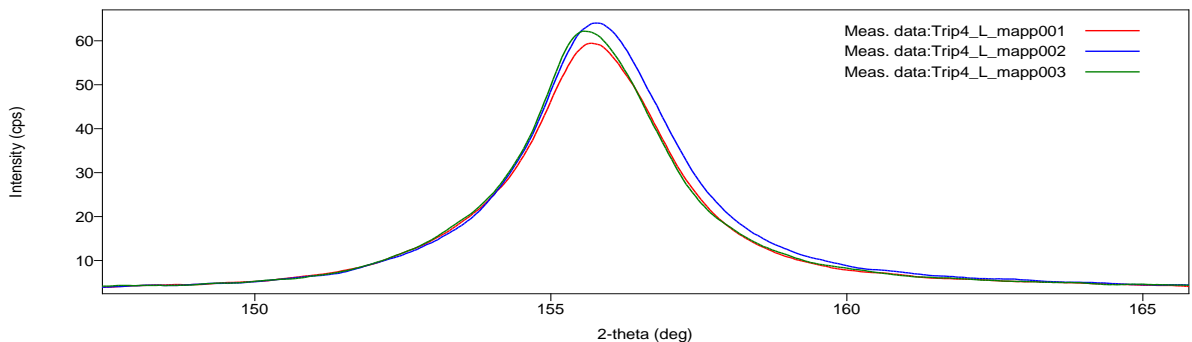
- prin difracție de raze X;
- prin analize microstructurale.

#### 6.4.2.1 Evidențierea efectului TRIP prin difracție de raze X

Prin difracția de raze X efectuată pe difractometrul Rigaku AUTOMATE II, au fost determinate volumele/ cantitățile de austenită reziduală existente în structura oțelurilor TRIP investigate, înaintea deformării plastice și după producerea șocului mecanic.



**Fig. 6. 4** Peak-urile de difracție ale  $A_{rez}$  măsurate în trei puncte de pe suprafața probei TRIP 4, înaintea impactului mecanic



**Fig. 6. 5** Peak-urile de difracție ale  $A_{rez}$  măsurate în trei puncte de pe suprafața probei TRIP 4, după producerea impactului mecanic

**Tabel 6. 2** Valorile cantității de austenită reziduală transformată prin efectul TRIP

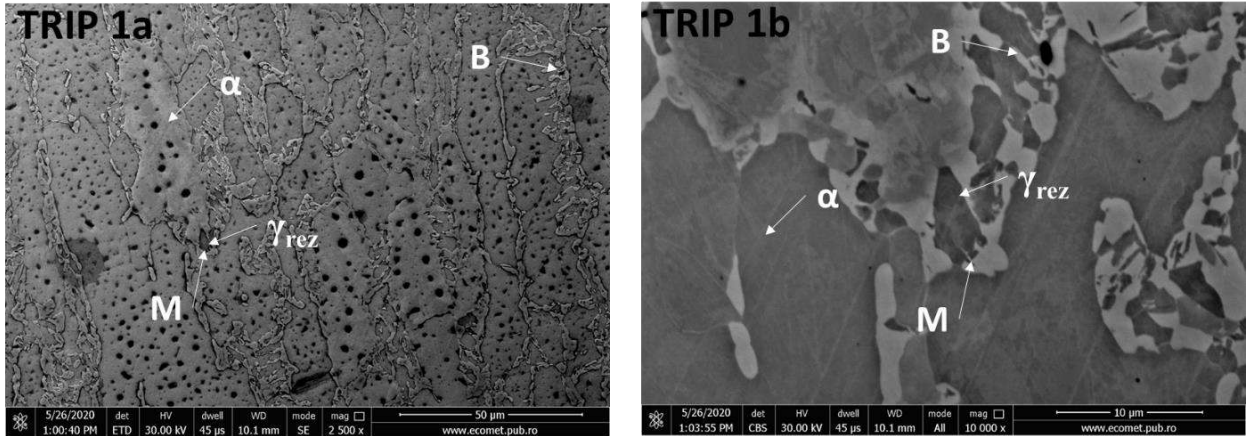
Nr. crt.	Oțelul TRIP		V1 $\gamma$	V2 $\gamma$	$\Delta V1\gamma$	$\Delta V2\gamma$
1	TRIP 1	înainte de impact	9,29	-	1,96	0,21
2		după impact	-	7,33		
3	TRIP 2	înainte de impact	7,40	-	2,17	
4		după impact	-	5,23		
5	TRIP 3	înainte de impact	4,63	-	0,94	1,14
6		după impact	-	3,69		
7	TRIP 4	înainte de impact	10,63	-	2,08	
8		după impact	-	8,55		

Analiza valorilor prezentate în tabel arată următoarele:

- dintre cele două oțeluri slab aliate, oțelul TRIP 1 prezintă cele mai mari valori ale austenitei reziduale, atât înainte cât și după producerea șocului mecanic;
- dintre cele două oțeluri mediu aliate, oțelul TRIP 4 prezintă cele mai mari valori ale austenitei reziduale atât înainte cât și după producerea șocului mecanic;
- cele mai mari cantități de austenită transformată în martensită prin efectul TRIP le prezintă oțelurile TRIP 2 și TRIP 4;
- oțelurile TRIP slab aliate prezintă valori mai apropiate pentru cantitățile de austenită reziduală transformată în martensită prin deformare plastică;
- oțelurile mediu aliate TRIP 3 și TRIP 4 prezintă valori puternic diferențiate pentru variația cantității de  $A_{rez}$ . Este posibil să fie necesară majorarea forței de impact pentru a obține intensificarea transformării  $A_{rez} \rightarrow M$  mai ales în cazul acestor oțeluri cu un conținut mare de mangan.

#### 6.4.2.2 Evidențierea efectului TRIP prin microscopie electronică

Aspecte microstructurale specifice oțelului TRIP 1 sunt prezentate în fig. 6.14.



**Fig. 6. 6** Imagini SEM ale oțelului TRIP 1  
*a* – putere de mărire 2500:1; *b* – putere de mărire 10 000:1

După tratament termic și deformare plastică prin șoc mecanic, microstructura acestui oțel este formată din:

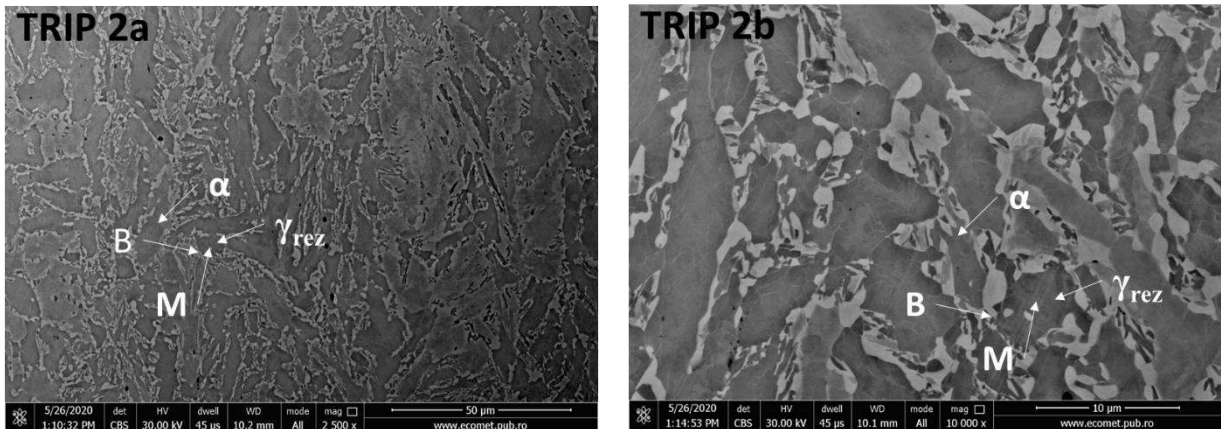
- soluții solide reprezentate prin ferita  $\alpha$  inițială ( $F_\alpha$ ) și austenita reziduală ( $A_{rez}$ );
- amestec mecanic de tip perlitic reprezentat prin bainita (B);
- soluție solidă suprasaturată, în afară de echilibru, reprezentată prin martensita (M) rezultată prin solicitarea la impact.

Fazele feritice cu durități mici prezintă o dispunere orientată pe direcția de deformare plastică favorizând astfel producerea durificării structurale a oțelului. Martensita aciculară formată prin transformarea  $F_\alpha \rightarrow M$  este dispusă la interiorul insulelor de austenită.



### Analiza SEM a oțelului TRIP 2

Aspecte microstructurale specifice oțelului TRIP 2 sunt prezentate în fig. 6.15.



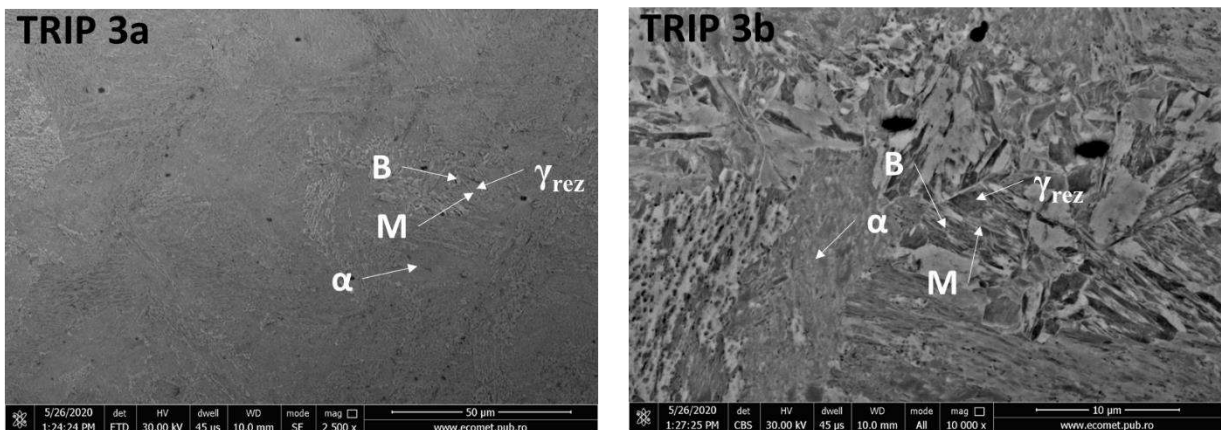
**Fig. 6. 7** Imagini SEM ale oțelului TRIP 2  
*a – putere de mărire 2500:1; b – putere de mărire 10 000:1*

Compoziția chimică asemănătoare oțelului TRIP 1 și menținerea aceluiași transformări structurale pe parcursul prelucrărilor termice și mecanice au condus la identificarea unor microstructuri similare și pentru oțelul TRIP 2.

### Analiza SEM a oțelului TRIP 3

În compoziția chimică a oțelurilor TRIP 3 și TRIP 4 a fost majorată în mod considerabil cantitatea de mangan, fapt pentru care ele au devenit mediu aliate. Prin efectul de stabilizare a austenitei, manganul influențează atât microstructura inițială a oțelurilor, cât și transformările structurale produse prin tratament termic, respectiv prin deformare plastică ulterioară (impact mecanic).

Aspecte microstructurale specifice oțelului TRIP 3 sunt prezentate în fig. 6.16.



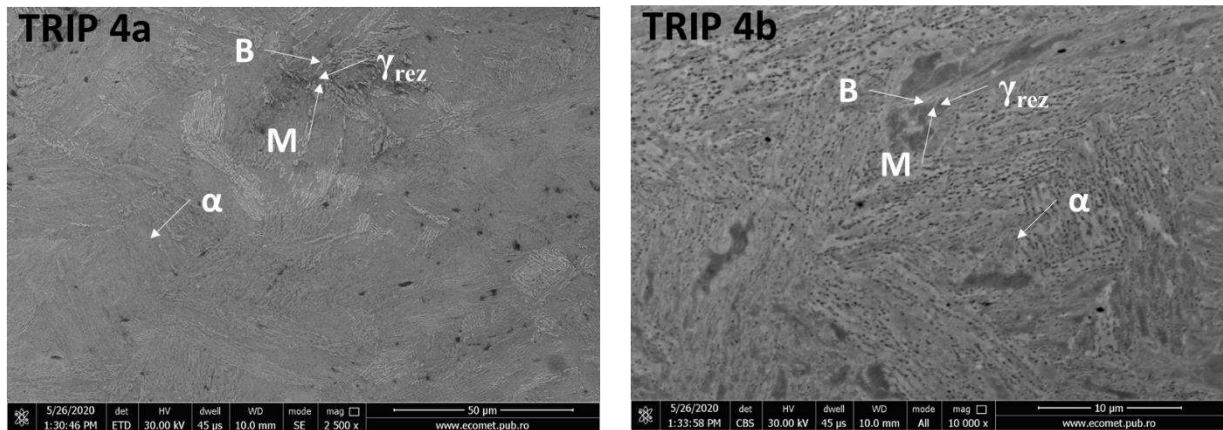
**Fig. 6. 8** Imagini SEM ale oțelului TRIP 3  
*a – putere de mărire 2500:1; b – putere de mărire 10 000:1*

Microstructura este formată din aceeași constituienți, diferențierile făcând referire la:

- accentuarea dispunerii orientate a fazei  $F_{\alpha}$ , mai ales a celei din constituția bainitei;
- tendința de dispunere ordonată a acelor de martensită în interiorul insulelor austenitice.

Analiza SEM a oțelului TRIP 4

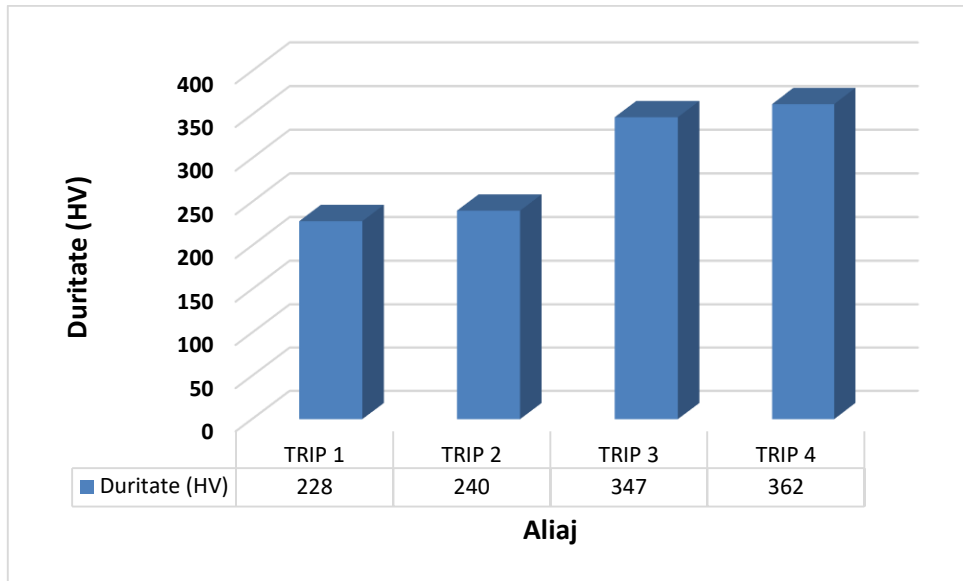
Aspecte microstructurale specifice oțelului TRIP 4 sunt prezentate în fig. 6.17.



**Fig. 6. 9** Micrografii SEM ale oțelului TRIP 4  
*a – putere de mărire 2500:1; b – putere de mărire 10 000:1*

Deoarece în compoziția chimică se regăsește cel mai mare conținut de mangan rezultă că pentru acest oțel va fi caracteristică cea mai mare cantitate de austenită reziduală prezentă în finalul transformării plastice indusă.

Dispunerea cu caracter orientat al fazei feritice ( $F_{\alpha}$ ) poate determina o tendință de durificare structurală. Rolul cel mai important revine existenței fazei martensitice. La nivelul formațiunilor de martensită este observată prezența acelor de diferite dimensiuni: ace lungi și groase (8 – 9  $\mu\text{m}$ ) formate la începutul transformării prin impact și ace scurte și subțiri (1- 2  $\mu\text{m}$ ) formate la finalul transformării structurale. Modul de orientare a acestor ace permite aprecierea direcției de deformare plastică produsă prin șoc mecanic.



**Fig. 6. 10** *Reprezentare grafică a valorilor medii ale durezzații Vickers, pentru oțelurile TRIP, după solicitarea la impact*

**Tabel 6. 3** *Transformarea indusă prin plasticitate și creșterea durezzații Vickers*

Oțel TRIP	Volumul de $A_{rez}$ transformată în M	Creșterea durezzații Vickers
TRIP 1	1,96	8
TRIP 2	2,17	19
TRIP 3	0,94	6
TRIP 4	2,08	46

## Cap.7. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

### 7.1 Concluzii Generale

➤ Oțelurile TRIP prezintă cea mai bună combinație între rezistența mecanică – plasticitate – ecruisare (durificare sub tensiune).

➤ Efectul TRIP specific acestor oțeluri constă în producerea unei transformări martensitice indusă prin plasticitate (sub acțiunea energiei de impact).

➤ Austenita reziduală reprezintă faza inițială care se va transforma în martensită mecanică ca urmare a înmagazinării energiei de impact.

➤ Din punct de vedere a compoziției chimice pentru formarea unei cantități mai mari de austenită reziduală este necesar ca oțelul să prezinte:

- un conținut mai mare de carbon și să fie slab aliat cu elemente  $\gamma$ - gene (Mn);
- un conținut redus de carbon și să fie mediu aliat cu elemente  $\gamma$ - gene (Mn);

➤ Pentru oțelurile studiate, transformarea structurală este de tipul  $A_{rez} \rightarrow M_{mecanică}$ , sub acțiunea energiei furnizate aliajelor printr-o solicitare la impact/șoc.

➤ Cercetările efectuate au urmărit comportarea la impact a patru oțeluri, pentru a caracteriza intensitatea efectului TRIP indus prin plasticitate.

➤ Metodologia dezvoltării cercetărilor personale a necesitat:

- cunoașterea stadiului actual al cercetărilor efectuate, pe plan național și internațional;
- stabilirea Planului de dezvoltare a cercetărilor personale specifice direcției de cercetare propusă.

➤ Tema de cercetare a avut ca scop implementarea unor concepte moderne privind oțelurile TRIP destinate construcției elementelor din structura de rezistență a autovehiculelor.

➤ Obiectivul temei a fost reprezentat prin studiul complex și comparativ asupra efectului TRIP pentru un oțel mediu aliat, cu o compoziție chimică originală.

➤ Complexitatea studiilor a fost determinată de multitudinea de cercetări experimentale efectuate:

- elaborarea și turnarea a patru oțeluri TRIP, dintre care un oțel cu compoziție chimică originală.

- caracterizarea microstructurală și de proprietăți a fiecărui oțel aflat în stare turnată;

- deformarea plastică la cald, urmată de tratamentul termic de normalizare aplicabile oțelurilor investigate;

- formarea austenitei reziduale prin practicarea călirii bainitice în baie de săruri a oțelurilor;

- caracterizarea microstructurală compozițională și de proprietăți a oțelurilor, după călirea bainitică;

- evaluarea intensității de producere a efectului TRIP prin analiza transformării structurale  $A_{rez} \rightarrow M$ , indusă prin impact mecanic (plasticitate);

- caracterizarea microstructurală, compozițională și de proprietăți a oțelurilor, după încercarea la șoc mecanic;

- analiza modului de variație a forței de răspuns a materialelor considerate, pe durata de investigare a impactului mecanic.

➤ Microscopia electronica SEM a evidențiat:

a. pentru oțelurile TRIP slab aliate: caracterul alotriomorf al feritei  $\alpha$  proeutectoide, morfologii similare pentru  $F_{\alpha}$  proeutectoidă și  $F_{\alpha}$  bainitică, forma alungită (baghetă) a grăunților de bainită;

b. pentru oțelurile TRIP mediu aliate, au fost obținute valori extreme pentru  $A_{rez}$  (4,63% pentru TRIP 3 și 10,63% pentru TRIP 4), situație care poate fi explicată prin cantitatea mare de mangan (element chimic  $\gamma$  – gen) și prin adaosul de Al (element chimic  $\alpha$ -gen) în cazul oțelului TRIP 4,

➤ Simularea comportării la impact a fost efectuată pe un echipament INSTRON 9340, prevăzut cu modul de achiziții de date și software specializate IMPACT V.6 și Ceats VIEW;

➤ Deformarea plastică prin impact a fost realizată în condiții similare pentru cele patru oțeluri studiate: masa de lovire 3,219 kg, viteza de lovire de aprox. 60 km/h (limita maximă de viteză admisă la deplasarea prin localități), energia de impact  $W=18J$ . Probele plate supuse încercărilor se aflau în starea rezultată după tratament termic;

➤ La acțiunea forței de impact ( $F_i$ ) oțelurile TRIP utilizate în construcția elementelor de caroserie reacționează cu o forță de răspuns ( $F_r$ ), a cărei variație a fost studiată pe durata unui timp de răspuns  $t_r = 1,8$  ms;

➤ Variația cantității de austenită reziduală a fost evidențiată prin difracție de raze X, pe un echipament Rigaku AUTOMATE II, respectând prevederile standardului american ASTM E 975 – 03;

➤ Prin microscopie electronică SEM a fost investigată constituția microstructurală a oțelurilor TRIP, după solicitarea la impact. A fost identificată prezența martensitei sub acțiunea energiei de impact. Constituienții structurali cu durități mici de tipul feritelor (ferită liberă și ferită din bainită) încep să dobândească un caracter orientat pe direcția forței de deformare plastică,

➤ Durificarea oțelurilor rezultată ca o consecință a efectului TRIP a reprezentat o modalitate de evaluare a intensității de manifestare a acestuia;

## 7.2 Contribuții originale

Pe parcursul dezvoltării cercetărilor experimentale personale au fost aduse și contribuții originale în domeniul științific abordat:

- Au fost elaborate și turnate un oțel TRIP mediu aliat (TRIP4) cu o compoziție chimică originală, în care prezența unei cantități de 6,10% Mn asigură posibilitatea de creștere a cantității de austenită necesară transformării martensitice specifică efectului TRIP.
- Elaborarea și turnarea a trei tipuri de oțeluri TRIP (două mărci de oțeluri slab aliate TRIP 1 și TRIP 2 și o marcă de oțel mediu aliat TRIP 3) cu compoziții chimice preluate din literatura de specialitate. Aceste oțeluri au fost necesare pentru realizarea studiilor comparative cu noua marcă de oțel (TRIP 4).
- Conceperea unei tehnologii personale de prelucrare a oțelurilor TRIP studiate care include aplicarea tratamentului termic de normalizare după deformarea plastică la cald și asimilarea încercării la impact cu operația de deformare plastică la rece.
- Înregistrarea video a modului de desfășurare a solicitării la șoc pentru a observa etapele care se succed în procesul de deformare plastică prin impact a elementelor din construcția structurii caroseriei autovehiculelor.
- Analiza comparativă și diferențiată a transformărilor: bainitică și martensitică. Prin microscopie electronică SEM au fost efectuate investigații microstructurale, la diferite puteri de rezoluție, asupra transformării  $F_{\gamma}(A) \rightarrow B + A_{rez}$  (călirea bainitică) și  $A_{rez} \rightarrow M + A_{rez}$  (călirea martensitică).
- Prin difracție de raze X au fost determinate:
  - cantitatea de austenită ce se transformă în bainită, la călire în baie de săruri;
  - cantitatea de austenită reziduală care se transformă în martensită, la răcirea cu viteză mare în aer.
- Efectuarea cercetărilor experimentale privind comportarea la impact prin adoptarea unor condiții similare cu cele reale, de exemplu viteza de impact corespunde unei deplasări a autovehiculului cu 60 km/h.
- Evidențierea capacității de răspuns a fiecărui tip de oțel solicitat mecanic la impact prin determinarea modului de variație a forței de răspuns ( $F_r$ ) specifică.
- Aprecierea intensității efectului TRIP pentru fiecare tip de oțel studiat prin studiul evoluției cantitative a transformărilor structurale induse prin impact, dar și a procesului de durificare a oțelurilor.

➤ Evaluarea modului de variație a durtății oțelurilor măsurată după fiecare operație de prelucrare tehnologică.

### 7.3 Direcții viitoare ale cercetărilor științifice

Direcțiile viitoare ale cercetărilor experimentale vor face referire la posibilitățile de îmbunătățire a celor două cerințe impuse oțelurilor TRIP:

- creșterea capacității de absorbție și disipare a energiei de impact;
- durificarea structurală a aliajelor pentru asigurarea forței sale de răspuns în cazul solicitării la șoc mecanic.

Pentru îndeplinirea acestor condiții sunt formulate unele teme de studiu pentru continuarea cercetărilor personale:

- Elaborarea și turnarea a cel puțin patru noi oțeluri, dintre care:
  - două oțeluri să prezinte un conținut mai mare de carbon, menținându-le calitatea de oțeluri slab aliate cu mangan;
  - două oțeluri să prezinte un conținut diversificat de elemente de aliere  $\gamma$ - gene, având calitatea de mediu aliate și cu un conținut redus de carbon.

În acest mod vor putea fi realizate studii comparative asupra posibilității de creștere a cantității de austenită reziduală necesară transformării martensitice din finalul prelucrărilor tehnologice.

➤ Realizarea analizei transformării structurale  $A_{rez} \rightarrow M$  indusă prin plasticitate, în condițiile specifice oțelurilor TRIP slab aliate (TRIP1 și TRIP2) respectiv a oțelurilor TRIP mediu aliate (TRIP3 și TRIP4);

➤ Stabilirea dependenței dintre valorile forței de impact ( $F_i$ ) și a forței de răspuns ( $F_r$ ), pentru fiecare oțel TRIP studiat. În acest mod va fi posibilă determinarea valorii forței ( $F_r$ ) pentru care efectul TRIP să aibă cea mai mare intensitate;

➤ Analiza microscopică calitativă și cantitativă asupra tipurilor de constituenți structurali formați în prezența diferitelor elemente de aliere prezente în compoziția chimică, sau a tratamentelor termice aplicate;

➤ Studiul asupra componentilor structurali care pot favoriza creșterea durtății oțelurilor, după solicitarea la impact, prin: durificarea mecanică și durificarea structurală;

➤ Optimizarea condițiilor de solicitare mecanică la impact pentru a obține cele mai favorabile valori ale efectului TRIP;

- Evaluarea procesului de deformare plastică la impact a oțelurilor realizate, prin analize bazate pe teoria dislocațiilor: determinarea evoluției densității de dislocații și stabilirea proceselor de mișcare, respectiv de blocare, a acestor defecte liniare;
- Înlocuirea unor tratamente termice prezente în tehnologiile actuale cu alte variante de prelucrare termică (de ex. aplicarea unei căliri de punere în soluție în locul normalizării de după deformarea plastică);
- Realizarea, prin deformarea plastică la rece a semifabricatelor obținute prin deformare plastică la cald, a unor elemente din structura de rezistență a caroseriei autovehiculelor. În acest mod se va trece la componenta implementării funcționale a rezultatelor cercetărilor personale.



## Bibliografie

1. Urbina, P.; Orta, P.; Ahuett-Garza, H., (2014), "Crashworthiness design based on a simplified deceleration pulse", *International Journal of Automotive Technology*, 15 (6): 909-917.
2. Kang, W.; Cho, S.; Huh, H.; Chung, D. *Identification of dynamic behavior of sheet metals for an auto-body with tension split Hopkinson bar*; 0148-7191; SAE Technical Paper: 1998.
3. Rana, R.; Singh, S. B., 2016, *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*. Woodhead Publishing.
4. Nakanishi, E.; Tateno, H.; Hishida, Y.; Shibata, K. *New materials technology for achieving both crashworthiness and weight reduction using energy-absorbing steel with higher strain-rate sensitivity*; 0148-7191; SAE Technical Paper: 1998.
5. Mintz, B., (2001), "Hot dip galvanising of transformation induced plasticity and other intercritically annealed steels", *International materials reviews*, 46 (4): 169-197.
6. Sugimoto, K.-I.; Kobayashi, M.; Hashimoto, S.-I., (1992), "Ductility and strain-induced transformation in a high-strength transformation-induced plasticity-aided dual-phase steel", *Metallurgical Transactions A*, 23 (11): 3085-3091.
7. Krizan, D.; ANTONISSEN, J.; De Cooman, B. In *Retained austenite stability in the cold rolled CMnAlSiP micro-alloyed TRIP steels*, 2004.
8. Zackay, V. F.; Parker, E. R.; Fahr, D.; Busch, R., (1967), "The enhancement of ductility in high-strength steels", *ASM Trans Quart*, 60 (2): 252-259.
9. Heller, T.; Nuss, A., (2005), "Effect of alloying elements on microstructure and mechanical properties of hot rolled multiphase steels", *Ironmaking & steelmaking*, 32 (4): 303-308.
10. Heller, T.; Nuss, A. In *Mechanical Properties and Behaviour of Hot-Rolled Retained-Austenite (TRIP)-and Dual-Phase Steels*, International Symposium on Transformation and Deformation Mechanisms in AHSS. Proceedings. CIM, Vancouver, 2003; pp 7-20.
11. Hanzaki, A. Z.; PD, H.; Yue, S., (1995), "Hot deformation characteristics of Si-Mn TRIP steels with and without Nb microalloy additions", *ISIJ international*, 35 (3): 324-331.
12. Pereloma, E. V.; Timokhina, I. B.; Hodgson, P. D., (1999), "Transformation behaviour in thermomechanically processed C-Mn-Si TRIP steels with and without Nb", *Materials Science and Engineering: A*, 273-275 448-452.
13. Coldren, A. P.; Eldis, G. T., (1980), "Using CCT Diagrams to Optimize the Composition of an As-Rolled Dual-Phase Steel", *JOM*, 32 (3): 41-48.
14. Sung-Joon, K. I. M.; Gil, L. E. E. C.; Tae-Ho, L. E. E.; Chang-Seok, O. H., (2002), "Effects of Copper Addition on Mechanical Properties of 0.15C-1.5Mn-1.5Si TRIP-aided Multiphase Cold-rolled Steel Sheets", *ISIJ International*, 42 (12): 1452-1456.
15. Sugimoto, K.-I.; Muramatsu, T.; Hashimoto, S.-I.; Mukai, Y., (2006), "Formability of Nb bearing ultra high-strength TRIP-aided sheet steels", *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (1): 390-395.
16. Sugimoto, K.-i.; Murata, M.; Muramatsu, T.; Mukai, Y., (2007), "Formability of C&ndash;Si&ndash;Mn&ndash;Al&ndash;Nb&ndash;Mo Ultra High-strength TRIP-aided Sheet Steels", *ISIJ International*, 47 (9): 1357-1362.
17. Chen, H. C.; Era, H.; Shimizu, M., (1989), "Effect of phosphorus on the formation of retained austenite and mechanical properties in Si-containing low-carbon steel sheet", *Metallurgical Transactions A*, 20 (3): 437-445.
18. Srivastava, A. K.; Jha, G.; Gope, N.; Singh, S., (2006), "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of cold rolled C-Mn-Si TRIP-aided steel", *Materials Characterization*, 57 (2): 127-135.

19. Bleck, W.; Schael, I., (2000), "Determination of crash-relevant material parameters by dynamic tensile tests", Steel research, 71 (5): 173-178.
20. Mizui, N.; Fukui, K.; Kojima, N.; Yamamoto, M.; Kawaguchi, Y.; Okamoto, A.; Nakazawa, Y., (1997), "Fundamental study on improvement in frontal crashworthiness by application of high-strength sheet steels", SAE transactions, 205-210.
21. Salzbrenner, R.; Cohen, M., (1979), "On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations", Acta Metallurgica, 27 (5): 739-748.
22. HKDH, B., (2002), "TRIP-assisted steels?", ISIJ international, 42 (9): 1059-1060.