

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ
„GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI**



**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE LA STUDIUL
PROCESULUI DE FABRICARE ȘI AL PROPRIETĂȚILOR UNOR
PIESE DIN OȚEL DE DAMASC**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Ioan Surugiu

Conducător de doctorat: Laurențiu Slătineanu

IAȘI, 2025

**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE LA STUDIUL
PROCESULUI DE FABRICARE ȘI AL PROPRIETĂȚILOR UNOR
PIESE DIN OȚEL DE DAMASC**

Ioan Surugiu
domeniul Inginerie Industrială

Președinte comisie doctorat:
Conducător de doctorat:
Referenți oficiali:

prof. univ. dr. ing. Laurențiu Slătineanu

CUPRINS

CUPRINS	3
INTRODUCERE	5
Capitolul 1. CONSIDERAȚII ACTUALE PRIVIND INFORMAȚIILE ȘTIINȚIFICE ȘI TEORETICE PRIVIND ISTORIA FABRICĂRII OȚELURILOR DE DAMASC.....	6
1.1. Oțelurile. Clasificarea, proprietățile și utilizarea lor	6
1.2. Oțelurile de Damasc. Istoria apariției și dezvoltării lor.....	6
1.3. Procedee de fabricare a oțelurilor de Damasc	7
1.4. Echipamente și materiale pentru fabricarea oțelurilor de Damasc	11
1.5. Proprietățile oțelurilor de Damasc	11
1.6. Influența diferiților factori asupra proprietăților oțelurilor de Damasc	12
1.7. Rezultate recente ale cercetărilor privind fabricarea și proprietățile oțelurilor de Damasc utilizând metode moderne.....	12
1.8. Aspecte contradictorii sau mai puțin aprofundate privind fabricarea și proprietățile oțelurilor de Damasc.....	13
1.9. Concluzii.....	13
Capitolul 2. OBIECTIVE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE PROPUSE	14
2.1. Oportunitatea și necesitatea unor cercetări privind fabricarea și proprietățile oțelurilor de Damasc	14
2.2. Strategia propusă pentru cercetarea fabricării și al proprietăților oțelurilor de Damasc	14
2.3. Obiective ale cercetării documentare.....	14
2.4. Obiective ale cercetării teoretice.....	14
2.5. Obiective referitoare la baza materială pentru cercetările experimentale	14
2.6. Obiective ale cercetării experimentale	14
Capitolul 3. CONTRIBUȚII TEORETICE LA STUDIUL PROSESULUI DE FABRICARE A PIESELOR DIN OȚEL DE DAMASC	14
3.1. Tipuri procedee de sudare prin presiune	14
3.2. Utilizarea metodei diagramei de idei la proiectarea și optimizarea unui dispozitiv de răsucit bare prismatice din oțeluri Damasc.....	14
3.3. Utilizarea metodei proiectării axiomatice pentru stabilirea optimă a traseului tehnologic de fabricare a pieselor din oțel de Damasc.....	15
3.4. Utilizarea tehnica deciziei impuse pentru determinarea metodei de fabricare a unor piese din oțel de Damasc.....	17
3.5. Utilizarea metodei diagramei Ishikawa pentru determinarea posibilității apariției oxizilor între fâșiile pachetului în timpul procesului de forjare a oțelurilor de Damasc.....	19
3.6. Determinarea tipului de echipament necesar procesului de uzare prin abrazare a unor probe sub formă de bare prismatice fabricate din oțel de Damasc, utilizând metoda Deciziei Impuse	19
3.7. Utilizarea Metodei Corelației de Rang pentru ordonarea influenței factorilor asupra rezultatelor unor teste de uzură.....	21
3.8. Concluzii privind contribuțiile teoretice la studiul procesului de fabricație a oțelurilor de Damasc	22

Capitolul 4. MATERIALE ȘI ECHIPAMENTE NECESARE STUDIULUI FABRICĂRII UNOR PIESE DIN OȚEL DE DAMASC PRIN FORJARE LA TEMPERATURI RIDICATE.....	24
4.1. Material antioxidant, soluții pasivante, soluție neutralizantă și materiale metalice necesare realizării unor epruvete.....	24
4.2. Unelte manuale folosite în timpul procesului	25
4.3. Dispozitiv pentru testarea epruvetelor la uzare prin abrazare	25
4.4. Echipamente acționate electric.....	26
4.5 Echipament pentru încălzirea materialelor în vederea forjării și tratamentului termic	27
4.6. Materiale și echipamente utilizate la determinarea compoziției chimice, a proprietăților mecanice și la studiul metalografic.....	27
4.7. Materiale utilizate la efectuarea tratamentului termic călire și revenire	28
4.8. Concluzii privind logistica necesară fabricației oțelului	28
Capitolul 5. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND PROCESUL DE FABRICAȚIE ȘI AL PROPRIETĂȚILOR UNOR PIESE DIN OȚEL DE DAMASC.....	30
5.1. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet format din 9 de fâșii cu 4 tipuri de oțel – Descrierea procesului	30
5.2. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet format din 26 de benzi cu 3 tipuri de oțel – Descrierea procesului	30
5.3. Fabricarea oțelului de Damasc prin metoda aglomerării de particule 3 tipuri de oțel – Descrierea procesului.....	32
5.4. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet compus din 92 de benzi din 2 tipuri de oțel – Descrierea procesului	32
5.5. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet compus din 20 de benzi din 2 tipuri de oțel inoxidabil – Descrierea procesului	33
5.6 Etapele fabricării epruvetei de oțel de Damasc compusă din 40 de benzi	33
5.7. Contribuții privind testarea la uzare prin abrazare a probei din 40 de benzi.....	34
5.8. Concluzii.....	37
Capitolul 6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PROPRII ȘI DIRECȚII ALE CERCETĂRIILOR VIITOARE	38
6.1. Concluzii generale privind rezultatele cercetării documentare	38
6.2. Concluzii generale privind rezultatele cercetărilor teoretice.....	38
6.3. Concluzii generale privind constituirea bazei materiale necesare în cadrul încercărilor experimentale	38
6.4. Concluzii generale privind rezultatele studiilor experimentale.....	38
6.5. Contribuții proprii	39
6.6. Direcții viitoare de cercetare	39
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE	40

INTRODUCERE

Oțelurile de Damasc reprezintă un subiect de interes deosebit în domeniul materialelor metalice datorită proprietăților lor remarcabile, cum ar fi tehnologia de fabricație, rezistența mecanică ridicată, duritatea și aspectul estetic distinctiv. Aceste aliaje speciale sunt caracterizate printr-o microstructură complexă, obținută prin combinarea repetată a mai multor straturi de oțel cu compoziții diferite, ceea ce le conferă un model unic de suprafață și o combinație optimă de rezistență și flexibilitate. Istoria acestor oțeluri este profund legată de evoluția metalurgiei și tehnologiei de prelucrare, fiind utilizate încă din antichitate pentru realizarea armelor de elită, precum săbii și pumnale, dar și a uneltelor de mare precizie. Se consideră că tehnologia inițială a fost dezvoltată în Orientul Mijlociu și Asia de Sud, unde meșteșugarii specializați au perfecționat tehnicile de forjare și tratament termic, pentru a obține materiale cu caracteristici mecanice superioare.

Lucrarea de față urmărește să aducă o contribuție semnificativă atât pe plan teoretic, cât și experimental, la studiul detaliat al procesului de fabricare a pieselor din oțel de Damasc, precum și la analiza proprietăților acestora. În acest sens, prima parte a lucrării este dedicată unei examinări aprofundate a informațiilor științifice și teoretice disponibile în prezent, având în vedere atât perspectiva istorică a fabricării acestor oțeluri, cât și evoluția metodelor de producție de-a lungul timpului. Sunt analizate în detaliu atât tehnicile tradiționale utilizate în realizarea oțelurilor de Damasc, cât și cele moderne, care integrează procese avansate de prelucrare pentru obținerea unor materiale cu proprietăți îmbunătățite.

Un alt aspect esențial abordat în această lucrare îl reprezintă analiza rezultatelor recente ale cercetărilor din domeniu, care demonstrează importanța utilizării tehnologiilor inovatoare pentru fabricarea și optimizarea proprietăților oțelurilor de Damasc. Prin investigarea metodelor avansate de forjare, tratament termic și caracterizare structurală, studiul de față își propune să evidențieze beneficiile implementării acestor tehnici în vederea obținerii unor piese de o calitate superioară, cu aplicabilitate extinsă în diverse sectoare industriale.

În cel de-al doilea capitol al lucrării sunt conturate obiectivele fundamentale ale cercetării, alături de direcțiile specifice de investigare a procesului de fabricare a pieselor din oțel de Damasc. Aceste obiective sunt structurate astfel încât să acopere atât aspectele teoretice ale procesului de fabricație, cât și abordările experimentale menite să analizeze și să optimizeze caracteristicile materialului obținut. Prin stabilirea clară a acestor direcții, se asigură un cadru metodologic bine definit, care să permită obținerea unor concluzii relevante și aplicabile în practică.

Capitolul al treilea este dedicat contribuțiilor teoretice la studiul procesului de fabricație a pieselor din oțel de Damasc, integrând metode avansate de analiză și optimizare. Printre tehnicile explorate se numără utilizarea diagramei de idei pentru proiectarea și perfecționarea dispozitivelor utilizate în procesul de fabricație, aplicarea metodei proiectării axiomatice pentru determinarea traseului tehnologic optim, precum și utilizarea metodei Ishikawa pentru identificarea factorilor care pot influența calitatea materialului forjat. Aceste metode permit o înțelegere mai profundă și sistematică a procesului de fabricație, contribuind la optimizarea acestuia și la obținerea unor produse finale cu caracteristici superioare.

În capitolul al patrulea sunt detaliate cercetările experimentale privind materialele și echipamentele utilizate în fabricarea pieselor din oțel de Damasc prin forjare la temperaturi ridicate. Se pune un accent deosebit pe selectarea celor mai adecvate combinații de materiale, pe identificarea parametrilor optimi de proces și pe analiza influenței acestora asupra proprietăților finale ale pieselor obținute. Studiul experimental urmărește să ofere informații esențiale despre comportamentul materialelor în diferite condiții de prelucrare, contribuind astfel la îmbunătățirea tehnologiilor de fabricație.

Ultimul capitol al lucrării se concentrează asupra contribuțiilor experimentale legate de procesul de fabricație și de caracteristicile funcționale ale pieselor realizate din oțel de Damasc. Printr-o serie de teste specifice, sunt evaluate proprietățile mecanice, durabilitatea și rezistența la uzură a materialului obținut, oferind o perspectivă detaliată asupra performanței acestuia în diverse aplicații industriale. Rezultatele obținute permit nu doar validarea modelelor teoretice propuse, ci și formularea unor recomandări pentru îmbunătățirea procesului de producție și a calității materialelor realizate.

Lucrarea de față aduce o contribuție semnificativă la aprofundarea cunoștințelor în domeniul fabricării oțelurilor de Damasc, combinând aspectele teoretice cu cele experimentale. Rezultatele cercetărilor prezentate pot fi utilizate pentru optimizarea metodelor de producție, pentru creșterea performanțelor materialelor și pentru deschiderea unor noi direcții de cercetare în acest domeniu complex și fascinant.

Capitolul 1. CONSIDERAȚII ACTUALE PRIVIND INFORMAȚIILE ȘTIINȚIFICE ȘI TEORETICE PRIVIND ISTORIA FABRICĂRII OȚELURILOR DE DAMASC

1.1. Oțelurile. Clasificarea, proprietățile și utilizarea lor

Metalurgia fierului a apărut între anii 1700 și 1400 î.Hr., având descoperiri semnificative în regiunea Anatoliei, marcând începutul epocii fierului. Cele mai vechi artefacte conținând fier au fost descoperite în Irak, Iran și în zona estică și sud-estică a bazinului mediteranean (Egipt, Turcia, Cipru), datând din jurul anului 5000 î.Hr. Aceste obiecte se suprapun cronologic cu epoca aurului și bronzului (3000 – 1600 î.Hr.) și conțin fier provenit nu neapărat din minereu, ci din fragmente meteorice, cunoscute sub numele de „siderite”. Populațiile din America Centrală și de Sud, inclusiv aztecii, mayașii și incășii, utilizau unelte tăietoare realizate din astfel de fragmente meteorice, prelucrate prin șlefuire, similar obiectelor din piatră.

Analiza microstructurii acestor artefacte, realizată cu tehnici moderne, a relevat prezența unui conținut ridicat de nichel (5 – 26%), cobalt în cantități reduse (sub 1%), precum și fosfor, sulf și carbon (Durand-Charre, 2014).

Oțelul a început să fie obținut încă din antichitate prin spălarea, zdrobirea și reducerea minereului de fier în cuptoare primitive săpate în pământ și încălzite cu lemn și cărbune. Temperaturile scăzute din aceste cuptoare produceau un material poros, cu un conținut variabil de carbon, îmbogățit prin interacțiunea fierului topit cu cărbunele (Durand-Charre, 2014; Gnesin, 2016).

Oțelul este un aliaj alcătuit în principal din fier și carbon, având un conținut de carbon sub 2,11%; aliajele cu un procent mai mare de carbon sunt denumite fonte. În prezent, oțelul este cel mai utilizat material metalic, fiind esențial în structurile ce necesită o rezistență mecanică ridicată și o bună durabilitate la uzură. Pentru îmbunătățirea proprietăților sale în diverse condiții mecanice și chimice, oțelul este aliat cu diverse elemente în proporții variabile (Surugiu et al., 2022).

Oțelurile sunt clasificate în două categorii principale: nealiat (carbon) și aliat (conțin elemente precum crom, nichel, mangan etc.). Acestea pot fi obținute prin diverse metode, inclusiv cuptorul Siemens-Martin, cuptorul electric și convertizorul.

În trecut, metode tradiționale precum oțelul de Damasc și Wootz au produs aliaje cu proprietăți remarcabile de duritate și rezistență, utilizate pentru fabricarea armelor.

1.2. Oțelurile de Damasc. Istoria apariției și dezvoltării lor

Oțelurile de Damasc au devenit renumite spre sfârșitul primului mileniu, fiind menționate de scriitorii și cercetătorii islamici al-Kindi (Abu Ya'qub ibn Ishaq al-Kindi, cca. 800-873 d.Hr.) și al-Biruni (Abu al-Rayhan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni, cca. 973-1048 d.Hr.). Aceștia au propus mai multe ipoteze privind originea denumirii „oțel de Damasc”. Una dintre teorii sugerează că numele provine de la orașul Damasc, un important centru comercial al epocii, unde acest tip de oțel era intens comercializat. O altă explicație leagă denumirea de cuvântul arab „damas”, care înseamnă „apă”, datorită aspectului distinctiv al suprafeței oțelului, caracterizat de linii ondulate ce amintesc de valurile apei sau de mătasea udă.

Oțelurile Wootz ar fi apărut pe la mijlocul mileniului I î.Hr. în sudul Indiei, sub formă de lingou turnat ce avea greutatea cuprinsă între 2 - 2.5 kg. Acesta s-a obținut prin topire de minereu de fier într-un creuzet și care după răcire lentă prezenta benzi caracteristice fine, caracterizate print-un conținut ridicat de carbon, în jur de 1,5%. Fâșiile fine (fig. 1.1) erau date de prezența unor componente microscopice de carburi într-o matrice de martensită sau perlită, ce reprezintă zonele cu conținut ridicat de carbon, alternând cu straturi de perlită și ferită, caracteristice oțelurilor cu conținut scăzut de carbon (Verhoeven et al. 1998; Wadsworth, 1980; Reibold et al., 2009; Perttula, J. 2001, Verhoeven, 2002, Verhoeven, 2001).

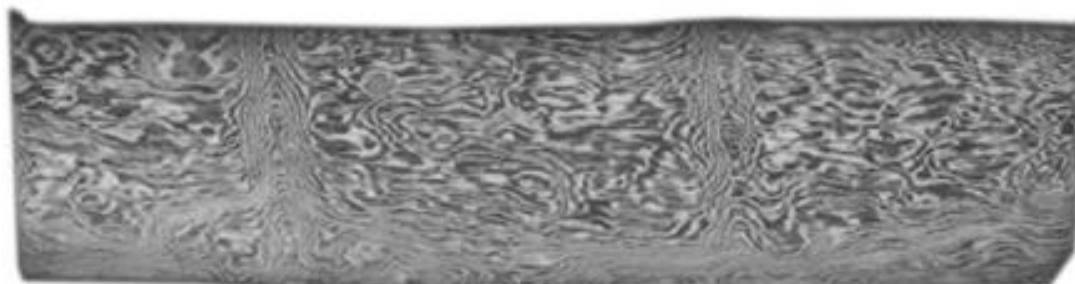


Figura. 1.1. Model caracteristic oțelului Wootz (Verhoeven et al. 1998; Verhoeven, 2002)

Oțelurile de Damasc sunt obținute prin forjarea la cald a diferitelor tipuri de oțeluri, fără a folosi energie electrică sau materiale de adaos. Îmbinarea acestora se realizează prin presiune și forțe de coeziune interatomică, fără utilizarea gazelor protectoare. Acest proces necesită temperaturi ridicate și o presiune mare pentru a asigura sudarea prin a materialelor (Taleff, 2001; Sachse, 2008).

Originea exactă a tehnicii de fabricare rămâne un mister. Prima mențiune documentară datează din jurul anului 300 î.Hr., când acest oțel era cunoscut sub numele de „wootz” și provenea din sudul Indiei. După prelucrarea sa de către fierarii din Damasc, a devenit celebru pentru fabricarea săbiilor și armurilor. Ulterior, tehnologia s-a răspândit în Europa și Asia, fiind perfecționată de fierarii japonezi în secolul al XIII-lea pentru producerea săbiilor de samurai (Židzik, 2021; Srinivasan, 2004).



Fig. 1.2. Aspect caracteristic oțelului de Damasc forjat din pachet de benzi (Židzik, 2021)

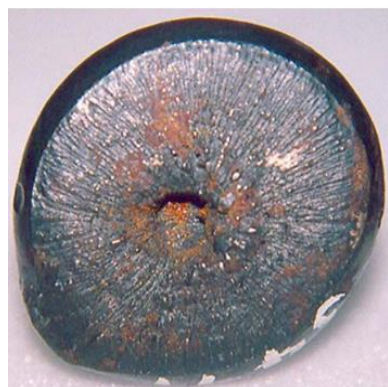


Fig. 1.3. Pastilă de oțel Wootz aflat în Muzeul „Science” din Londra (Srinivasan, 2017)

Compoziția oțelului de Damasc este una formată din oțel dur cu conținut mare de carbon, aproximativ 1,5% și oțel tenace cu conținut scăzut de carbon. Această combinație face ca proprietățile sale mecanice să fie unice și cu un aspect vălurit, rezultat după pasivarea naturală în timp sau în soluție acidă (fig.1.2.).

Aceste materiale nu erau faimoase numai datorită proprietăților de tăiere și a rezistenței lor în timp, cât și datorită aspectului caracteristic vizibil pe suprafețele obiectelor și armelor fabricate (Sherby și Wadsworth, 2000).

Din antichitate și până în secolele al XVII-lea și al XVIII-lea, când interesul europenilor pentru oțelul de Wootz a crescut considerabil, a fost utilizat un oțel cu un conținut de peste 1% carbon, având carbură formată în exces, reprezentată de cementită secundară, ledeburită și cementită primară. Material necunoscut în Europa acelor vremuri, era în general, folosit la fabricarea săbiilor de Damasc și alte obiecte de protecție folosite în lupte de către soldați. Oțelul Wootz este un oțel de creuzet ce era produs sub formă de pastilă (fig. 1.3.) ce cântărea câteva kilograme, exportat în Persia și Siria, unde era prelucrat prin forjare manuală (Srinivasan, 2017; Sukhanov, 2016).

1.3. Procedee de fabricare a oțelurilor de Damasc

Cele mai vechi artefacte din oțel de Damasc, expuse în muzeele din întreaga lume, includ lame de săbii și alte obiecte realizate din oțel Wootz. Acest tip de oțel, cu un conținut ridicat de carbon (1,2 – 1,6%), era importat în Persia din India și Sri Lanka.

Oțelul Wootz era produs în creuzete, existând două metode presupuse de obținere:

- prima metodă implica topirea minereului de fier împreună cu materie organică (de obicei cărbune), ceea ce permitea îmbogățirea cu carbon în timpul procesului. Răcirea lentă favoriza formarea unei rețele dendritice de cementită (Fe_3C) într-o matrice perlitică. Forjarea la temperaturi scăzute ducea la sferoidizarea cementitei primare și la formarea unui model stratificat în masa de perlită fină (Peterson, et al., 1990; Verhoeven și Pendray, 1992)..
- a doua metodă presupunea topirea în creuzet a oțelului forjat împreună cu fontă bogată în carbon, așa cum a descris al-Biruni (973–1048). Și în acest caz, procesul era urmat de o răcire extrem de lentă.

Strobl et al., (2017) a prezentat în cadrul acestei lucrări, modalitatea de replicare a fabricației unei săbii descoperite de arheologi în regiunea Carintia, lângă Grabelsdorf, Austria. Investigațiile arheologilor, au arătat că este o sabie Sax, produsă în Europa din oțel de Damasc cu aproximație în secolul al VIII-lea. Cunoscând elementele chimice ce alcătuiesc materialul sabiei s-a căutat un echivalent în oțelurile moderne, Pentru partea de oțel de Damasc s-a folosit un oțel cu conținut foarte scăzut de carbon, sub 0,1%, produs în anul 1550, forjat împreună cu oțel C45, iar pentru miezul lamei s-a utilizat oțel C60.

Oțelul de Damasc a fost fabricat inițial din 9 plăci de material (fig. 1.4.), 5 dintre acestea au fost din oțel slab aliat (D1) și 4 plăci din oțel cu conținut mai ridicat de carbon, cuprins între 0,42 – 0,5%.



Fig. 1.4. Pachet de fâșii pentru forjare (Strobl et al., 2017)

Întreg pachetul a fost încălzit până la temperatura de 1100°C și forjat manual cu ciocanul pe nicovală până s-a obținut un semifabricat tip bară prismatică. Apoi, bara obținută a fost debitată în trei părți egale, care la rândul lor au fost suprapuse și forjate din nou sub formă de bară prismatică, obținându-se astfel 27 de straturi. Ulterior acesta a fost răsucită la cald în lungul axei, de câteva ori și forjată manual din nou la formă prismatică.

După finalizarea forjării lamei, acestea i se aplică un tratament termic de călire cu răcire în apă și revenire la 200°C , apoi după polizare și lustruire, aceasta se scufundă într-o soluție cu 30% acid sulfuric pentru evidențierea modelului caracteristic oțelului de Damasc.

După răsucire și forjare finală, bara avea secțiune pătrată de 20×20 mm, apoi a fost polizată pe toată lungimea sa, obținându-se o grosime de 6mm. În acest fel au fost realizate două bare identice ca formă și procedeu.

Materialul miezului lamei, un oțel C60 cu conținut de carbon cuprins între 0,57 și 0,65%, a fost forjată sub formă de bară cu dimensiunile de $650 \times 20 \times 10$, apoi i s-au forjat simetric două margini de 3mm. Miezul astfel format a fost împachetat împreună cu cele două tije de oțel de Damasc cu câteva coliere metalice și supus procesului de forjare până la obținerea formei dorite a lamei de sabie din figura 1.5.



Fig. 1.5. Lamă din oțel de Damasc cu miez din oțel carbon (Strobl et al., 2017)

Autorii lucrării, pe lângă lama de sabie, au produs similar cu aceasta o mostră pentru probe metalografice și de duritate. Proba a fost prelucrată prin șlefuire și lustruire, tratată cu 1% soluție cu nital, apoi s-au făcut unele observații metalografice au scos în evidență mai multe aspecte caracteristice oțelurilor de Damasc,

Verhoeven J. profesor de metalurgie la Universitatea de Stat din Iowa și Pendray A. fierar din Williston Florida, interesați de metodele de fabricație a misteriosului oțel de Damasc, prin mai multe încercări, reușesc să realizeze reproducerea cât mai aproape de modelul antic a oțelului legendar, prin topire într-un creuzet și obținerea unui lingou de astfel de material compozit.

Prin mai multe încercări eșuate parțial, au ajuns la rezultate mult îmbunătățite folosind în procesul de topire în creuzet a unui oțel obținut dintr-un minereu din Canada. În probele astfel obținute, s-a constatat prezența în procente foarte mici a carburilor formate din vanadiu și titan. În urma acestor cercetări, autorii au rămas cu o problemă încă neelucidată, de ce impuritățile de vanadiu și titan formează carburi în timpul procesului și celelalte elemente, cum ar fi sulful, fosforul, siliciul și manganul, nu formează și acestea carburi în timpul procesului de topire și apoi forjare la cald.

Strobl S. și Haubner R. au realizat o cercetare experimentală cu ajutorul unui fierar Wolfgang Scheiblechner, din Palfau, Austria, în urma căreia s-a forjat un pachet de plăci de aproximativ 2,5 mm grosime din oțel cu conținut mic de carbon și fontă ductilă, așezate alternativ (fig. 1.6).

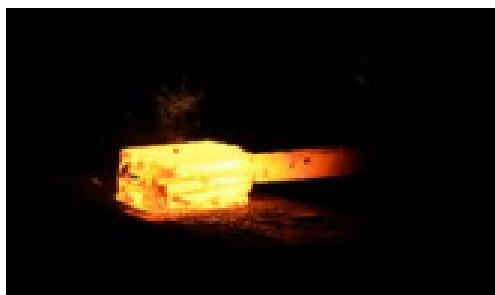


Fig. 1.6. Pachet de plăci de oțel cu conținut scăzut de carbon și fontă ductilă (Strobl și Haubner 2016)



Fig. 1.7. Eliminarea fontei topite în timpul forjării (Strobl și Haubner 2016)

În primul experiment, pachetul a fost încălzit la temperatura de 1100 °C. Datorită temperaturii prea mari, fonta s-a topit și a fost eliminată în timpul forjării (fig. 1.7). În al doilea experiment s-a scăzut temperatura la 900 °C și s-a constatat că temperatura este prea mică pentru a suda plăcile între ele prin forjare. S-a mărit temperatura pentru a treia încercare, la 1050 °C, și de această dată temperatura a fost tot mare, fonta s-a topit și a fost eliminată în timpul forjării.

Într-un studiu publicat în 2016, Sukhanov și Arkhangel'skii analizează modificările formei și morfologiei cementitei în funcție de nivelul de suprarăcire a topiturii aliajului. Cercetarea compară microstructura oțelului cu conținut ridicat de carbon și cea a oțelului de Damasc.

Pentru studiu, au fost folosite trei aliaje de oțel cu diferite concentrații de carbon (1,62%, 2,25% și 2,7%), obținute prin topire într-un creuzet încălzit într-un cuptor cu vid. S-au prelevat probe atât după răcire, cât și după forjare, pentru analiza microstructurii.

Rezultatele au arătat că:

- aliajul cu 1,62% carbon formează cementită aciculară în matricea de perlită, cu grosimi între 3 și 5 μm (imaginea a din figura 1.8)
- aliajul cu 2,25% carbon generează același tip de cementită, dar cu grosimi de 7–10 μm (vezi imaginea c din figura 1.8).

După forjare, lamelele de cementită se fragmentează în segmente mai scurte, așa cum se observă în imaginile b și d ale figurii 1.8 (Sukhanov, et al., 2016; Sukhanov, et al., 2017).

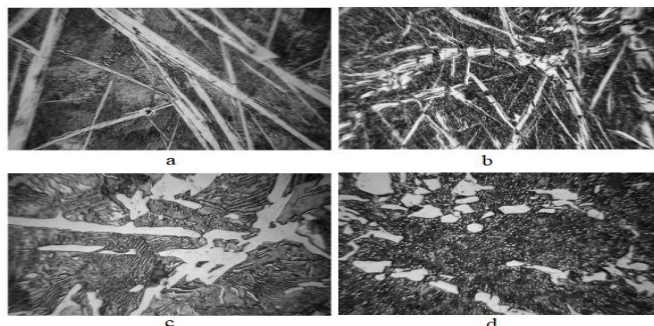


Fig. 1.8 Microstructură cu cementită aciculară, a-c după topire, b-d după forjare (Sukhanov și Arkhangel'skii, 2016)

Microstructura aliajului de oțel cu conținut de 2,7% carbon, este formată din perlită și o rețea de ledeburită dendritică în exces, cu grosimi ce variază între 20–30 μm și 50–100 μm , exemplificate în imaginile din figura 1.9.



Fig. 1.9. Forme dendriculare ale ledeburite din aliajul cu 2,70%C (Sukhanov și Arkhangel'skii, 2016)

După forjare, microstructurile dendriculare s-au fragmentat în ledeburită (20–50 μm) și cementită eutectoidă (10–20 μm), distribuite într-o matrice de particule fine de sorbită (0,2 μm).

Autorii au constatat că aliajul cu 2,25% carbon are o structură neomogenă, formată din fragmente de carbură eutectoidă cu formă prismatică triunghiulară, asemănătoare oțelurilor utilizate pentru scule, matrițe și oțeluri rapide, care au o structură mai omogenă (Sukhanov, et al., 2016; Sukhanov, et al., 2017).

Lamsam et al. (2012) descrie oțelul japonez Tamahagane, similar cu Wootz ca tehnologie de producție. Acesta se obține prin topirea minereului de fier într-un cuptor tradițional numit Tataka, construit manual din lut, argilă, pietre și lemn. Procesul durează aproximativ trei zile, timp în care minereul este stratificat cu cărbune pentru a îmbogăți oțelul cu carbon. După răcire, se formează un bloc de aproximativ 2,5 tone de oțel, spart ulterior în bucăți potrivite pentru forjare. Cel mai valoros oțel, cu un conținut de carbon între 0,6 și 1,5%, era folosit pentru fabricarea celebrelor săbii Katana, meșteșug păstrat până astăzi.

Bucățile de Tamahagane erau sparte în segmente prismatice (25x25 mm, grosime 5-6 mm) și aranjate într-un pachet pe o placă de oțel moale. Acestea erau învelite în hârtie, argilă și cenușă de paie de orez pentru a preveni oxidarea în timpul forjării. Pachetul era încălzit la 1300°C și forjat manual până la sudarea bucăților, repetându-se procesul de pliere și forjare.

După mai multe etape de forjare, semifabricatul era modelat în formă de U („Kawagane”, denumire din limba japoneză), în care se introducea o bară de oțel moale („Shingane”, denumire din limba japoneză), cu rol de a crește tenacitatea lamei. Miezul din oțel moale putea fi și o fâșie mai îngustă, forțată împreună cu stratul exterior din Tamahagane pentru a forma secțiunea lamei, după cum se poate observa în imaginile din figura 1.10.

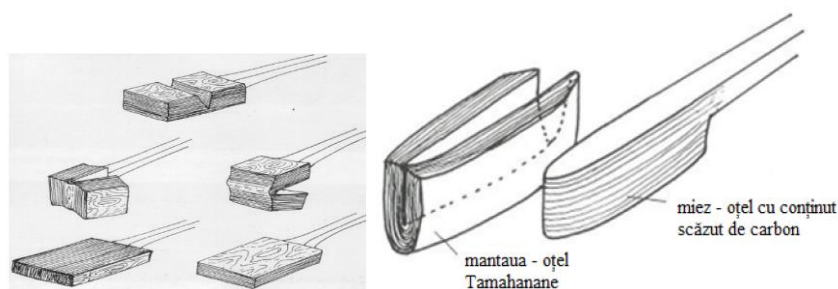


Fig. 1.10. Exemplu de pliere oțel Tamahagane și Mantaua în formă de „U” și miezul (adaptat după Lamsam et al., 2012)

Prin acest proces complex, lama obținea o structură stratificată, combinând duritatea mare cu flexibilitatea. Microstructura rezultată, martensitică și troostitică (perlită fină), asigura duritate de 700-820 HV pe tăiș, scăzând spre corpul lamei. Această distribuție a durității era obținută prin tratament termic diferențiat: corpul lamei era acoperit cu argilă în timpul călirii, permițând doar tăișului să se durifice. După tratament, stratul de argilă era îndepărtat, iar lama obținea proprietățile sale unice (Wadsworth și Lesuer, 1999).

Royer, K. 2022 realizează și expune în cadrul unui tutorial video producerea în detaliu a unui lame de cuțit de vânătoare din oțel de Damasc, așa cum definește autorul, „cu pene” (fig. 1.11).



Fig. 1.11. Aspect oțel de Damasc (Royer, 2022)

Pentru realizarea oțelului de Damasc se utilizează 3 tipuri de oțel cu diferite conținuturi de carbon, așezate alternativ într-un pachet compus din 44 fâșii de tablă.

Experimentul descris de Royer (2022) demonstrează procesul de fabricare a oțelului de Damasc, evidențiind pașii esențiali pentru obținerea unui semifabricat cu model distinct. Procesul include formarea și debitarea unui pachet de fâșii metalice, îndepărtarea oxizilor, sudarea fâșiilor prin forjare la cald, încălzirea și presarea succesivă pentru omogenizare, despicarea semifabricatului și reasamblarea prin sudură. După finalizarea forjării, semifabricatul este secționat, finisat și tratat chimic pentru evidențierea modelului specific oțelului de Damasc.

Experimentul folosește trei tipuri de oțel (1015, 1020 și 1084), fiecare având o compoziție chimică diferită, influențând aspectul final al materialului. Publicat în 2022, tutorialul a stârnit un interes considerabil. La finalul procesului, autorul transformă o bucată de oțel de Damasc într-un cuțit utilitar, demonstrând aplicabilitatea tehnicii în realizarea obiectelor de mare valoare estetică și economică.

În cadrul unui tutorial video realizat de Crawford, C., Neilson, J. explică procesul de fabricare a oțelului de Damasc folosind metoda aglomerării de particule, „Canister” (canister – denumire din limba engleză). Aceasta presupune

utilizarea unei casete metalice în care se plasează piese mici de oțel, cum ar fi bile de rulment și fragmente din oțel aliat, umplute cu pulbere metalică pentru a elimina golurile. Casetă este presată la temperaturi de 1100-1200°C, iar după răcire, pereții casetei sunt îndepărtați, iar semifabricatul este lustruit și tratat pentru a evidenția modelul caracteristic oțelului de Damasc, cum se pot vedea în imaginile figurii 1.12.



Fig. 1.12. a - Faza desfacerii casetei; b - Semifabricat din bile mici de rulment; c. semifabricat din piese mici (Crawford, 2017)

Metoda „Canister” imită procesul de metalurgie a pulberilor și conferă materialului obținut tenacitate, duritate și un aspect estetic distinctiv. Principalele avantaje sunt re folosirea materialelor de valoare mare, obținerea unor materiale cu proprietăți mecanice superioare și un design exterior deosebit. Totuși, există dezavantaje, precum costurile ridicate ale semifabricatelor și necesitatea unui control tehnologic deosebit.

1.4. Echipamente și materiale pentru fabricarea oțelurilor de Damasc

Fabricarea oțelului de Damasc, încă din antichitate, implica cunoștințe avansate despre materiale și tehnici de forjare, utilizând echipamente rudimentare, precum cuptoare din piatră și lut, forje cu lemn și cărbune, nicovale și pietre naturale pentru ascuțire. Cu timpul, tehnologia metalurgică s-a dezvoltat, apărând echipamente moderne, cum ar fi cuptoare electrice și presele hidraulice.

Începând cu mileniul I î.Hr., oțelul de Damasc era fabricat din oțelul de Wootz provenit din India, iar meșteșugarii din Damasc realizau săbii și armuri prin forjări repetate. Oțelul de Damasc de calitate superioară a fost obținut prin combinarea diferitelor tipuri de oțeluri, fiecare conferind materialului caracteristici precum duritatea, tenacitatea și elasticitatea. În prezent, pentru fabricarea acestui oțel se utilizează metoda „Canister”, care implică combinarea pieselor mici de oțel într-o casetă metalică, iar pulberile metalice acționează ca liant.

Pentru verificarea calității oțelului de Damasc, se folosesc aparate speciale care măsoară duritatea, compoziția chimică și rezistența mecanică. De asemenea, tratamentele chimice de pasivare sunt esențiale pentru evidențierea modelului caracteristic al oțelului și protecția împotriva coroziunii. În timpul procesului de încălzire, se adaugă substanțe precum boraxul pentru a preveni oxidarea și defectele materialului.

Astfel, oțelul de Damasc rămâne un material cu performanțe remarcabile datorită tehnologiilor tradiționale și moderne combinate.

1.5. Proprietățile oțelurilor de Damasc

Oțelurile de Damasc sunt cunoscute pentru proprietățile lor mecanice excepționale, având o tenacitate ridicată, care le conferă rezistență la șocuri și vibrații, și o duritate mare, ce asigură o bună rezistență la tăierea repetată. Duritatea este datorată conținutului ridicat de carbon, între 1,2-2,1%, și prezenței cementitei în straturi. Lamele de Damasc din Orientul Mijlociu erau realizate din oțel de Wootz, un oțel de creuzet cu carbon ridicat, iar modelul de suprafață vălurit era dat de fragmente mici de cementită.

Un studiu din 2019, Sukhanov și Plotnikova, au evidențiat că oțelul de Damasc autentic are o puritate excepțională și o microstructură cu straturi de cementită aranjate în mod precis (fig 1.13), în lungul direcției de forjare. Analizele au arătat că proprietățile mecanice ale acestuia corespund unui oțel cu carbon ridicat și microstructură perlitică fină. În cadrul cercetării, autorii au comparat oțelul de Damasc cu un oțel carbon pentru scule și au demonstrat că oțelul de Damasc are o rezistență superioară la uzură, chiar și la forțe de apăsare mici. La apăsare mare, oțelul pentru scule devine superior.

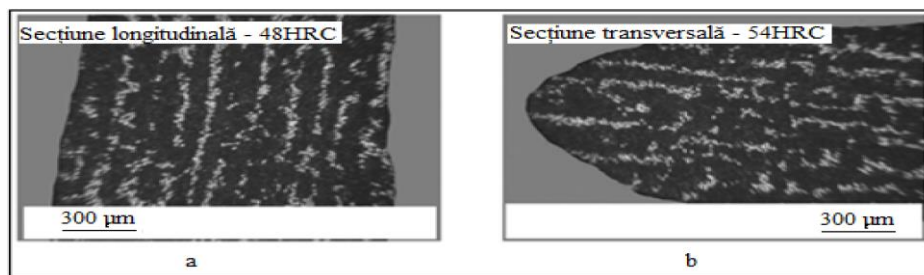


Fig. 1.13. Microstructură oțel de Damasc (adaptat după Sukhanov și Plotnikova, 2019)

Testele de rezistență la oboseală au arătat că oțelul de Damasc rezistă de două ori mai mult la lovituri decât oțelul pentru scule, datorită tenacității straturilor de oțel cu conținut mai scăzut de carbon. În contrast, oțelul pentru scule, cu o microstructură omogenă și tratament termic de călire, devine fragil și mai susceptibil la oboseală prin lovire.

1.6. Influența diferiților factori asupra proprietăților oțelurilor de Damasc

Oțelurile de Damasc sunt apreciate pentru duritatea ridicată, care le conferă o rezistență excelentă la tăieri repetate, și pentru tenacitatea mare, ce le face rezistente la lovituri, vibrații și șocuri. Acestea au un aspect distinctiv, cu ondulații pe suprafață, formate prin plierea și răsucirea straturilor de oțel.

Proprietățile mecanice ale oțelurilor de Damasc depind de mai mulți factori, printre care: proporțiile dintre oțelul cu conținut scăzut și cel cu conținut ridicat de carbon, alternanța straturilor de oțel slab aliat și oțel înalt aliat, tratamentele termice de călire și revenire, numărul de plieri, compatibilitatea materialelor la forjare și oxidarea suprafețelor în timpul procesului de fabricare. Oțelul de Damasc trebuie să fie protejat împotriva coroziunii pentru a-și menține performanțele de tăiere și aspectul estetic.

Temperatura de încălzire este crucială pentru păstrarea durității, deoarece temperaturi prea mari duc la decarburare, scăzând semnificativ proprietățile de tăiere. Valoarea economică a oțelurilor de Damasc este dată de performanțele sale de tăiere, durabilitatea și aspectul, cu o valoare mai mare în cazul obiectelor de decoratiuni și unelte de tăiere. Fabricarea oțelului de Damasc presupune un proces tehnologic complex, iar cunoștințele avansate de metalurgie și tratamente termice îl fac unul dintre cele mai scumpe materiale metalice.

1.7 Rezultate recente ale cercetărilor privind fabricarea și proprietățile oțelurilor de Damasc utilizând metode moderne

Cercetările recente privind fabricarea și proprietățile oțelurilor de Damasc, publicate de Pacchioni (2020), explorează utilizarea imprimării 3D pentru obținerea de aliaje stratificate cu proprietăți mecanice remarcabile. Imprimarea 3D prin controlul microstructurii permite realizarea unui aliaj Fe19Ni5Ti, care, datorită unui ciclu termic specific, dezvoltă o nanostructură stratificată similară oțelului de Damasc utilizat în săbiile medievale arabe și japoneze (fig. 1.14). Studiile au demonstrat că acest aliaj stratificat nu necesită tratament termic de călire, spre deosebire de un aliaj omogen cu aceleași componente chimice.

În cercetările lui Balasubramanian (2020), imprimarea 3D a acestui aliaj duce la formarea unui material cu straturi dure și moi, cu o rezistență la tracțiune de 1,3 GPa. Prin întreruperea procesului de depunere, se formează martensită, ceea ce îmbunătățește proprietățile mecanice ale materialului. De asemenea, cercetările lui Kürnsteiner (2020) folosesc tehnologia imprimării 3D pentru a obține aliaje cu o structură stratificată, variind timpul de pauză între ciclurile de turnare, ceea ce permite formarea martensitei.

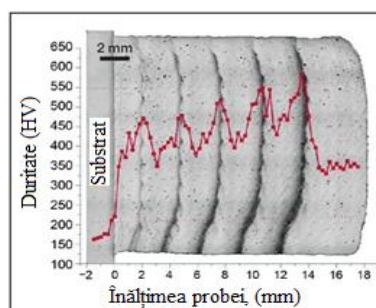


Fig. 1.14. Distribuția durității în straturile aliajului (Balasubramanian, 2020)

Studii suplimentare privind fabricarea oțelurilor de Damasc au inclus utilizarea aliajelor de cupru și oțel, cunoscute sub denumirea „mokume gane” (denumire din limba japoneză), o tehnică din secolul al III-lea folosită pentru fabricarea monedelor. Alte cercetări au explorat obținerea oțelurilor cu conținut ultra-înalt de carbon prin presarea pulberilor metalurgice de fier și grafit, îmbunătățind semnificativ proprietățile mecanice.

În concluzie, tehnicile moderne de fabricare prin forjare și imprimare 3D permit realizarea de materiale stratificate cu proprietăți mecanice excelente, avansând cercetările în domeniul metalurgiei și al tehnologiilor de sudare prin presare.

1.8. Aspecte contradictorii sau mai puțin aprofundate privind fabricarea și proprietățile oțelurilor de Damasc

Proprietățile mecanice ale oțelurilor de Damasc, cum ar fi tenacitatea și duritatea, sunt opuse. Oțelul este stratificat, iar fâșiile tenace sunt specifice oțelului cu conținut scăzut de carbon, care devine gri deschis după tratamentul de pasivare, iar fâșiile dure, din oțel cu conținut ridicat de carbon, devin gri închis sau chiar negre. Cu cât conținutul de carbon este mai mare, cu atât nuanța este mai închisă.

Un dezavantaj al prelucrării termice este pierderea carbonului la temperaturi înalte, ceea ce nu a fost suficient cercetat în cazul oțelurilor de Damasc. Încălzirea trebuie făcută în cuptoare cu atmosferă controlată pentru a preveni oxidarea, dar acest proces este costisitor pentru micii producători. Cercetările ar putea explora soluții accesibile pentru reducerea decarburării.

Oțelurile de Damasc, fiind compuse din materiale cu compoziții chimice diferite, se comportă diferit în timpul tratamentelor termice. Dilatarea și contracția bruscă pot cauza fisuri sau desprinderi ale straturilor de oțel, un subiect mai puțin studiat.

Metoda de aglomerare a particulelor, o tehnică mai puțin cercetată pentru fabricarea pieselor din oțel de Damasc, ar putea fi investigată în viitor, abordând: proprietățile mecanice ale materialului, comportamentul la diferite solicitări mecanice și tratamente termice, posibilitățile de combinare a materialelor metalice feroase și neferoase.

Un alt proces mai puțin cercetat este îmbogățirea cu carbon a oțelurilor cu conținut scăzut de carbon, utilizând materiale organice în timpul forjării și plierii. Acest proces, folosit la producerea oțelului Tamahagane, proteja oxidarea aliajelor feroase pe durata procesului de forjare.

De asemenea, se pot realiza studii experimentale privind combinarea oțelului carbon cu aliaje pe bază de cupru sau oțeluri inoxidabile, explorând sudabilitatea și influența asupra proprietăților mecanice ale acestor combinații.

1.9. Concluzii

1. Consultarea informațiilor incluse în lucrările de cercetare publicate până în prezent, atât cele la descrierea teoretică cât și cele experimentale, a permis formularea concluziilor menționate în continuare.

2. Fabricarea și performanțele oțelului de Damasc au captivat imaginația oamenilor încă din perioada cruciadelor, când europenii au intrat în contact cu armele realizate din acest material în timpul confruntărilor din Orientul Mijlociu. Calitatea excepțională a acestor arme, remarcată prin duritatea, flexibilitatea și capacitatea lor superioară de tăiere, le-a conferit o reputație legendară.

3. Această fascinație nu s-a limitat doar la războinicii acelor vremuri, ci a continuat să atragă interesul meșteșugarilor și al cercetătorilor timp de secole. Numeroase încercări au fost realizate pentru a reproduce tehnicile originale de fabricație ale oțelului de Damasc, însă multe dintre acestea au rămas un mister, fiind transmise prin metode tradiționale de prelucrare, dar pierdute odată cu trecerea timpului.

4. Astăzi, prin tehnici avansate de metalurgie și inginerie a materialelor, se încearcă nu doar reproducerea oțelului de Damasc tradițional, ci și îmbunătățirea performanțelor acestuia, pentru a fi utilizat în domenii variate, de la fabricarea cuțitelor de înaltă calitate până la aplicații industriale avansate.

5. În decursul timpului s-au dezvoltat mai multe metode de obținere a oțelurilor de Damasc ce merită semnalate ca tehnici distincte:

- metoda forjării fâșiilor din oțeluri cu diferite conținuturi de carbon, cu plieri multiple, până la obținerea unui material stratificat cu linii de ondulații foarte fine;
- metoda forjării fâșiilor din oțeluri cu diferite conținuturi de carbon, cu răsuciri multiple, pentru o combinare și sudare mai bună a fâșiilor componente;
- metoda fabricării prin forjare din oțel obținut prin topirea a mai multor tipuri de oțel, similar ca procedeu de obținere a oțelului Wootz;
- metoda aglomerării de particule, pulberilor metalice și a pieselor de dimensiuni mici din oțeluri cu conținut diferit de carbon, denumită și metoda Canister și apoi forjarea semifabricatului compactat la cald.

6. Pe lângă analiza compoziției, au fost efectuate studii aprofundate asupra caracteristicilor mecanice ale acestui material. Printre acestea se numără determinarea durității, măsurarea rezistenței la oboseală prin simularea tăierilor multiple, analiza alungirii și a rezistenței la tracțiune, precum și testarea rezistenței la șoc prin loviri repetate.

Capitolul 2. OBIECTIVE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE PROPUSE

Obiective ale cercetării teoretice

Inițierea și realizarea unor cercetări direcționate pe stabilirea unor modele teoretice specifice procedeelor și dispozitivelor de fabricare a oțelurilor de Damasc prin forjarea și presarea la cald, ce ar putea constitui îmbunătățiri a posibilităților tehnologice de fabricație.

Prin utilizarea analizei sistematice pot fi determinați factorii cei mai importanți ce pot duce îmbunătățirea proprietăților mecanice și stabilirea succesiunii optime a etapelor de fabricație a oțelurilor de Damasc. Principalii factori ce ar putea îmbunătăți performanțele mecanice ale acestor tipuri de materiale pot fi: proporțiile oțelului cu conținut scăzut de carbon în raport cu oțelul cu conținut ridicat de carbon, gradul de combinare prin plieri și răsuciri multiple, optimizarea tratamentului termic, reducerea oxidării în timpul procesului termic etc.

Obiective ale cercetării experimentale

Fabricarea de piese din oțel de Damasc din materiale stabilite anterior, ținându-se cont de proprietățile mecanice a fiecărui material component. Principalele proprietăți caracteristice materialelor folosite pentru realizarea oțelului compozit, ce vor face obiectul cercetării experimentale, sunt: duritatea, sudabilitatea prin forjare la cald a oțelurilor componente, rezistența la uzare prin abraziune după procesul de forjare și după aplicarea tratamentului termic, determinarea compoziției chimice a materialelor componente.

Studierea zonelor de interferență a două materiale componente prin microscopie metalografică privind:

- deformațiile plastice suferite în timpul forjării și răsucirii oțelului cu conținut ridicat de carbon în zona de contact cu oțelul cu conținut scăzut de carbon;
- formarea oxizilor pe suprafața de contact dintre materialele componente în timpul procesului de încălzire și forjare;
- microstructura oțelului de Damasc după procesul de forjare și după aplicarea tratamentului termic.

Fabricarea oțelului de Damasc utilizând cele trei principale metode:

- forjarea și presarea la cald a fâșiilor de oțeluri cu diferite conținuturi de carbon prin plieri multiple, utilizând două, trei sau mai multe oțeluri carbon;
- forjarea și presarea la cald cu răsucirea pachetului format din oțeluri diferite, cu utilizarea dispozitivului de răsucit ce permite determinarea forței maxime de torsiune;
- forjarea și presarea la cald a semifabricatului obținut prin metoda aglomerării de particule din oțeluri diferite, metoda „Canister”.

Capitolul 3. CONTRIBUȚII TEORETICE LA STUDIUL PROSESULUI DE FABRICARE A PIESELOR DIN OȚEL DE DAMASC

3.1. Tipuri procedee de sudare prin presiune

Îmbinarea materialelor metalice prin presare se bazează pe forțele de coeziune interatomică și nu necesită materiale de adaos. Aceasta poate fi realizată la rece sau la cald, dar necesită forțe mari de presiune și este limitată de compoziția chimică a materialelor. Procedee de sudare prin presiune fără încălzire: sudarea prin presiune la rece, sudarea prin frecare, sudarea cu ultrasunete, sudarea prin explozie. Procedee de sudare prin aplicarea căldurii și a energiei mecanice: sudarea prin forjare, sudarea cu flacără de gaze prin presiune, sudarea cu termit prin presiune, sudarea prin difuzie

Aceste metode sunt utilizate în industrii diverse, mai ales acolo unde sudarea convențională nu este practică sau se dorește evitarea modificărilor structurale ale materialelor.

3.2. Utilizarea metodei diagramei de idei la proiectarea și optimizarea unui dispozitiv de răsucit bare prismatice din oțeluri Damasc.

Etapă importantă a procesului de realizare a oțelului de Damasc, răsucirea este esențială pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice specifice acestor tipuri de materiale compozite, dar și la căpătarea unui aspect vizual caracteristic.

Prin utilizarea metodei diagramei de idei se constituie un instrument de grafică-imagistică ce pune în evidență gândirea creatoare, intuitivitatea și inventivitatea celui ce o aplică pentru identificarea soluțiilor constructive necesare în proiectarea și rezolvarea problemei abordate (Seghedin, 2011).

Metoda diagramei de idei conduce către o definiție mai clară a problemei de rezolvat. O definiție precisă poate duce la o reformulare mai exactă a problemei, focalizarea gândirii către împărțirea problemei în diviziuni mai mici conduce strict la creșterea gradului de rezolvare prin stimularea gândirii creative (Nagîț, et al., 2002)

Utilizând diagrama de idei pentru conceperea soluției constructive a unui dispozitiv de răsucit bare de oțel de Damasc încălzite la temperaturi înalte, se va face o analiză ce ține seama în principal de caracteristicile esențiale ale acestui procedeu, cât și de posibilitățile tehnice și economice de realizare a unui astfel de dispozitiv.

Tabelul 3.1. Diagrama de idei ce reprezintă posibile variante constructive ale Dispozitivului de răsucit la cald bare din oțel de Damasc

DISPOZITIV DE RĂSUCIT LA CALD BARE PRISMATICE DIN OȚEL DE DAMASC				
A Subansamblul de acționare	B Subansamblul de transmisie a mișcării de rotație	C Subansamblul de prindere material	D Subansamblul Ghidaje	?
A1 Acționare manuală	B1 Transmisie melc-roată melcată	C1 Mandrină cu bacuri	D1 Ghidaje cu secțiune cilindrică	?
A2 Acționare cu motor electric	B2 Transmisie cu curele	C2 Mandrină cu șuruburi	D2 Ghidaje cu secțiune pătrată	?
A3 Acționare cu motor hidraulic rotativ	B3 Transmisie direct prin cuplaj	C3 Alezaj cu secțiune pătrată	D3 Ghidaje cu secțiune trapezoidală	?
A4 Acționare cu rotor cu aer comprimat	B4 Transmisie cu roți dințate	C4 Bucșă elastică	D4 Ghidaje cu secțiune coadă de rândunică	?
?	B5 Transmisie cu lanț	?	?	?
	?			

După întocmirea diagramei de idei (tabelul 3.1) s-a efectuat o analiză pentru fiecare variantă constructivă a fiecărui subansamblu în parte din prisma avantajelor și dezavantajelor în exploatare, tehnologicitatea execuției și costurile de realizare.

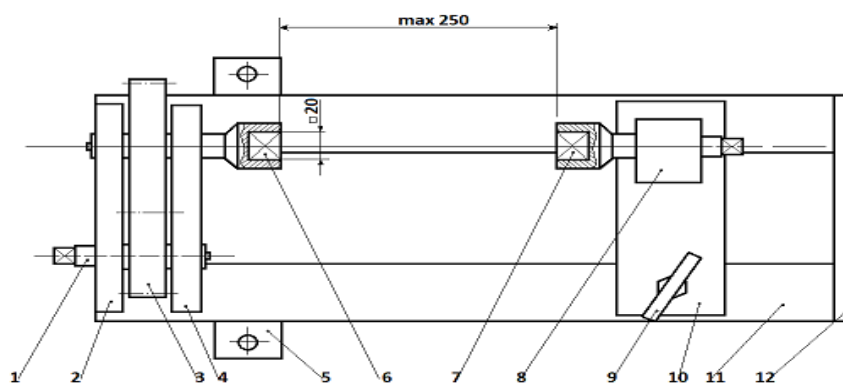


Fig. 3.1. Schița dispozitivului de răsucit

Componența dispozitivului de răsucit este următoarea:

1 - ax principal de acționare, 2, 4 - plăci susținere angrenaj, 3 – angrenaj cu roți dințate cu raportul de transmitere $\frac{1}{2}$, 5 – plăcuțe de prindere, 6 – cap de antrenare răsucire cu alezaj pătrat, 7 – cap contra-antrenare cu alezaj pătrat, 8 – suport cap contra-antrenare, 9 - șurub T pentru blocare sanie, 10 – sanie mobilă, 11 – ghidaje cu secțiune pătrată, 12 – placă de capăt pentru închiderea cadrului.

Prin utilizarea metodei diagramei de idei și având în vedere opțiunile disponibile, a fost selectată soluția constructivă adecvată pentru producția de unicat sau serie mică. Schița finală a dispozitivului a fost realizată, iar această soluție garantează o execuție eficientă și practică, cu o structură simplă, dar robustă din punct de vedere tehnic (fig.). destinat producției de unicat sau serie mică. Aceasta include subansamblele A1 - acționare manuală, B4 - transmisie cu roți dințate, C3 - alezaj cu secțiune pătrată și D2 - ghidaje cu secțiune pătrată, având o configurație simplă, ușor de implementat practic.

3.3. Utilizarea metodei proiectării axiomatiche pentru stabilirea optimă a traseului tehnologic de fabricare a pieselor din oțel de Damasc

Metoda proiectării axiomatiche este o metodă de proiectare ce folosește principiile matematice de tip matricial pentru a transpune cerințele clientului în cerințe funcționale, în indicatori de proiectare și în variabile de proces (Slătineanu et. al, 2013). Proiectarea axiomatică este o teorie care a apărut cu scopul de a oferi o abordare mai sistematică a procesului de proiectare, fiind inițial aplicată tehnologiilor de fabricație și, ulterior, definirii diferitelor categorii de echipamente mecanice (Suh, 1990; Suh, 2001; Suh et al., 2021).

Procesul de forjare la temperaturi ridicate este unul deosebit de complex, implicând o succesiune de operații tehnologice precise, fiecare având un rol esențial în obținerea unui produs de calitate superioară. Din acest motiv, este necesară o analiză detaliată și riguroasă pentru stabilirea unui traseu tehnologic optim.

Problema abordată se va considera ca necesitatea clientului și are următoarea formulare:

CN: Asigurați producerea în condiții tehnologice optime a unor piese din oțel de Damasc care ulterior va face obiectul unor cercetări privind proprietățile mecanice, studii metalografice și compoziția chimică.

În concordanță cu necesitatea clientului se formulează cerința funcțională de ordin zero:

FR0: realizați o succesiune de operații tehnologice specifice fabricării unor piese din oțel de Damasc.

Pentru a determina cerințele funcționale de ordin întâi este necesar descompunerea în operații a procesului tehnologic de fabricare a unor piese din oțel de Damasc. Descompunerea în operații tehnologice duce la formularea următoarelor cerințe funcționale de ordin întâi:

FR1: Debitați fâșii de tablă sub formă dreptunghiulară la dimensiuni prestabilite din oțeluri cu diferite conținuturi de carbon;

FR2: Îndepărtați oxizii de pe suprafețele fâșiilor;

FR3: Împachetați fâșiile prin sudare;

FR4: Încălziți pachetul de fâșii;

FR5: Forjați pachetul de fâșii pentru sudarea lor;

FR6: Răsuciți pachetul de fâșii;

FR7: Șlefuiți laturile pachetului;

FR8: Pasivați suprafețele laterale ale pachetului.

Pentru fiecare din cerințele funcționale de ordinul întâi Fri, este necesar determinarea unuia sau a mai multor echipamente care cu ajutorul cărora să permită realizarea respectivei cerințe funcționale, ceea ce va duce la definirea parametrilor de proiectare Dpi.

Pentru cele 8 cerințe funcționale s-au stabilit variantele de echipamente conform tabelului 3.2.

Datorită depistării unui anumit inconvenient în realizarea unei condiții, se poate propune conceperea unui dispozitiv care să ducă la simplificarea operației, la creșterea siguranței în exploatare și la mărirea productivității. De exemplu, pentru realizarea operației de răsucire este necesară proiectarea și executarea unui dispozitiv.

Tabelul 3.2. Cerințe funcționale și parametri de concepție pentru fabricarea unor piese din oțel de Damasc

Domeniul clientului/Cerința clientului CN	Domeniul funcțional/Cerințe funcționale FRi	Domeniul fizic/ Parametri de proiectare DP		
		Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Asigurați producerea în condiții tehnologice optime a unor piese din oțel de Damasc	FR1: Debitați fâșii de tablă din oțeluri diferite	DP1.1 Polizor portabil cu disc de debitat	DP1.2 Ferăstrău cu disc circular cu dinți;	DP3.1 Ferăstrău cu bandă continuă;
	FR2: Îndepărtați oxizii de pe suprafețele fâșiilor	DP2.1 Polizor unghiular cu disc pentru șlefuit	DP2.2 Polizor cu bandă abrazivă continuă	DP3.2 Polizor de banc cu disc abraziv
	FR3: Împachetați fâșiile prin sudare	DP3.1 Invertor de sudare cu arc electric	DP3.2 Transformator de sudare cu arc electric	DP3.3 Aparat de sudare cu fir
	FR4: Încălziți pachetul de fâșii	DP4.1 Cuptor electric	DP4.2 Forjă cu cărbune	DP4.3 Cuptor cu gaz pentru forjă
	FR5: Forjați pachetul de fâșii pentru sudarea lor	DP5.1 Ciocan și nicovală	DP5.2 Presă hidraulică	DP5.3 Ciocan pneumatic de forjă
	FR6: Răsuciți pachetul de fâșii	DP6.1 Cheie de fierărie și menghină	DP6.2 Dispozitiv de răsucit	DP6.3 Mașină de răsucit
	FR7: Șlefuiți laturile pachetului	DP7.1 Polizor de banc cu disc abraziv	DP7.2 Polizor portabil cu disc de șlefuit	DP7.3 Polizor cu bandă continuă
	FR8: Pasivați suprafețele laterale ale pachetului	DP8.1 Clorură ferică	DP8.2 Cuvă cu soluție acidă pentru pasivare	DP8.3 Soluție de acid acetic

La alegerea unui echipament care să îndeplinească cerința funcțională, s-au luat în considerare posibilitățile de achiziționare, de fabricație sau de dotare a atelierului cu un astfel de echipament, cum ar fi, de exemplu, pentru cerința FR4: „Încălziți pachetul de fâșii”, s-a ales DP4 – cuptorul de forjă cu gaz existent în atelierul personal.

Se poate constata din tabelul 3.2, că pentru fiecare cerință funcțională Fri se alege un singur parametru de proiectare Dpi. Nu găsim situații în care, același parametru de proiectare să se utilizeze la îndeplinirea mai multor cerințe funcționale și nici o cerință funcțională a cărei realizare să permită utilizarea a două sau mai multe dintre echipamentele

evidențiate pentru procesul de fabricație. Rezultă că se îndeplinește cerința specifică axiomei întâi, cea ce face referire la independența cerințelor funcționale.

Tabelul 3.3. Matricea de proiectare ce conține cerințele funcționale de ordinul întâi FRi și parametrii de proiectare DPi aferenți

Linia nr. 1	Parametrii de proiectare		Parametrii de proiectare DP0 de ordin zero							
			Proces tehnologic pentru fabricarea unei epruvete din oțel de Damasc							
			DP Parametrii de proiectare corespunzători primului nivel							
			DP1: Polizor portabil cu disc de debitat	DP2: Polizor cu bandă continuă	DP3: Invertor de sudare cu arc electric	DP4: Cuptor de forjă cu gaz	DP5: Presă hidraulică	DP6: Dispozitiv de răsucit	DP7: Polizor de banc cu disc abraziv	DP8: Cuvă cu soluție acidă pentru pasivar e
4	Cerințe funcționale									
5 Coloana nr. 1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12
6	Cerințele funcționale de ordin 0	Cerințele funcționale FR de ordinul 0	Evidențierea parametrilor de proiectare Dpi corespunzători fiecărei cerințe funcționale FRi							
7	FR0: Proiectați o tehnologie de obținere a unei epruvete din oțel de Damasc	FR1: Debitați fâșii de tablă din oțeluri diferite	X							
8		FR2: Înlăturați oxizii de pe suprafețele fâșiilor		X						
9		FR3: Împachetați fâșiile prin sudare			X					
10		FR4: Încălziți pachetul de fâșii				X				
11		FR5: Forjați pachetul de fâșii pentru sudarea lor					X			
12		FR6: Răsuciți pachetul de fâșii						X		
13		FR7: Șlefuiți laturile pachetului							X	
		FR8: Pasivați suprafețele laterale ale pachetului								X

Conform celor specificate anterior, se observă că în tabelul 3.3 au fost amplasate simboluri „X” numai în lungul diagonalei coborătoare. Toate acestea conduc la ipoteza că în această fază de proiectare, ne confruntăm cu o *proiectare decuplată*, ceea ce reprezintă că proiectarea procesului de fabricație a unei piese din oțel de Damasc este optimă sau apropiată de cea optimă.

3.4. Utilizarea tehnica deciziei impuse pentru determinarea metodei de fabricare a unor piese din oțel de Damasc.

Tehnica deciziei impuse conține aspecte asemănătoare metodei analizei valorii și este utilizată la alegerea celor mai convenabile variante tehnologice, soluții constructive sau a unei metode de fabricație din mai multe posibile (Belous, 1986; Plahteanu, 1999).

Selectarea variantei optime pentru rezolvarea unei probleme date prin această tehnică, constă în folosirea unor tabele de comparare, ce presupune aprecierea perechilor de criterii de evaluare, analizate două câte două din punct de vedere al avantajelor și dezavantajelor fiecăruia (Slătineanu, 2019).

După definirea clară a problemei de rezolvat prin tehnica deciziei impuse, prima etapă presupune stabilirea tuturor criteriilor de evaluare ce vor fi luate în considerație, ca fiind cei mai importanți. Evaluarea se face prin compararea criteriilor identificate două câte două și acordând note de tip 1 - 0, după cum urmează: notare 1 - 0 atunci când primul criteriu este apreciat ca fiind mai important față de cel de-al doilea, notare 0 - 1, când al doilea criteriu este considerat mai important, notare 0,5 - 0,5 când cele două criterii comparate au importanță egală.

De-a lungul timpului sau consacrat două procedee de fabricare a oțelurilor de Damasc ca fiind cele mai utilizate, cu rezultatele cele mai apropiate de oțelul autentic din antichitate, acestea sunt:

- procedeul forjării fâșiilor de table din oțeluri cu conținuturi diferite de carbon;
- procedeul forjării aglomerărilor de particule de oțeluri cu diferite conținuturi de carbon.

Criteriile de evaluare a tehnologiilor folosite pentru fabricarea pieselor din oțel de Damasc pot fi luate în considerare: criteriul A – costul de fabricație, criteriul B – probabilitatea de obținere a durității dorite, criteriul C – probabilitatea de obținere a tenacității cât mai bune pentru componenta tenace a oțelului, criteriul D – echipamentele disponibile sau accesibile la fabricarea pieselor din oțel de Damasc, criteriul E - echipamentele disponibile sau accesibile pentru determinarea proprietăților mecanice și tehnologice ale pieselor din oțel de Damasc, criteriul F – capacitatea de a modifica valorile factorilor de intrare în procesul de fabricare a pieselor din oțel de Damasc, în vederea dezvoltării unor cercetări experimentale privind ponderile de influență a factori de intrare asupra proprietăților specifice ale acestor oțeluri.

Ponderarea criteriilor de evaluare a unei tehnologii de realizare a unor piese din oțel de Damasc se va realiza prin compararea, conform tabelului 3.4.

Tabelul 3.4 Ponderea criteriilor de evaluare a unor tehnologii de fabricare a pieselor din oțel de Damasc

Criteriul j	Numărul comparației Nc															Suma Ndj	Coef. Import. Kj
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
A	0	0	0,5	0,5	0											1	0,066
B	1					0,5	0	0,5	0							2	0,133
C		1				0,5				0	0,5	0				2	0,133
D			0,5				1			1			1	0		3,5	0,233
E				0,5				0,5			0,5		0		0	1,5	0,1
F					1				1			1		1	1	5	0,333

În tabelul 3.5 au fost incluse rezultatele comparațiilor dintre cele două variante tehnologice.

Tabelul 3.5. Determinarea valorilor coeficienților de importanță pentru fiecare variantă tehnologică i, prin luarea în considerație a fiecărui criteriu j

Varianta tehnologică	Criteriul A			Criteriul B		
	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji
a	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
b	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Varianta tehnologică	Criteriul C			Criteriul D		
	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji
a	0,5	0,5	0,5	1	1	1
b	0,5	0,5	0,5	0	0	0
Varianta tehnologică	Criteriul E			Criteriul F		
	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji
a	0,5	0,5	0,5	1	1	1
b	0,5	0,5	0,5	0	0	0

Pentru fiecare variantă tehnologică s-au calculat coeficienții de importanță, cu rezultatul următor: $N_{va} = 0,5 \cdot 0,066 + 0,5 \cdot 0,133 + 0,5 \cdot 0,133 + 1 \cdot 0,233 + 0,5 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,333 = 0,781$ (1.1)

$$N_{vb}=0,5*0,066+0,5*0,133+0,5*0,133+1*0,233+0,5*0,1+0*0,333=0,215 \quad (1.2)$$

În urma procesului de selectare a variantei tehnologice optime pentru fabricarea unor piese din oțel de Damasc utilizând tehnica deciziei impuse, se constată că varianta tehnologică de forjare la temperaturi înalte a unui pachet de fâșii de tablă din oțeluri cu diferite concentrații de carbon este cea mai convenabilă rezultată din analiza coeficienților de importanță determinați pentru fiecare variantă tehnologică $N_{va}=0,781$ și $N_{vb}=0,215$.

3.5. Utilizarea metodei diagramei Ishikawa pentru determinarea posibilității apariției oxizilor între fâșiile pachetului în timpul procesului de forjare a oțelurilor de Damasc.

Metoda diagramei Ishikawa, poartă numele celui ce a propus-o pentru prima dată, Kaoru Ishikawa în anul 1943, profesor la Universitatea din Tokyo și este utilizată în determinarea posibilelor cauze ale apariției unui efect dat (Slătineanu, 2019).

Denumită și *diagrama cauză-efect* sau *diagrama os de pește* este folosită în general în domeniul asigurării calității, în determinarea cauzei apariției unui posibil defect și în proiectarea unui produs sau a unui proces de fabricație (Stefanivic, et al., 2014).

Complexitatea procesului de fabricare a pieselor din oțel de Damasc, impune o analiză amănunțită în ceea ce privește cauzele posibile apariției oxizilor între suprafețele de contact ale fâșiilor componente pachetului de table din oțeluri cu conținut diferit de carbon. Formarea oxizilor în masa materialului oțelului este un defect cu efecte grave asupra proprietăților mecanice și a aspectului caracteristic, diminuând mult valoarea economică a acestui tip de material compozit stratificat.

Pentru fiecare din cauzele principale se evidențiază pe diagramă cauzele de nivel întâi (fig. 3.14), reprezentate deasupra unor linii orizontale ce se termină cu săgeți pe fiecare linie oblică. Din analiza fiecărei cauze de ordin întâi pot deriva cauze de nivel doi. Astfel se face o imagine cât mai clară a întreg procesul de fabricare a unor piese din oțel de Damasc, prin metoda forjării pachetului de fâșii de table, alcătuit din oțeluri cu diferite conținuturi de carbon, din punct de vedere al posibilității formării oxizilor între fâșiile pachetului.

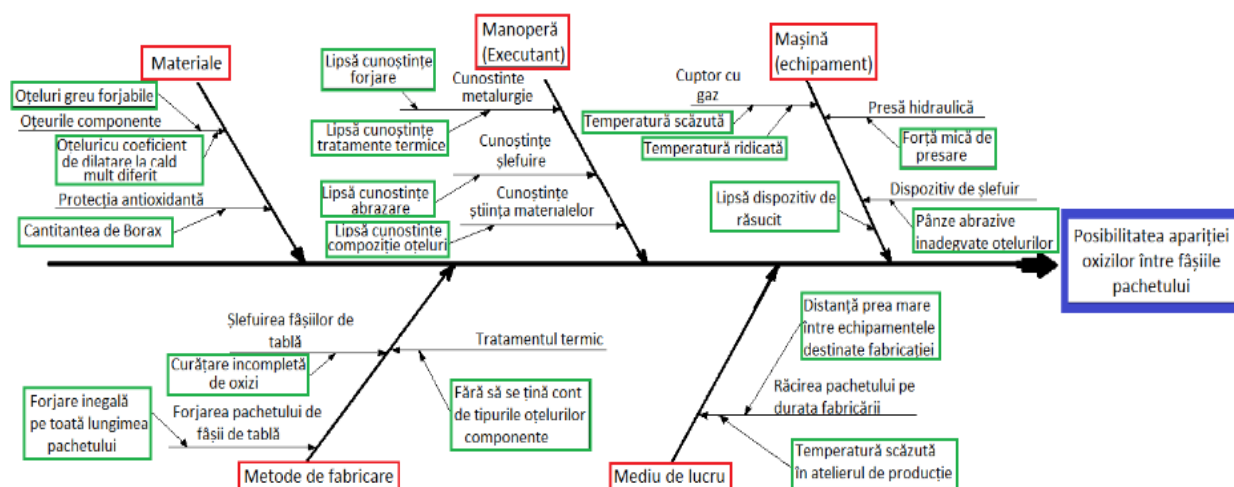


Fig. 3.14. Diagrama cauză-efect pentru posibilitatea apariției oxizilor între fâșiile pachetului pe întreg procesul de fabricare prin forjare a oțelului de Damasc.

Dacă aceste cauze sunt cunoscute încă din faza de documentare și din faza studiilor teoretice, se asigură posibilitatea realizării prin forjare a unor piese de oțel de Damasc cu grad ridicat de puritate, deci fără oxizi, ceea ce asigură calitatea produsului fabricat.

3.6. Determinarea tipului de echipament necesar procesului de uzare prin abrazare a unor probe sub formă de bare prismatice fabricate din oțel de Damasc, utilizând metoda Deciziei Impuse

Metoda deciziei impuse, asemănătoare cu metoda analizei valorii, este utilizată la găsirea celor mai la îndemână variante constructive sau a unei metode de fabricație din mai multe potențiale cunoscute (Belous, 1986; Plahteanu, 1999).

În prima fază, se definește clar problema de rezolvat și soluțiile tehnice posibile de rezolvare, iar pentru selectarea variantei optime se utilizează tabele de comparare, care constau în aprecierea a două câte două posibile soluții, prin stabilirea unor criterii de evaluare ce vor fi comparate din punct de vedere al avantajelor și dezavantajelor lor în procesul de soluționare a problemei date.

După procesul de forjare, piesele obținute suferă un proces de șlefuire prin abrazare pe toate suprafețele barei prismatice, din acest considerent este necesar să se stabilească și tipul de echipament potrivit testării uzării prin abrazare în

cadrul acestei cercetări. Analiza se va face pentru toate tipurile de echipamente de șlefuire cu pânză abrazivă cu diverse granulații, de care dispune atelierul autorului acestei cercetări,

În urma evidențierii avantajelor și dezavantajelor fiecărui tip de echipament, s-a constatat că variantele c și e — polizorul fix cu disc lipit din pânză abrazivă și polizorul cu bandă abrazivă continuă — sunt selectate pentru o analiză mai amănunțită, ținând cont de două avantaje esențiale: posibilitatea și accesibilitatea montării unui sistem de răcire cu lichid, benefic în timpul procesului de șlefuire pentru limitarea influenței termice asupra proprietăților mecanice ale pieselor de șlefuit, și durabilitatea pânzei abrazive pe parcursul procesului de testare.

Criteriile de evaluare pentru determinarea variantei optime a tipului de echipament folosit pentru testarea la uzare prin abrazare a probelor pot fi luate în calcul următoarele: criteriul A – costul echipamentului, criteriul B – posibilitatea de obținere a unei suprafețe plane dorite, criteriul C – echipamentul permite montarea unui sistem de răcire cu lichid, benefic în timpul procesului de șlefuire pentru limitarea influenței termice asupra proprietăților mecanice a pieselor de șlefuit, criteriul D – posibilitatea de realizare a rugozității dorite pe suprafețele de interes, criteriul E – durabilitatea pânzei abrazive în timpul procesului de șlefuire, criteriul F – abilitatea de modificare a valorilor unor factori de intrare în procesul de șlefuire cu privire la extinderea unor cercetări experimentale cu privire la ponderea influențelor unor factori de intrare a proprietăților ce caracterizează oțelurile de Damasc.

Ponderea criteriilor de evaluare (tabelul 3.5) a unui tip de echipament utilizat la testarea la uzare prin abrazare a probelor din oțel de Damasc se va determina prin compararea a două câte două criterii evidențiate anterior.

Tabelul 3.5. Ponderea criteriilor de evaluare a unui tip de echipament utilizat la testarea la uzare prin abrazare a probelor din oțel de Damasc

Criteriul	Numărul comparației Nc															Suma Ndj	Coef. Import. Kj
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
A	0,5	0	0,5	0	0											1	0,066
B	0,5					0	0,5	0	0							1	0,066
C		1				1				1	0	0				3	0,2
D			0,5				0,5			0			1	1		3	0,2
E				1				1			1		0		1	4	0,266
F					1				1			1		0	0	3	0,2

În tabelul 3.5 sunt evidențiate comparațiile criteriilor ce determină ponderea criteriilor de evaluare a unui tip de echipament ce se va utiliza la testarea la uzare prin abrazare a probelor din oțel de Damasc obținute prin forjare și răscuire la cald. Suma notelor Ndj acordate fiecărui criteriu luat în vedere la evaluare (A, B, C, D, E și F) sunt înscrise în penultima coloană, iar coeficienții de importanță înscrși în ultima coloană ce au fost calculați ca raportul dintre suma notelor și numărul de comparații.

Tabelul 3.6. Determinarea valorilor coeficienților de importanță pentru fiecare variantă de echipament i, prin luarea în considerație a fiecărui criteriu j

Varianta de echipament	Criteriul A			Criteriul B		
	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji
c	1	1	1	0,5	0,5	0,5
e	0	0	0	0,5	0,5	0,5
Varianta de echipament	Criteriul C			Criteriul D		
	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji
c	0,5	0,5	0,5	0	0	0
e	0,5	0,5	0,5	1	1	1
Varianta de echipament	Criteriul E			Criteriul F		
	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji	Comparare	Suma Ndj	Coeficient de importanță Kji
c	0	0	0	0	0	0
e	1	1	1	1	1	1

Fiecărei variante de echipament, conform tabelului 3.6, s-au calculat coeficienții de importanță, cu rezultatul în relațiile următoare:

$$N_{vc} = 1 * 0,066 + 0,5 * 0,066 + 0,5 * 0,2 + 0 * 0,2 + 0 * 0,266 + 0 * 0,2 = 0,199 \quad (1.3)$$

$$Nve = 0*0,066+0,5*0,066+0,5*0,2+1*0,2+1*0,266+1*0,2 = 0,799 \quad (1.4)$$

În urma procesului de analiză a tuturor avantajelor și dezavantajelor identificate pentru fiecare echipament în parte utilizat la testarea uzurii prin abrazare a unor probe din oțel de Damasc. Probele vor fi produse prin forjarea la cald a două oțeluri cu diferite conținuturi de carbon, sub formă inițială de fâșii dispuse alternativ într-un pachet prismatic.

3.7. Utilizarea Metodei Corelației de Rang pentru ordonarea influenței factorilor asupra rezultatelor unor teste de uzură

Pe parcursul utilizării, orice unealtă este supusă unui proces de uzură, ceea ce duce treptat la pierderea capacității sale de funcționare optimă. În cazul sculelor de tăiere, uzura se poate manifesta prin apariția unei fațete pe suprafața flancului, ca urmare a contactului direct cu suprafața piesei prelucrate, formarea unui canal pe suprafața sculei din cauza acțiunii abrazive a procesului sau prin deformarea plastică a vârfului acesteia.

Majoritatea metodelor de evaluare a uzurii se bazează pe măsurători cantitative ale materialului îndepărtat din piesa testată, fie prin determinarea modificărilor dimensionale, fie prin analiza pierderii de masă.

Factorii principali care influențează nivelul de uzură înregistrat de scule pot fi grupați astfel: compoziția chimică, structura și anumite proprietăți fizico-mecanice ale materialului din care este fabricată scula, compoziția chimică, structura și proprietățile fizico-mecanice ale materialului piesei de prelucrat asupra căreia acționează unealta, metoda utilizată pentru testarea uzurii, condițiile specifice în care se desfășoară testul de uzură, incluzând forța aplicată asupra sculei, tipul și viteza mișcării relative dintre unealtă și materialul prelucrat, precum și rugozitatea suprafeței sculei care intră în contact cu materialul testat.

Una dintre aceste metode este metoda de corelare a rangului (Litchfield, 1955; Sternstein, 1962; Nichici, 1996), care a fost utilizată în diferite variante pentru rezolvarea unei game largi de probleme. O prezentare detaliată a acestei metode și a modului său de aplicare poate fi găsită în (Nichici, 1996).

În condițiile menționate anterior, pe baza unei analize preliminare, s-a evaluat că principalii factori care pot influența uzura masei sau dimensiunilor probei de testare.

În a doua etapă a aplicării metodei de corelare a rangului, au fost consultați experți pentru a stabili posibila ierarhizare a factorilor de influență, având în vedere intensitatea efectului fiecărui factor asupra parametrului de ieșire, respectiv uzura de masă sau dimensională a probei de testare realizate dintr-un anumit material.

În a treia etapă, a fost completat Tabelul 3.7, considerat tabelul principal. În prima coloană a tabelului au fost înscrise numerele de serie ale experților consultați, iar în prima linie au fost introduși factorii presupuși a influența valoarea masei sau uzura dimensională a probei. În celelalte celule ale tabelului, au fost completate numerele ordinale atribuite de experți fiecărui factor de influență. Ultima linie a tabelului conține suma numerelor ordinale acordate de experți pentru fiecare factor luat în considerare, ceea ce marchează trecerea la a patra etapă a metodei.

O primă analiză a datelor din tabelul primar relevă faptul că doi experți (experții 2 și 8) au acordat același rang pentru anumiți factori de influență. Acest lucru impune efectuarea unor calcule pentru corectarea rangurilor. Astfel, un rang corectat va fi determinat prin raportul dintre suma numerelor ordinale ale factorilor cu același rang și numărul acestora.

Tabelul 3.7. Informații inițiale despre clasarea criteriilor factorilor capabili să influențeze rezultatele testelor de uzură

Expert nr. (j)	Influența factorilor x_k							
	x_1 (compoziția chimică a materia-lului probei)	x_2 (structura și duritatea materia-lului probei de testat)	x_3 (rezistența la uzură a materia-lului contra-piesei)	x_4 (durata testării)	x_5 (forța de presare a probei pe contra-piesă)	x_6 (tipul mișcării relative dintre proba de testat și contra-piesă)	x_7 (viteza relativă de mișcare dintre proba de testat și contra-piesă)	x_8 (rugozitatea suprafeței probei de testat)
1	1	2	5	4	7	6	8	3
2	1	1	6	2	3	4	4	5
3	1	2	5	3	4	7	6	8
4	3	1	2	7	5	4	8	6
5	1	3	6	2	7	5	4	8
6	1	3	4	2	5	7	6	8
7	1	2	5	3	4	6	7	8
8	2	1	4	2	2	3	3	5
9	3	2	7	1	4	5	6	8
10	2	1	7	3	5	4	6	8
A_j	16	18	51	29	46	51	58	67
$Q_i(1)$	1	2	5	3	4	5	6	7

Noua situație va fi redată în tabelului secundar (Tabelul 3.8), cu date corectate.

Având în vedere informațiile disponibile, urmează:

$$r_s = 1 - [6 / (8^3 - 8)] \cdot [(1-1)^2 + (2-2)^2 + (5-5)^2 + (3-3)^2 + (4-4)^2 + (5-6)^2 + (6-7)^2 + (7-8)^2] = 0,893 \quad (1.16)$$

Observând că coeficientul de corelație r_s este aproape de valoarea unitară, se poate concluziona că există o corelație adecvată între informațiile din tabelele 3.7 și 3.8.

Tabelul 3.8. Valorile corectate ale informațiilor privind clasarea factorilor de către criteriile capabile să influențeze rezultatele testelor de uzură

Crt. nr. (j)	Influența factorilor, x_k							
	x_1 (compoziția chimică a materia-lului probei)	x_2 (structura și duritatea materia- lului probei de testat)	x_3 (rezistența la uzare a materia-lului contrapiesei)	x_4 (durata testării)	x_5 (forța de presare a probei pe contra- piesă)	x_6 (tipul mișcării relative dintre proba de testat și contrapiesă)	x_7 (viteza relativă de mișcare dintre proba de testat și contrapiesă)	x_8 (rugozitatea suprafeței probei de testat)
1	1	2	5	4	7	6	8	3
2	1.5	1.5	6	2	3	6.5	6.5	5
3	1	2	5	3	4	7	6	8
4	3	1	2	7	5	4	8	6
5	1	3	6	2	7	5	4	8
6	1	3	4	2	5	7	6	8
7	1	2	5	3	4	6	7	8
8	2.6	1	4	2.6	2.6	5.5	5.5	5
9	3	2	7	1	4	5	6	8
10	2	1	7	3	5	4	6	8
A_i	17.1	18.5	51	29.6	46.6	55	62	67
$Q_i(1)$	1	2	5	3	4	6	7	8

Conform rezultatelor obținute prin aplicarea metodei de corelare a rangului, ordinea de importanță a factorilor care influențează intensitatea procesului de uzură este următoarea: compoziția chimică a materialului probei, structura și duritatea materialului probei, durata testului, forța de presiune a probei de testat pe contrapiesă, rezistența la uzură a materialului probei, tipul de mișcare relativă între proba de testat și contrapiesă, viteza mișcărilor relative între proba de testat și contrapiesă, rugozitatea suprafeței probei de testat.

Ordonarea factorilor de intrare a fost esențială pentru a asigura o selecție justificată și rațională a celor care au fost modificați pe parcursul cercetărilor experimentale. În anumite situații, înainte de efectuarea testelor experimentale, este crucial să se identifice factorii care ar putea influența una sau mai multe variabile de interes. În astfel de cazuri, în special atunci când numărul factorilor este mare, este necesară ordonarea acestora pe baza unor criterii specifice de selecție. Această problemă poate fi abordată prin utilizarea unei metode care permite alegerea celei mai potrivite alternative atunci când sunt disponibile mai multe opțiuni. Una dintre metodele aplicabile este metoda corelației de rang. În această lucrare, s-a folosit metoda corelației rangurilor pentru a ordona factorii care influențează intensitatea unui proces de uzură într-un test specific. Metoda se bazează pe analiza statistică a răspunsurilor obținute prin consultarea experților cu cunoștințe științifice și profesionale în domeniul problemei investigate.

3.8. Concluzii privind contribuțiile teoretice la studiul procesului de fabricație a oțelurilor de Damasc

2. Aplicarea metodei diagramei de idei în proiectarea și optimizarea unui dispozitiv de răsucire pentru bare prismatice din oțel de Damasc a fost realizată printr-o analiză detaliată a mai multor soluții constructive. În acest proces, s-au luat în considerare nu doar posibilitățile tehnico-materiale disponibile autorului acestei cercetări, ci și cerințele optime pentru realizarea eficientă a operației de răsucire, ținând cont de specificul producției de serie mică și unicate. Operația de răsucire joacă un rol esențial în procesul de fabricație al oțelului Damasc, fiind un pas crucial în obținerea unei sudări de calitate superioară între fâșii și conferirea unei suprafețe estetic plăcute.

4. Optimizarea traseului tehnologic pentru obținerea oțelurilor de Damasc a fost realizată utilizând principiile Proiectării Axiomatice, un proces care a permis identificarea etapelor fundamentale de fabricație și definirea cerințelor funcționale specifice fiecărei etape. În acest context, parametrii de proiectare au fost determinați pe baza echipamentelor necesare pentru a asigura o realizare optimă a operațiunilor tehnologice implicate. Pentru fiecare cerință funcțională identificată, au fost propuse trei variante de echipamente, fiecare analizată din perspectiva eficienței tehnice

și economice. După evaluarea detaliată a fiecărei opțiuni, s-a selectat varianta optimă, care îndeplinea cel mai bine cerințele de performanță și costuri.

6. De-a lungul istoriei, au fost dezvoltate două metode principale de obținere a oțelurilor de Damasc: una bazată pe forjarea fâșiilor de oțel cu conținuturi diferite de carbon și cealaltă pe aglomerarea particulelor provenind din oțeluri diferite. Fiecare dintre aceste tehnici impune provocări specifice și necesită evaluarea atentă a avantajelor și dezavantajelor lor. Astfel, a fost necesar să se aplice metoda deciziei impuse pentru a alege metoda de fabricație cea mai potrivită.

7. Formarea oxizilor între fâșiile de oțel în timpul procesului de forjare reprezintă un defect semnificativ care compromise atât proprietățile mecanice, cât și aspectul vizual al oțelurilor stratificate. În vederea identificării și eliminării acestui defect, s-a aplicat metoda diagramei cauză-efect, cunoscută și sub denumirea de diagramă Ishikawa. În prima fază a analizei, au fost definite cauzele principale care pot conduce la apariția formării oxizilor între fâșiile de oțel, iar ulterior s-au identificat cauzele de ordinul întâi și al doilea printr-o examinare detaliată a fiecărei surse potențiale ale problemei.

8. În urma analizei efectuate utilizând metoda deciziei impuse, s-a stabilit că varianta optimă de echipament pentru testarea la uzare prin abrazare a oțelului Damasc, produs prin forjare în atelierul autorului, este polizorul cu bandă abrazivă continuă. Alegerea acestui echipament a fost fundamentată pe calculul coeficienților de importanță asociați celor două echipamente disponibile, respectiv polizorul cu disc, care a obținut un coeficient de importanță $N_{vc} = 0,199$, și polizorul cu bandă continuă, care a înregistrat un coeficient semnificativ mai mare, $N_{ve} = 0,799$. Analiza comparativă a acestor valori a evidențiat faptul că polizorul cu bandă abrazivă continuă prezintă avantaje superioare în ceea ce privește eficiența și uniformitatea prelucrării suprafețelor metalice, asigurând o testare mai precisă a rezistenței la uzură prin abrazare a oțelului Damasc.

9. După parcurgerea etapelor aplicării metodei de corelare a rangului, s-a ajuns la concluzia că cei mai importanți factori ce pot influența rezultatele testelor de uzură sunt compoziția chimică a materialului probei de testat, structura și duritatea materialului probelor, precum și durata testului.

Capitolul 4. MATERIALE ȘI ECHIPAMENTE NECESARE STUDIULUI FABRICĂRII UNOR PIESE DIN OȚEL DE DAMASC PRIN FORJARE LA TEMPERATURI RIDICATE.

Fabricarea oțelurilor de Damasc reprezintă un subiect de interes și de actualitate la nivel internațional, datorită complexității proceselor tehnologice implicate în forjarea la cald, precum și a proprietăților mecanice și tehnologice remarcabile ale acestor materiale compozite. Studiile de cercetare documentară și teoretică prezentate în capitolele anterioare au evidențiat atât importanța acestor aliaje în diverse domenii, cât și provocările asociate reproducerii și optimizării tehnicilor tradiționale.

4.1. Material antioxidant, soluții pasivante, soluție neutralizantă și materiale metalice necesare realizării unor epruvete

Material antioxidant

Materialul antioxidant folosit în acest caz, este „boratul de sodiu” sau „diboratul de natriu decahidrat”, cu denumirea cunoscută de *Borax*, mineral natural din clasa boraților sub formă de pulbere de culoare albă, inodor, cu formula chimică $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (Syaiful, 2020).

Soluții pasivante

Pasivarea metalelor este un fenomen de formare a unui strat protector, o peliculă pasivantă, împotriva coroziunii pe suprafața oțelului.

Soluția acidă cea mai utilizată la pasivarea pieselor din oțel de Damasc este soluția de *clorură ferică* lichidă, de concentrație de 40% cu formula chimică FeCl_3 , utilizată și în electronică la realizarea cablajelor. La pasivarea oțelului de Damasc mai sunt utilizate și alte soluții pasivante, cum ar fi cele cu concentrații scăzute de acid sulfuric H_2SO_4 , acid clorhidric HCl , acid azotic HNO_3 , acid acetic $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ și altele.

Soluție de neutralizare

Datorită acțiunii soluției acide de pasivare, care este și puternic corozivă asupra suprafețelor semifabricatului din oțel, este necesară neutralizarea acțiunii acidului. După pasivare, semifabricatul trebuie spălat bine cu apă, șters temeinic și imersat într-o soluție apoasă de *bicarbonat de sodiu*, ce are formula chimică NaHCO_3 și face parte din clasa sărurilor.

Materiale metalice necesare realizării unor epruvete

În cadrul acestei cercetări, autorul își propune fabricarea unor probe sub formă de bare prismatice, cu secțiune pătrată și dimensiuni diferite, obținute prin cele două metode cunoscute, cum ar fi metoda forjării pachetului de fâșii de tablă și metoda aglomerării de particule din oțeluri cu diferite conținuturi de carbon. Materialele necesare

Oțelurile carbon din componență pot fi diverse, dar pentru efectuarea experimentelor sau folosit următoarele tipuri, cu compoziție chimică detaliată în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Mărci de oțeluri și compoziția chimică

Nr. crt.	Denumire oțel	Marca	Compoziția chimică %
1	Oțel carbon obișnuit	OL50	0,3%C, 0,47-0,85%Mn, 0,05%P, 0,05%S
2	Oțel carbon de calitate pentru arcuri foi	OLC65A	0,47-0,55%C, 0,6-0,9%Mn, 1,5-2%Si, 0,07-0,12%V
3	Oțel pentru scule	OSC8	0,75-0,89%C, 0,35-0,8%Mn, 0,15-0,35%Si, 0,03%P, 0,025%S, 0,2%Cr, 0,25%Ni, 0,25%Ca
4	Oțel pentru scule	OSC10	0,95-1,04%C, 0,35-0,8%Mn, 0,15-0,35%Si, 0,03%P, 0,025%S, 0,2%Cr, 0,25%Ni, 0,25%Ca
5	Oțel manganos	20Mn10	0,17-0,24%C, 0,17-0,37%Si, 0,7-1%Mn, 0,35%P, 0,35%S, 0,3%Cr, 0,3%Ni, 0,3%Cu

Alte tipuri de materiale metalice ce s-au folosit la realizarea oțelului de Damasc prin forjare au fost fâșii de tablă din două oțeluri inoxidabile, unul austenitic și unul martensitic, cu compoziția chimică conform tabelului 4.3.

Tabelul 4.3. Compoziția chimică a oțelurilor inoxidabile

Tipul oțelului inoxidabil	Compoziția chimică	Duritate
Oțel austenitic	0,07%C, 2%Mn, 1%Si, 0,045%P, 0,03%S, 17-19,5%Cr, 8-10,5%Ni	18-20HRC
Oțel martensitic	1,4-1,5%C, 0,7%Si, 1,39%Mn, 0,012%P, 0,014%S, 1,14%Cr, 1,22Mo, 0,38%Ni, 0,028Ti, 0,22%V	65HRC

Pentru oțelurile de Damasc obținute prin metoda aglomerării de particule se pot utiliza o gamă foarte variată de oțeluri sub formă de pulbere, șpan, așchii și bucăți de dimensiuni mici sau piese de dimensiune mică, Materialul sub formă de pulbere se utilizează pentru umplerea golurilor dintre componentele de dimensiuni mai mari.

4.2. Unelte manuale folosite în timpul procesului

În timpul procesului de deformare la cald, pentru operațiile manuale, sunt folosite la forjare cât și la curățarea de zgură, o serie de ciocane de fierărie. Cele cu greutate mică, între 250-500g sunt utilizate la bătăi ușoare și dese ca ritm, menite a îndepărta zgura de pe suprafața pieselor, iar cele cu greutate mai mare, sunt utilizate la forjarea propriuzisă.

Operația manuală de forjare și cea de curățare a zgurii se realizează pe nicovala de fierărie cu ciocane manuale. Nicovala pentru operația de forjare trebuie să aibă greutate mare, între 50-120 kg. Suportul nicovalei este realizat dintr-un vas umplut cu nisip pentru absorbirea vibrațiilor sau montată fără joc pe o felie dintr-un trunchi de lemn la înălțimea necesară pentru a fi și ergonomică.

Pentru manipularea piesei încălzite la temperaturi ridicate se folosește cleștele de fierărie, care are fâlci lungi și late pentru o prindere fermă, precum și mânere lungi pentru protecția mâinilor împotriva arsurilor și pentru o forță sporită de strângere între fâlci.

Forjarea pachetului de fâșii sau caseta metalică utilizată în cazul metodei aglomerării de particule impune o presare cu forță mare pentru realizarea sudării fâșiilor sau particulelor, fapt ce a dus la proiectarea și realizarea unei prese hidraulice acționate cu un cric manual de 5 tone forță (fig.4.15).



Fig. 4.1. Presă hidraulică cu cric

Pe falca superioară și pe cea inferioară s-au montat prin sudare ghidaje sub formă de T, care permit montajul diverselor forme de poansoane necesare presării semifabricatului sub formă de fâșii.

Pe lângă plierea multiplă, răsucirea pachetului de fâșii la fabricarea oțelului de Damasc este o operație importantă a procesului, ce conferă acestui tip de material compozit stratificat, aspect deosebit și proprietăți mecanice ridicate. Pentru realizarea acestei operații de răsucire s-a impus proiectarea și execuția unui dispozitiv de răsucit (fig. 4.2) datorită dezavantajelor semnalate de folosirea uneltelor rudimentare (menghine manuale, chei de fierărie etc),

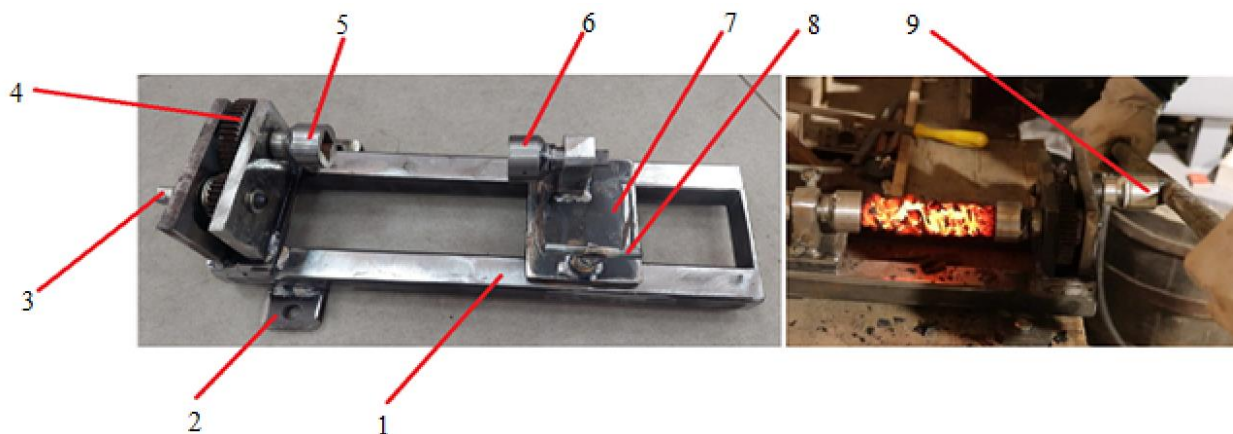


Fig. 4.2. Dispozitiv de răsucit bare prismatice de oțel încălzit la temperaturi înalte

4.3. Dispozitiv pentru testarea epruvetelor la uzare prin abrazare

Acest tip de echipament a fost selectat prin metoda deciziei impuse, detaliată în capitolul 2 al acestei lucrări, ca fiind varianta cea mai convenabilă pentru astfel de teste. Pentru efectuarea testelor, este necesar să se proiecteze și să se execute un dispozitiv specializat care va fi montat pe masa orizontală a polizorului cu bandă abrazivă continuă. În acest sens, se vor lua în considerare anumite condiții particulare necesare procesului de polizare, ilustrate în figura 4.3, cum ar fi: poziționarea perpendiculară a probei de prelucrat pe suprafața benzii abrazive, realizarea de către dispozitiv a unei

apăsări prin atașarea unor greutateți care vor exercita asupra probei o anumită forță de apăsare F_a , deplasarea probei, stânga-dreapta, cu avansul S_f pe toată lățimea benzii abrazive.

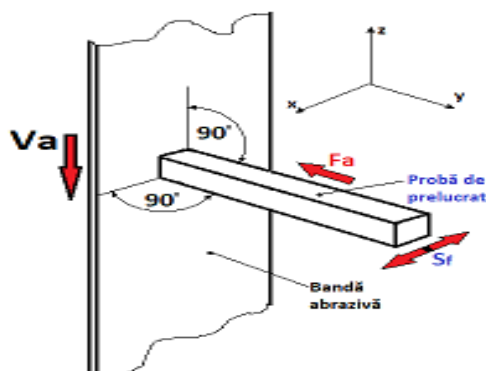


Fig. 4.3. Schema de principiu a cerințelor realizării dispozitivului



Fig. 4.4. Dispozitiv pentru testarea la uzare prin abrazare

În procesul de concepere a dispozitivului pentru testarea uzurii prin abraziune s-au luat în considerare atât cerințele teoretice, cât și resursele tehnico-materiale disponibile în atelierul autorului. În figura 4.4 este ilustrată versiunea practică a dispozitivului realizat, care, după primele utilizări și montajul pe masa polizorului, ar putea necesita anumite ajustări constructive pentru optimizarea performanței și funcționalității. Dispozitivul poate fi montat și utilizat pe alte tipuri de mașini destinate polizării, șlefuirii și lustruirii pieselor sub formă de bară, la care partea activă de așchiere este în poziție verticală.

4.4. Echipamente acționate electric

Polizorul cu bandă abrazivă continuă este un echipament extrem de util într-un atelier de fabricare a oțelului de Damasc, utilizat pentru operațiuni de polizare plană, îndepărtarea oxizilor de pe suprafețele materiei prime, debavurări, șlefuiți și ascuțirea diverselor obiecte tăietoare. În figura 4.5 este prezentată varianta de polizor cu bandă abrazivă continuă, produs în totalitate în atelierul autorului, care se află în dotarea atelierului personal.

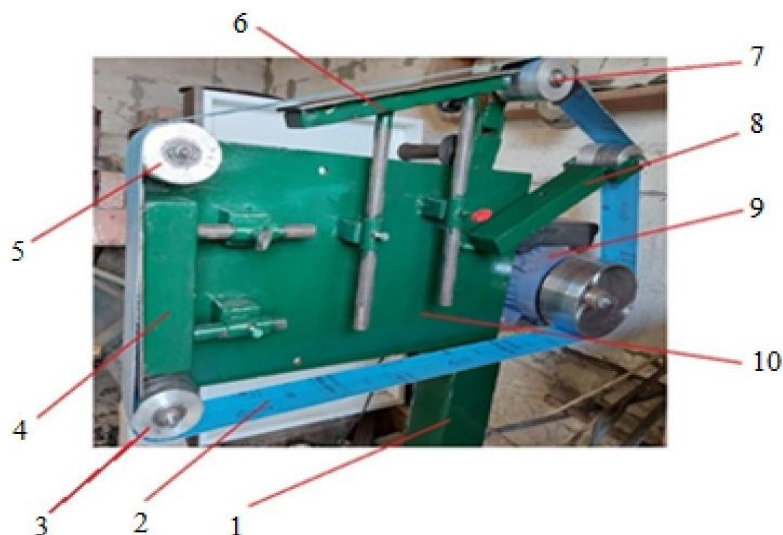


Fig. 4.5. Polizor cu bandă abrazivă continuă

Banda abrazivă utilizată pe acest tip de polizor are o lungime desfășurată de 2000 mm, iar lățimea poate varia între 50 și 75 mm. Granulația se alege în funcție de tipul operației care urmează a se efectua, precum degroșarea sau finisarea. Pentru prelucrarea prin abrazare a oțelului carbon călit la durități mari și a oțelului inoxidabil, sunt recomandate benzile cu zirconiu. Pe acest tip de polizor pot fi utilizate și alte tipuri de benzi, cum ar fi cele din pâslă pentru lustruire, impregnate cu pastă abrazivă cu granulații diferite.

Un alt tip de polizor utilizat, este cel portabil, necesar debitării benzilor metalice, al șlefuirii pieselor forjate, ce permite schimbarea cu ușurință a diverselor tipuri de discuri abrazive.

4.5 Echipament pentru încălzirea materialelor în vederea forjării și tratamentului termic

Una dintre cele mai importante etape ale procesului de forjare și tratament termic de călire este încălzirea semifabricatului la temperatura necesară. Aceasta s-a realizat utilizând un cuptor cu flacără, alimentat cu gaz petrolier lichefiat sau gaz metan stocat în butelie de 14 litri.

Cuptorul din figura 4.6 este un cuptor cu flacără de gaz, produs integral în atelierul autorului, cu materiale și subansamble procurate din comerț. Cele două arzătoare, dispuse pe partea superioară a cuptorului, permit reglarea debitului de aer absorbit. Reglajul se face prin apropierea sau îndepărtarea unor capace montate pe tije de susținere a duzelor 8, capace ce se fixează prin filet. Astfel se reglează arderea gazului în incinta cuptorului, obținându-se o flacără de culoare albastră.

4.6. Materiale și echipamente utilizate la determinarea compoziției chimice, a proprietăților mecanice și la studiul metalografic

La determinarea compoziției chimice a oțelurilor pentru care nu se cunoaște acest lucru, s-a utilizat un echipament denumit *SPECTRO AMATEK*, aflat în dotarea Compartimentului Tehnic de Calitate al companiei SC Symmetrica Tech SRL, în Verești, județul Suceava (fig. 4.28).

Spectrometrul este compus din unitatea centrală cu monitor pentru vizualizarea rezultatelor testării, instalație cu butelie de argon și pistol mobil pentru efectuarea determinărilor.

Determinarea durității s-a realizat cu ajutorul aparatului Novotest T-UD3, aflat în dotarea Compartimentului Tehnic de Calitate al SC Symmetrica Tech SRL Verești, județul Suceava (fig. 4.30.a). Acest aparat permite efectuarea testelor folosind două metode de măsurare: una indirectă, prin impedența de contact cu ultrasunete (tester cu bilă), și una directă, cu tester cu con diamantat.

Testarea cu bilă (fig. 4.30.b) este utilizată de regulă pentru verificarea durității semifabricatelor și pieselor masive de peste 5 kg, oferind măsurători grosiere. Testarea cu con (fig. 4.30.c) este recomandată pentru măsurători precise, aplicabile pieselor și semifabricatelor din toate categoriile.

Probele pentru studiul metalografic au fost debitate din bara de oțel de Damasc sub formă de cuburi cu laturile de aproximativ 10 mm, apoi au fost înglobate în rășină pentru o mai bună manevrabilitate în timpul șlefuirii pe mașina de șlefuit și lustruit. Mașina utilizată pentru șlefuirea și lustruirea probelor, face parte din dotarea Laboratorului de Microscopie Electronică și Analiză Chimică al Facultății de Știința și Ingineria Materialelor, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.

Denumirea mașinii este FORCIPOL^R GRINDER – POLISHER, alimentată la priză de 220V, dotată cu două platouri rotative, dispuse orizontal. Pe unul dintre platouri se poate șlefui cu hârtie abrazivă, de diverse granulații, iar pe celălalt se poate monta pâslă pentru operația de lustruire.

La examinarea microstructurii, determinarea compoziției chimice și măsurătorile de fâșii ale oțelului de Damasc fabricat s-a utilizat un microscop electronic cu scanare (SEM – scanning electron microscope) VEGA TESCAN II LMH, dotat cu un analizor de compoziție chimică X-Flash și un analizor de orientare a grăunților E-Flash. Microscopul se află în dotarea Laboratorului de Microscopie Electronică și Analiză Chimică al Facultății de Știința și Ingineria Materialelor, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, și este prezentat în figura 4.7. Acest tip de microscop scanează suprafața semifabricatului aflată în incinta vidată, bombardată cu un fascicul de electroni, realizând o imagine prin detectarea electronilor secundari emiși de suprafața piesei. Puterea de amplificare a microscopului este de 60.000x, iar analiza chimică punctuală se face pe o suprafață de 0,05 μm^2 prin detectarea energiei caracteristice de raze X.

Prin utilizarea unui astfel de microscop pentru probe din oțel de Damasc se pot realiza următoarele: analiza chimică a elementelor de aliere a oțelurilor componente, realizarea graficelor de distribuție a elementelor chimice componente oțelului de Damasc, analiza zonelor de interferență dintre două oțeluri cu compoziție diferită, măsurarea grăunților cristalini din masa materialului, în zona de interferență și la marginea semifabricatului unde deformarea plastică la cald este maximă, măsurarea fisurilor și a micro-fisurilor, a porilor sau a fâșiilor de oxizi formate în zonele de contact între două oțeluri diferite.

Pentru studierea metalografică a probelor de oțel de Damasc s-a utilizat *Microscopul metalografic triocular cu masa inversă ISM-M1000* (fig. 4.34), dotat cu cameră *Moticam* specială pentru analiză microscopică ce se află în dotarea Laboratorului de microscopie electronică și analiză chimică a Facultății de Știința și Ingineria Materialelor, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași.

Microscopul are o putere de mărire de 1000x, care permite studierea în detaliu a microstructurii probelor de oțel de Damasc, a orientării grăunților cristalini din zona de contact dintre cele două oțeluri componente, precum și a eventualelor defecte apărute în timpul procesului de fabricație, cum ar fi fisuri, zone cu oxizi, zone de desprindere a fâșiilor de oțel, sau zone cu deformare plastică maximă.

Măsurarea forței de torsiune a probelor de tip bară prismatică cu secțiune pătrată, răscucite cu ajutorul dispozitivului special conceput pentru această operație, se va efectua cu ajutorul cheii dinamometrice digitale BP-7468. Aceasta are o forță maximă măsurabilă de 200 Nm și o prindere cu cap pătrat de 1/2 inch, atât exterior, cât și interior. Trusa include și două adaptoare pentru cap pătrat de 1/4 inch și 3/8 inch.

4.7. Materiale utilizate la efectuarea tratamentului termic călire și revenire

Pentru izolarea probelor împotriva arderii superficiale a carbonului în cuptor la temperaturi înalte, în prezența oxigenului atmosferic, se utilizează folie de protecție din oțel inoxidabil cu grosimea de 0,1 mm, sub forma unei coli de 0,5 x 1 m (fig. 4.36). Proba destinată tratamentului termic de călire se împachetează cât mai ermetic posibil în folie, astfel încât cantitatea de oxigen din jurul piesei-probă să fie cât mai scăzută. Ulterior, piesa se introduce în cuptor pentru încălzire la temperatura necesară și se răcește într-un mediu de răcire, iar la final se îndepărtează prin despachetare.

Tipul mediului de răcire utilizat în timpul procesului de tratament termic de călire este determinat de tipul oțelului cu cea mai mare duritate din componența oțelului de Damasc fabricat prin forjare. Mediile de răcire folosite sunt apa, apa cu clorură de sodiu (saramură), uleiul mineral, jetul de aer rece, iar pentru unele oțeluri inoxidabile, este necesară utilizarea gheții carbonice pentru realizarea tratamentului termic de criogenare.

4.8. Concluzii privind logistica necesară fabricației oțelului

1. Complexitatea tehnologică ridicată a fabricării oțelurilor de Damasc a dus la o diversitate mare de materiale, soluții chimice și echipamente utilizate pe tot parcursul traseului tehnologic, dar și pentru studierea proprietăților mecanice și a microstructurii prin microscopie metalografică.

2. Testarea calității oțelului de Damasc reprezintă o etapă esențială în procesul de fabricație, având un rol crucial în asigurarea performanței și fiabilității materialului. Acest proces implică evaluarea detaliată a proprietăților mecanice, cum ar fi rezistența la tracțiune, duritatea, tenacitatea și comportamentul la solicitări dinamice, pentru a verifica dacă materialul respectă cerințele specifice de utilizare.

3. În paralel, analiza microstructurală joacă un rol fundamental în determinarea omogenității materialului, identificarea eventualelor defecte interne și evaluarea modului în care straturile forjate interacționează la nivel microscopic. În acest scop, au fost inițiate teste specifice de microscopie metalografică, care permit studierea structurii și distribuției fazelor metalice, precum și identificarea eventualelor incluziuni sau segregări ce ar putea afecta calitatea finală a oțelului.

4. Prin corelarea rezultatelor obținute din testele mecanice și analiza microstructurală, se poate optimiza procesul de fabricație, asigurându-se astfel obținerea unui oțel de Damasc de înaltă calitate, capabil să ofere combinația ideală între duritate și flexibilitate, caracteristici esențiale pentru aplicațiile în care este utilizat.

5. Răsucirea semifabricatelor din fâșii de tablă din diferite tipuri de oțel reprezintă o operație de mare importanță, care duce la îmbunătățirea proprietăților mecanice și a aspectului acestora. Aceasta a condus la necesitatea proiectării și realizării unui dispozitiv de răsucire acționat manual, prin intermediul unui angrenaj cu roți dințate, cu raport de transmitere de 1/2. Pentru automatizarea dispozitivului, este necesar, dacă se dorește, acționarea cu un moto-reductor electric, pentru a asigura o productivitate mai mare, în cazul unei producții de serie.

6. În urma documentării teoretice și a începerii cercetărilor experimentale, s-a constatat, de asemenea, necesitatea conceperii, proiectării și executării unui dispozitiv pentru testarea la uzare prin abrazare a probelor fabricate din oțel stratificat.

7. Testarea calității oțelului de Damasc reprezintă o etapă foarte importantă în cadrul procesului de fabricație. În acest context, au fost inițiate o serie de teste privind proprietățile mecanice și microstructurale, utilizând tehnici specifice de microscopie metalografică.

Capitolul 5. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND PROCESUL DE FABRICAȚIE ȘI AL PROPRIETĂȚILOR UNOR PIESE DIN OȚEL DE DAMASC

Primele încercări experimentale au fost realizate cu scopul de a verifica sudabilitatea prin forjare la temperaturi înalte a diverselor materiale componente, având compoziții chimice variate. Aceste teste au fost necesare pentru a evalua comportamentul materialelor în procesul de prelucrare și pentru a determina compatibilitatea lor în vederea obținerii unui oțel de Damasc cu proprietăți mecanice și estetice optime. Sudabilitatea a fost analizată în funcție de cele două metode distincte utilizate în prezent pentru fabricarea acestui tip special de oțel, fiecare având caracteristici proprii și rezultate diferite în ceea ce privește structura finală a materialului.

5.1. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet format din 9 de fâșii cu 4 tipuri de oțel – Descrierea procesului

Procesul de fabricare a oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet format din 9 fâșii cu 4 tipuri de oțel implică mai multe etape. Se selectează materialele pe baza proprietăților mecanice (tenacitate – oțel carbon obișnuit, elasticitate – oțel arc, duritate – oțel pentru scule și rezistență la uzură – oțel manganos), fâșiile sunt șlefuite, degresate și asamblate alternativ pentru a evita contactul direct între același tip de oțel. Pachetul este presat, sudat și încălzit la 600°C pentru aplicarea unui strat antioxidant (Borax), apoi forjat la 850–900°C în cicluri succesive. După sudarea completă a straturilor prin forjare, semifabricatul este modelat manual cu ciocanul și adus la o formă pătrată pentru următoarea etapă – răsucirea la cald. Înainte de răsucire, materialul este șlefuit și pasivat pentru evidențierea defectelor.

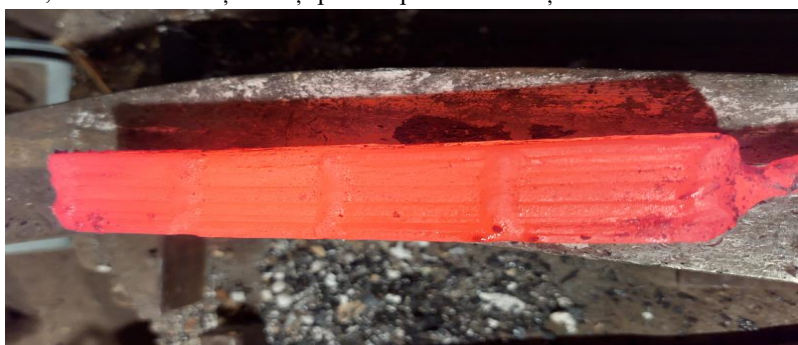


Fig. 5.1. Semifabricat curățat de zgură

Răsucirea de două ori la 360° ajută la sudarea straturilor și obținerea modelului distinctiv al oțelului de Damasc. Procesul necesită forță mare de torsiune, ceea ce a condus la proiectarea unui dispozitiv specializat. La final, verificarea vizuală confirmă sudura corectă, cu defecte minime doar la capete, care sunt îndepărtate prin debitare.

5.2. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet format din 26 de benzi cu 3 tipuri de oțel – Descrierea procesului

Experimentul a vizat obținerea oțelului de Damasc prin forjarea unui număr mai mare de fâșii, pentru a analiza sudabilitatea materialelor, comportamentul la tratament termic și apariția defectelor. Au fost utilizate trei tipuri de oțel: OL50 (tenace), OSC10 (duritate ridicată) și OSC8 (duritate mare), dispuse într-un pachet de 26 de fâșii.

Procesul tehnologic a constat în următoarele etape: pregătirea materialelor (debitare, îndreptare, șlefuire și decapare chimică), formarea pachetului alternarea fâșiilor pentru optimizarea proprietăților mecanice, forjarea manuală și hidraulică, urmată de polizare și șlefuire pentru eliminarea defectelor.



Figura 5.2. Probă forjată și pasivată din 26 fâșii

Defectele identificate (zgură, neuniformități de sudură) s-au localizat la exterior și au fost îndepărtate prin polizare. Duritatea a fost măsurată folosind un tester cu con diamantat, evidențiind o durificare prin deformare plastică. Cele mai mari valori s-au înregistrat pentru OSC10, iar cele mai mici pentru OL50.

Tratament termic de călire s-a făcut prin încălzire la 900°C, menținere 15 minute, protecție cu folie de inox pentru a evita decarburarea, urmată de răcire în două trepte: ulei mineral (200°C) și apoi apă, pentru a preveni fisurarea prin șoc termic. Rezultatele au confirmat îmbunătățirea proprietăților mecanice ale oțelului de Damasc, iar tratamentul termic a asigurat o structură optimă fără fisuri.

Studiu metalografic al oțelului de Damasc fabricat din 26 de benzi din 3 tipuri de oțel carbon

Studiul metalografic a fost realizat pe un semifabricat obținut prin forjarea a 26 de benzi din oțel carbon, urmat de tratamentul termic de călire. Cercetarea a vizat analiza microscopică a zonelor de contact dintre benzi, identificarea fisurilor generate de forjare și călire, detectarea zonelor cu zgură și observarea modificărilor cristaline la nivelul materialului și al sudurii prin forjare.

Examinarea microscopică a fost realizată cu un microscop metalografic ISM-M1000, echipat cu cameră Moticam. Proba analizată a fost atacată cu soluție acidă de pasivare și cu Nital 2% pentru clarificarea microstructurii.

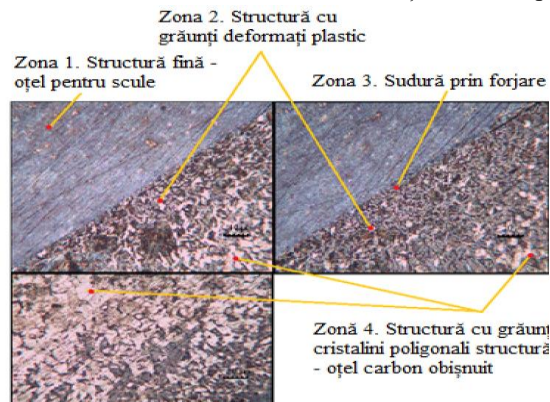


Fig. 5.3. Imagini cu microstructura centrală a barei forjate din 26 de benzi din oțel pentru scule și oțel carbon obișnuit

Studiul a evidențiat o sudură eficientă între benzile componente, fără discontinuități, dar cu deformări plastice în zona oțelului carbon obișnuit, mai accentuate decât în oțelul pentru scule. În benzile marginale ale barei forjate s-au identificat zone cu oxizi, rezultate din contactul cu oxigenul atmosferic în timpul încălzirii la forjă.

Microscopia a relevat și prezența unor incluziuni de zgură (~30 μm), care au deformat oțelul pentru scule și au pătruns în interfața dintre metale. Aceste incluziuni au fost facilitate de durificarea locală a oțelului carbon obișnuit, supus deformării plastice și fenomenului de ecruisare.

Studiul metalografic a demonstrat o bună coeziune între benzile forjate, cu sudură eficientă prin forjare, dar și cu defecte marginale generate de oxidare și incluziuni de zgură. Diferențele structurale dintre tipurile de oțel influențează comportamentul microstructural, iar optimizarea procesului de forjare și tratamentului termic poate reduce defectele observate.

Studiul microstructurii și a compoziției chimice pentru proba de oțel de Damasc fabricat din 26 de benzi

Studiul microstructurii și compoziției chimice a unui oțel de Damasc cu 26 de benzi a fost realizat folosind un microscop electronic cu scanare (SEM) VEGA TESCAN II LMH, dotat cu analizor de compoziție chimică și analizor de orientare a grăunților. S-a analizat în special zona de sudură dintre oțelul pentru scule și oțelul carbon obișnuit, observându-se impurități microscopice la limitele de sudură, probabil provenite din faza de pregătire a suprafețelor.

Analiza microstructurală a evidențiat deformarea grăunților cristalini ai oțelului carbon în apropierea zonei de sudură, precum și prezența feritei și perlitei, tipice unui oțel carbon cu până la 0,4% carbon.

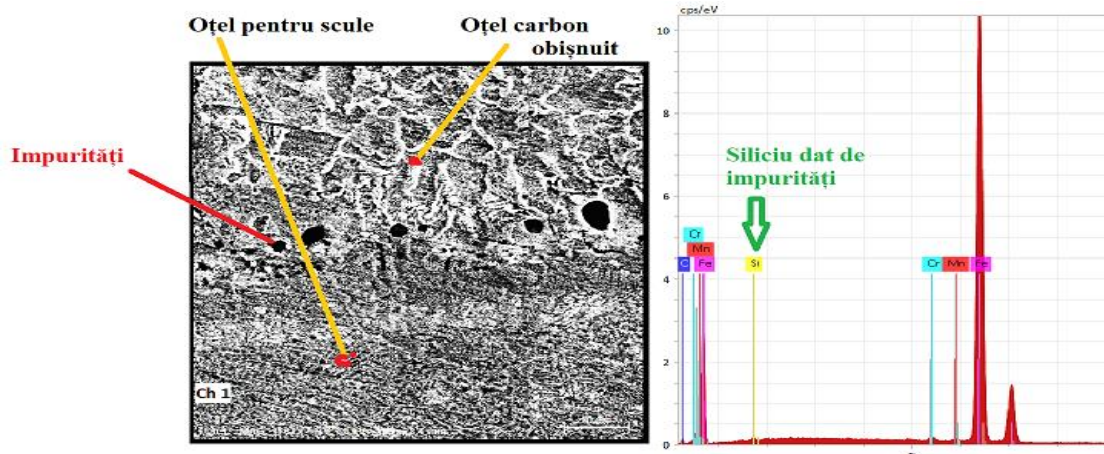


Fig. 5.4. Suprafață pentru determinarea compoziției chimice și grafic cu nivelul de distribuție elementelor chimice din zona de sudură

Analiza chimică a relevat variații de compoziție între oțelul pentru scule și oțelul carbon, în special pentru elemente precum cromul și siliciul. Impuritățile identificate în zona de sudură au fost atribuite unor posibile reziduuri de nisip sau alte particule rămase în urma șlefuirii și forjării (fig. 5.4).

Pentru o mai bună diferențiere a componentelor chimice în analiza structurală, se recomandă utilizarea unor materiale metalice cu compoziții chimice mai contrastante.

5.3. Fabricarea oțelului de Damasc prin metoda aglomerării de particule 3 tipuri de oțel – Descrierea procesului

Oțelul de Damasc este cunoscut pentru modelul său distinctiv și proprietățile sale mecanice superioare. De-a lungul timpului, acesta a fost fabricat prin diverse metode, cea mai tradițională fiind suprapunerea și forjarea unor benzi de oțel cu conținut diferit de carbon. O metodă modernă și avansată implică aglomerarea particulelor din diverse tipuri de oțel, oferind un control precis al compoziției și omogenității materialului rezultat. Această tehnică, similară metalurgiei pulberilor, permite obținerea unui oțel cu duritate și finețe structurală ridicate.

Procesul experimental a fost realizat utilizând trei tipuri de oțel, sub formă de particule metalice, care au fost aglomerate într-o casetă metalică și supuse forjării la temperaturi înalte. Principalele etape ale procesului sunt: alegerea și pregătirea materialelor, confecționarea casetei metalice, introducerea și compactarea particulelor, închiderea și pregătirea casetei pentru forjare, încălzirea și forjarea, extragerea probei și finisarea.

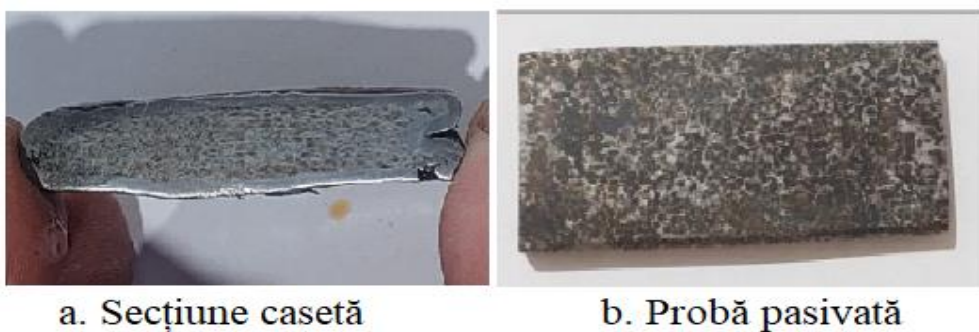


Fig. 5.5. Probă din oțel de Damasc fabricată prin aglomerare de particule

Experimentul a demonstrat eficiența metodei de obținere a oțelului de Damasc prin aglomerarea de particule. S-a obținut un material omogen, cu proprietăți mecanice superioare, combinând rezistența și duritatea.

5.4. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet compus din 92 de benzi din 2 tipuri de oțel – Descrierea procesului

Oțelul de Damasc obținut prin forjarea unui pachet de benzi metalice prezintă o structură stratificată cu proprietăți mecanice superioare și un model ondulat distinctiv. În cadrul experimentului, s-a ales utilizarea a 92 de benzi subțiri din două tipuri de oțel: OL37 și OLC65A, pentru a accelera formarea straturilor fine și a obține un material stratificat, durabil și estetic (fig. 5.6).

Pregătirea materialului a implicat debitarea, șlefuirea și degresarea benzilor, urmată de aranjarea lor alternativă într-un pachet compact. Pentru fixare, s-au utilizat plăci de capăt și sudură cu arc electric. Încălzirea inițială a fost realizată până la 600-650°C, moment în care s-a aplicat soluție antioxidantă (Borax) pentru prevenirea oxidării. Apoi, pachetul a fost încălzit la 850-900°C și supus unui proces de forjare manuală inițială, urmată de curățarea zgurii și aplicarea succesivă a soluției antioxidante.



Fig. 5.6. Detalii de pe suprafețele probei cu 92 de benzi

Forjarea s-a desfășurat în opt faze, incluzând alternanța dintre încălzire, forjare manuală și presare hidraulică. După forjare, s-a obținut o bară prismatică, care a fost răsucită de cinci ori la 360° pentru a evidenția modelul stratificat. Ulterior, semifabricatul a fost prismat prin cinci cicluri suplimentare de forjare, obținându-se o bară dreptunghiulară de 20x8 mm, apoi finisată prin abrazare la dimensiunile finale de 10x4,5 mm. Testele au confirmat că metoda utilizării benzilor subțiri permite obținerea rapidă a unui oțel de Damasc cu caracteristici autentice. Totuși, procesul necesită atenție la temperatura de forjare și la faza de răsucire, pentru a evita arderea benzilor sau ruperea straturilor exterioare.

5.5. Fabricarea oțelului de Damasc prin forjarea unui pachet compus din 20 de benzi din 2 tipuri de oțel inoxidabil – Descrierea procesului

Solidarizarea benzilor de oțel inoxidabil prin forjare la cald este mai dificilă față de cea a oțelurilor carbon, pentru că sunt greu sudabile prin multe procedee de sudare, în special oțelurile martensitice.

Pentru acest experiment s-a optat pentru realizarea oțelului de Damasc din 10 benzi de oțel inoxidabil austenitic din tablă cu grosimea de 1,5 mm și 10 benzi de oțel inoxidabil martensitic din partea fără dinți a unei pânze panglică continuă de fierăstrău de debitat metale, cu grosimea de 1,2 mm, ambele tipuri cu lățimea de 20 mm și lungimea de 120 mm.

Oțelurile inoxidabile utilizate în experiment au fost de tip austenitic (AISI304) și martensitic, fiecare având compoziții chimice distincte și durtăți diferite. Oțelul austenitic, bogat în crom și nichel, este rezistent la rugină și temperaturi ridicate, dar greu sudabil. Oțelul martensitic, având un conținut ridicat de carbon, prezintă o duritate mare, însă este dificil de prelucrat prin forjare.

Pachetul inițial format din benzi de oțel austenitic (345 g) și martensitic (232 g) a avut o greutate totală de 577 g. După sudarea prin arc electric, greutatea a crescut la 588 g, datorită adaosului de material. În urma forjării, greutatea a scăzut la 568 g, din cauza pierderii de material prin ardere și formarea de zgură. Cea mai mare pierdere, de 230 g, a fost înregistrată în timpul rășucirii pachetului, unde temperaturile ridicate (900-1000°C) au favorizat arderea straturilor exterioare și desprinderea unor benzi.



Fig. 5.7. Pachet rășucit din oțeluri inoxidabile

Procesul de rășucire a fost problematic, deoarece materialele inoxidabile sunt greu sudabile, iar formarea zgurii între straturi a dus la pierderi semnificative și la desprinderea unor benzi. După finalizarea rășucirii, pachetul a fost șlefuit și pasivat pentru a evidenția structura sudurii și efectele procesului de rășucire (fig. 5.7). Experimentul a demonstrat dificultățile forjării oțelurilor inoxidabile și importanța controlului temperaturii pentru minimizarea pierderilor de material.

5.6 Etapele fabricării epruvetei de oțel de Damasc compusă din 40 de benzi

Materiale utilizate la realizarea pachetului de benzi

Experimentul a implicat fabricarea a trei tipuri de semifabricate forjate și rășucite, utilizate pentru teste de uzare prin abraziune. Acestea au fost realizate din 40 de benzi din două tipuri de oțel: OL50/E295 (oțel slab) și OSC10/C105 W1 (oțel cu conținut ridicat de carbon). Benzile au fost încălzite, forjate, presate și rășucite, iar compoziția chimică a materialelor a fost determinată prin spectroscopie.

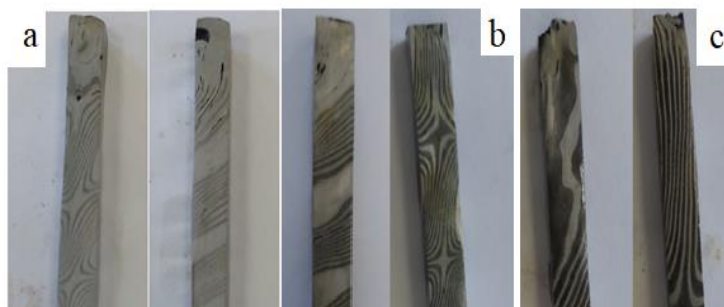


Fig. 5.8. epruvete cu 40 de benzi, a. 10C/30S, b. 20C/20S, c. 30C/10S

S-au realizat trei tipuri de epruvete:

10C/30S (10 benzi de oțel carbon, 30 benzi de oțel slab) – 7 rășuciri, cu momente de torsiune de 68, 74 și 82 N•m.

20C/20S (20 benzi de fiecare tip) – 5 rășuciri, momente de torsiune de 76, 80 și 110 N•m.

30C/10S (30 benzi de oțel carbon, 10 benzi de oțel slab) – 2 rășuciri, momente de torsiune de 80, 101 și 126 N•m.

Procesul de fabricare a inclus încălzirea la temperaturi între 650-950°C, aplicarea de borax pentru prevenirea oxidării, forjarea și presarea repetată, urmată de răsucire monitorizată cu cheie dinamometrică și măsurarea temperaturii cu termometru digital. Numărul de răsuciri și momentul de torsiune diferă în funcție de compoziția pachetului, observându-se că epruvetele cu mai mult oțel carbon rezistă mai bine la torsiune, dar au un număr mai mic de răsuciri posibile.

Tabelul 5.1. Centralizare date experimentale

Pachet – compoziția Nr. fâșii	Operația de răsucire 1		Operația de răsucire 2		Operația de răsucire 3	
	Moment max. de torsiune măsurat, [Nm]	Nr. rotații la 360°	Moment max. de torsiune măsurat, [Nm]	Nr. rotații la 360°	Moment max. de torsiune măsurat [Nm]	Nr. rotații la 360°
10C/30S	68	2,75	74	2,5	82	1,75
20C/20S	76	2,5	80	1,5	110	1
30C/10S	80	1	101	0,65	126	0,35

În tabelul 5.1 sunt centralizate valorile momentului de torsiune la care s-a oprit procesul în fiecare faza de răsucire, pentru cele 3 epruvete obținute. După forjare și răsucire, epruvetele au fost șlefuite la dimensiunile necesare testării prin uzare prin abrazare cu bandă abrazivă montată pe polizorul cu bandă.

5.7. Contribuții privind testarea la uzare prin abrazare a probei din 40 de benzi

Uzura reprezintă un proces inevitabil de degradare a suprafețelor aflate în contact și supuse frecării. Acest fenomen are loc prin pierderi progresive de material, modificări structurale sau variații ale durității. Uzura poate fi influențată de mai mulți factori, inclusiv tipul de material, condițiile de operare, natura solicitărilor mecanice și prezența agenților externi. În funcție de acești factori, uzura poate avea loc prin mai multe mecanisme, precum abraziunea, azeziunea, eroziunea, oboseala de contact sau coroziunea.

Uzura prin abraziune este un proces mecanic ce implică îndepărtarea materialului prin așchiere sau micro-așchiere, sub acțiunea particulelor abrazive sau a unui contact mecanic intens. Testele de abraziune sunt utilizate pentru a evalua rezistența materialelor solide la uzură prin frecare repetată.

Pentru evaluarea uzurii prin abraziune a probelor din oțel de Damasc, s-a utilizat un dispozitiv special montat pe un polizor cu bandă abrazivă continuă. Banda avea o lățime de 50 mm și particule abrazive din dioxid de zirconiu cu granulație P120, fiind adecvată pentru prelucrarea oțelurilor dure.

Trei semifabricate din oțel de Damasc au fost prelucrate în bare prismatice (8x8 mm). Din fiecare bară s-au obținut trei probe, prin debitare cu disc abraziv și răcire cu apă pentru a minimiza efectele termice. Probele au fost marcate diferit în funcție de forța de apăsare aplicată în timpul testării:

Testarea s-a realizat cu o durată de 60 secunde pentru fiecare probă, cu răcire continuă cu apă. Dispozitivul de testare a realizat mișcări stânga-dreapta pentru a limita uzura neuniformă a benzii abrazive. Pentru fiecare tip de probă, s-a utilizat o bandă abrazivă nouă, evitând astfel influența uzurii benzii asupra rezultatelor.

Ca indicator al uzurii s-a considerat pierderea în lungime a probelor, măsurată cu un șubler digital. Rezultatele testării au fost centralizate în tabelul 5.2, incluzând lungimea inițială a fiecărei probe și lungimea finală după testare, diferența dintre acestea indicând pierderea prin abraziune.

Aceste teste au permis evaluarea comparativă a rezistenței la abraziune a oțelului de Damasc, oferind date relevante pentru optimizarea utilizării acestuia în aplicații unde uzura reprezintă un factor critic.

Tabelul 5.2. Rezultatele testelor la uzarea prin abrazare a epruvetelor necălite

Forța de apăsare	Pachet 30S/10C			Pachet 20S/20C			Pachet 10S/30C		
	Lungime inițială, l_i [mm]	Lungime finală, l_f [mm]	Indicator uzare prin abrazare $\Delta_{i30S/10C}$ [mm]	Lungime inițială, l_i [mm]	Lungime finală, l_f [mm]	Indicator uzare prin abrazare $\Delta_{i20S/20C}$ [mm]	Lungime inițială, l_i [mm]	Lungime finală, l_f [mm]	Indicator uzare prin abrazare $\Delta_{i10S/30C}$ [mm]
0,5 daN	40	36,4	2,6	38,5	37,28	1,22	37	36,21	0,79
1 daN	40	31,25	8,75	38,5	33,94	4,56	37	33,39	3,61
1,5 daN	40	28,5	11,5	38,5	29,64	8,86	37	31,46	5,54

S-a notat cu $\Delta_{i30S/10C}$ – indicatorul de uzare prin abrazare dat de pierderea în lungime a pieselor de probă testate în starea inițială, necălite.

Pentru testarea la uzare prin abrazare după efectuarea tratamentului termic de călire s-au respectat aceleași condiții de testare ca și în cazul testării epruvetelor necălite, iar rezultatele experimentale corespunzătoare încercării la uzare prin abrazare a epruvetelor călite sunt incluse în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3. Valorile testării la uzare prin abrazare a probelor din oțel de Damasc după efectuarea tratamentului termic de călire

Forța de apăsare	Pachet 30S/10C			Pachet 20S/20C			Pachet 10S/30C		
	Lungime inițială, l_i [mm]	Lungime Finală, l_f [mm]	Indicator uzare prin abrazare $\Delta_{T30S/10C}$ [mm]	Lungime inițială, l_i [mm]	Lungime Finală, l_f [mm]	Indicator uzare prin abrazare $\Delta_{T20S/20C}$ [mm]	Lungime inițială, l_i [mm]	Lungime Finală, l_f [mm]	Indicator uzare prin abrazare $\Delta_{T10S/30C}$ [mm]
0,5 daN	28,5	26,26	2,24	29,64	28,55	1,09	31,46	30,48	0,98
1 daN	31,25	25,5	5,75	33,94	30,86	3,08	33,39	31,47	1,92
1,5 daN	36,46	29,72	6,74	37,28	33,98	3,3	36,21	33,54	2,67

S-a notat cu $\Delta_{T30S/10C}$ – indicatorul de uzare prin abrazare dat de pierderea în lungime a probelor călite testate.

Datorită dimensiunilor reduse ale probelor supuse tratamentului termic și pentru a analiza pierderea constantă de material în timp, s-a optat pentru testarea uzurii prin abraziune folosind o singură valoare a forței de apăsare, de 0,5 daN. Pentru a determina viteza procesului de uzură prin abraziune, s-au efectuat măsurători la fiecare 20 de secunde de abraziune, fiecare epruvetă fiind testată pe o durată totală de 300 de secunde, echivalentă cu 15 cicluri de câte 20 de secunde, redate în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4. Rezultatele testelor la uzarea prin abrazare a epruvetelor călite, cu o forță de apăsare de 0,5 daN, cu măsurarea lungimii acestora după 20 secunde

Nr. test	Pachet 30S/10C		Pachet 20S/20C		Pachet 10S/30C	
	Lungime inițială (mm)	Lungime prelucrată (mm)	Lungime inițială (mm)	Lungime prelucrată (mm)	Lungime inițială (mm)	Lungime prelucrată (mm)
0	29,72	-	33,98	-	33,54	-
1	29,53	0,19	33,76	0,22	33,41	0,13
2	29,31	0,42	33,49	0,27	33,37	0,14
3	28,86	0,45	33,27	0,22	33,25	0,12
4	28,43	0,43	33,03	0,24	33,11	0,14
5	27,99	0,44	32,78	0,25	32,96	0,15
6	27,59	0,4	32,56	0,22	32,84	0,12
7	26,9	0,31	32,32	0,24	32,70	0,14
8	26,55	0,35	32,12	0,2	32,57	0,13
9	26,21	0,34	31,91	0,21	32,45	0,12
10	25,9	0,31	31,69	0,22	32,31	0,14
11	25,62	0,28	31,46	0,23	32,15	0,16
12	25,28	0,34	31,24	0,22	32,02	0,13
13	24,99	0,29	31,00	0,24	31,90	0,12
14	24,59	0,3	30,77	0,23	31,78	0,12
15	24,38	0,31	30,55	0,22	31,64	0,14
	Total lungime abrazată	29,72 -24,38 = 5,34 mm	Total lungime abrazată	33,98 -30,55 = 3,43 mm	Total lungime abrazată	33,54 – 31,64 = 1,9 mm
	Timp total de prelucrare	300s	Timp total de prelucrare	300s	Timp total de prelucrare	300s

Influența diferiților factori asupra micșorării lungimii epruvetei ca urmare a procesului de abrazare

Pentru a determina un model matematic empiric care să evidențieze influența factorilor asupra micșorării epruvetei (Δl) în timpul testării la abraziune, datele experimentale au fost reorganizate și analizate. Factorii considerați includ forța de apăsare (F), starea materialului epruvetei (călit sau necălit, s) și raportul (r) dintre numărul de benzi din oțel cu rezistență scăzută și numărul de benzi din oțel pentru scule.

Experimentele s-au desfășurat pe o perioadă de 60 de secunde, iar rezultatele obținute au fost centralizate în tabelul 5.5. S-a observat că micșorarea lungimii epruvetei prin abraziune crește odată cu forța de apăsare și depinde de starea materialului, probele necălite având o uzură mai pronunțată. De asemenea, raportul r influențează semnificativ rezultatele, indicând o corelație între compoziția materialului și rezistența la abraziune.

Tabelul 5.5. Condiții de efectuare și rezultate ale încercărilor experimentale de abrazare

Nr. exp.	Factori de intrare în proces			Parametru de ieșire din proces
	Forță de apăsare F , N	Starea materialului, s	Raport r	Micșorarea lungimii epruvetei prin abrazare, Δl mm
1	0,5	1	3	2,6
2	0,5	1	1	1,22
3	0,5	1	0,3	0,79
4	1,0	1	3	8,75
5	1,0	1	1	4,56
6	1,0	1	0,3	3,61
7	1,5	1	3	11,5
8	1,5	1	1	8,86
9	1,5	1	0,3	5,54
10	0,5	2	3	2,24
11	0,5	2	1	1,09
12	0,5	2	0,3	0,98
13	1,0	2	3	5,75
14	1,0	2	1	3,08
15	1,0	2	0,3	1,92
16	1,5	2	3	6,74
17	1,5	2	1	3,3
18	1,5	2	0,3	2,67

Observație. Au fost luate în considerare valorile $s=1$ pentru starea necălită a materialului epruvetei și respectiv $s=2$ pentru starea călită a materialului epruvetei. Durata încercărilor experimentale a fost de 60 de secunde.

Pentru a obține o relație matematică relevantă, datele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul unui program bazat pe metoda celor mai mici pătrate (Crețu, 1992). Acest program permite selectarea celui mai adecvat model matematic empiric dintre cinci variante posibile: polinom de gradul întâi, polinom de gradul al doilea, funcție de tip putere, funcție exponențială și funcție hiperbolică. Alegerea modelului optim s-a realizat pe baza criteriului lui Gauss, care evaluează diferențele dintre valorile estimate de model și rezultatele experimentale.

Criteriul lui Gauss este calculat ca un raport între suma pătratelor diferențelor dintre valorile modelului și valorile experimentale și diferența dintre numărul de experimente și numărul de constante din model. Modelul ales este cel care are cea mai mică valoare a acestui criteriu, indicând cea mai bună potrivire cu datele experimentale. Astfel, modelul final obținut poate fi utilizat pentru a prezice uzura prin abraziune a materialelor studiate, facilitând optimizarea proceselor tehnologice și selectarea celor mai potrivite materiale pentru aplicații specifice.

Prin utilizarea programului specializat de calculator, s-a constatat că cel mai adecvat model matematic empiric în raport cu rezultatele experimentale obținute este o funcție de tip putere, a cărei formă este următoarea:

$$\Delta l = 4,487 F^{1,341} s^{-0,599} r^{0,407} \quad (5.1)$$

valoarea criteriului lui Gauss este $SG=0,8092058$.

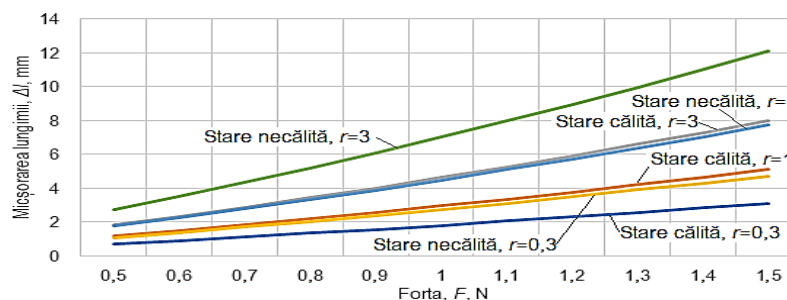


Fig. 5.47. Influența forței F de apăsare a epruvetei asupra micșorării Δl a lungimii epruvetei prin abrazare, pentru epruvete în stare inițială (necălite, $s=1$) și respective epruvete călite ($s=2$) și pentru valori diferite ale rapoartelor r (durata încercării a fost de 60 de secunde)

Cu ajutorul modelului matematic de tip funcție putere, au fost elaborate reprezentările grafice.

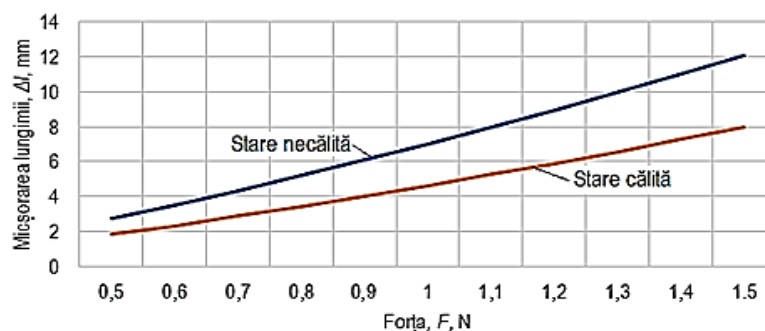


Fig. 5.48. Influența forței F de apăsare a epruvetei asupra micșorării Δl a lungimii epruvetei prin abrazare, pentru epruvete în stare inițială (necălite) și respective epruvete călite (pentru raportul $r=3$, durată a încercării de 60 de secunde)

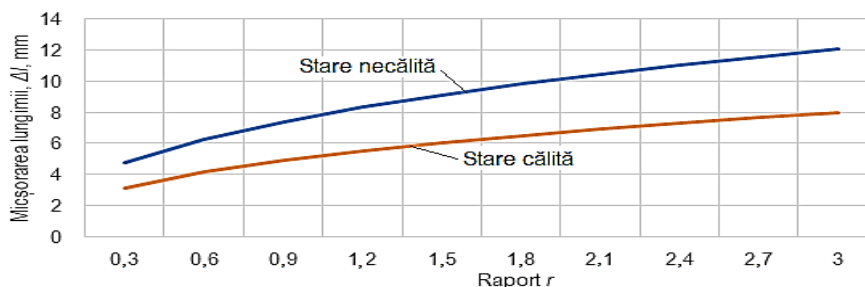


Figura 5.49. Influența mărimii raportului r dintre numărul de benzi din oțel cu rezistență scăzută și numărul de benzi din oțel de scule asupra micșorării Δl a lungimii epruvetei prin abrazare, pentru epruvete în stare inițială (necălite, $s=1$) și respectiv epruvete călite ($s=2$), în cazul unei forțe de apăsare $F=1,5$ N (durata încercării a fost de 60 de secunde)

Analiza modelului matematic empiric și a reprezentărilor grafice a permis formularea observațiilor menționate în continuare.

Se constată astfel că, așa cum era de așteptat, o mărire a forței de apăsare F a epruvetei pe banda abrazivă conduce la o mărire a intensității procesului de micșorare a lungimii epruvetei, contribuind la o creștere a micșorării Δl a lungimii epruvetei. De asemenea, o mărire a raportului r dintre numărul benzilor de oțel cu rezistență scăzută și numărul benzilor din oțel de scule are drept rezultat de asemenea o creștere a micșorării Δl a lungimii epruvetei, dată fiind creșterea ponderii benzilor din oțel de sculă. Se constată că influența exercitată de către forța de apăsare F este mai mare decât influența raportului r , întrucât, în modelul matematic empiric, valoarea exponentului atașat factorului F (1,341) este mai mare decât valoarea exponentului atașat factorului r (0,407).

Pe de altă parte, se poate observa că trecerea de la starea necălită a materialului inclus în epruvetă (situație careia îi corespunde o valoare $s=1$) la starea călită (pentru care, în modelul matematic empiric, se folosește valoarea $s=2$), are loc o diminuare a valorii micșorării Δl a lungimii epruvetei, întrucât valoarea exponentului atașat factorului s în modelul matematic empiric este negativă. Această scădere a valorii Δl se explică, desigur, prin creșterea durtății globale a materialului epruvetei, ca urmare a călirii cu precădere a oțelului de scule inclus în benzile din epruvetă.

5.8. Concluzii

Studiul experimental a vizat fabricarea și testarea unor oțeluri stratificate, similare celui de Damasc, pentru obținerea unor materiale cu proprietăți mecanice superioare și aspect specific. În cadrul experimentelor, s-au forjat pachete din benzi de oțel diferite, analizându-se sudabilitatea, defectele apărute, comportamentul la tratamente termice și rezistența la uzură.

Experimentele au demonstrat că sudarea prin forjare la cald este eficientă, dar pot apărea defecte precum incluziuni de zgură, în special la marginile barelor. S-a observat că materialele cu conținut ridicat de carbon sunt mai rigide, în timp ce oțelurile tenace suferă deformații mai mari. Creșterea numărului de benzi subțiri (92 de bucăți) a permis reducerea duratei de fabricație și obținerea unui aspect autentic.

Fabricarea oțelului de Damasc din benzi inoxidabile a prezentat dificultăți semnificative din cauza sudabilității reduse și a pierderilor de material. Cu toate acestea, analiza probelor oferă perspective pentru optimizarea procesului.

Testele de uzură prin abraziune au arătat că forța de apăsare și raportul dintre benzile de oțel influențează semnificativ degradarea materialului. Materialele călite au prezentat o rezistență superioară la uzură. Modelarea matematică a confirmat aceste tendințe, oferind un instrument util pentru optimizarea testelor și aplicarea materialelor în domenii industriale.

Capitolul 6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PROPRII ȘI DIRECȚII ALE CERCETĂRILOR VIITOARE

6.1. Concluzii generale privind rezultatele cercetării documentare

1. Evoluția metalurgiei fierului a fost esențială pentru progresul tehnologic, culminând cu dezvoltarea oțelului de Damasc, recunoscut pentru proprietățile sale superioare. Fascinația pentru acest material datează din perioada cruciadelor, când europenii au descoperit armele din Damasc, dar multe dintre tehnicile de fabricație s-au pierdut în timp.

2. Cercetările moderne în metalurgie și ingineria materialelor nu doar că încearcă să reproducă acest oțel, ci și să îi îmbunătățească performanțele prin tehnologii avansate, precum imprimarea 3D și tratamente termice inovatoare.

3. Studiile recente au evidențiat importanța microstructurii controlate și a materialelor compozite în obținerea unor aliaje cu caracteristici optimizate. Totuși, provocări precum pierderea carbonului la temperaturi înalte rămân obstacole importante, iar viitoarele cercetări trebuie să găsească soluții mai accesibile pentru prevenirea acestui fenomen.

6.2. Concluzii generale privind rezultatele cercetărilor teoretice

1. Îmbinarea materialelor metalice prin presare reprezintă o metodă eficientă, alternativă la sudura convențională, fiind utilizată pentru a evita modificările structurale cauzate de temperaturi înalte. Optimizarea procesului de fabricare a oțelului Damasc s-a realizat prin proiectarea unui dispozitiv manual de răsucire, adaptabil pentru automatizare, și prin aplicarea principiilor Proiectării Axiomatice pentru eficientizarea traseului tehnologic. Compararea metodelor de obținere a evidențiat avantajele forjării fâșiilor de oțel cu conținut diferit de carbon, datorită controlului superior asupra proprietăților finale.

2. Pentru prevenirea formării oxizilor în timpul forjării, analiza Ishikawa a identificat factorii cauzali și măsuri corective, contribuind la îmbunătățirea calității mecanice și estetice a materialului. Testarea rezistenței la uzură a demonstrat că polizorul cu bandă abrazivă continuă este cea mai eficientă metodă de prelucrare.

3. În plus, analiza factorilor care influențează uzura oțelului Damasc a subliniat importanța compoziției chimice, a structurii și a durității materialului, recomandând studii experimentale pentru optimizarea selecției acestuia.

6.3. Concluzii generale privind constituirea bazei materiale necesare în cadrul încercărilor experimentale

1. Fabricarea oțelului de Damasc este un proces complex, ce implică diverse materiale, echipamente și metode de analiză. Verificarea calității acestuia este esențială și presupune testarea proprietăților mecanice pentru a asigura performanța și fiabilitatea materialului.

2. Analiza microstructurală ajută la identificarea defectelor interne și la evaluarea interacțiunii dintre straturile forjate. Testele de microscopie metalografică permit detectarea incluziunilor sau fisurilor care pot afecta calitatea finală.

3. Corelarea testelor mecanice cu analiza microstructurală permite îmbunătățirea procesului de fabricație, obținând un oțel de Damasc echilibrat între duritate și flexibilitate.

4. Răsucirea semifabricatelor din fâșii de tablă îmbunătățește atât proprietățile mecanice, cât și aspectul materialului. A fost creat un dispozitiv manual de răsucire, cu posibilitatea de automatizare pentru producția de serie.

5. Pentru testarea uzurii prin abraziune s-a realizat un dispozitiv compatibil cu un polizor cu bandă abrazivă, capabil să aplice o forță constantă asupra probelor, asigurând evaluarea precisă a durabilității materialului.

6. Cercetările au dus la optimizarea procesului de fabricație, prin îmbunătățirea tehnicilor de forjare, tratament termic și control al microstructurii. S-au testat noi metode de stratificare și deformare plastică, pentru o mai bună uniformitate și eliminarea defectelor.

7. Integrarea tehnologiilor avansate, precum analiza spectrometrică și microscopie electronică, permite caracterizarea detaliată a materialului. Aceste inovații contribuie la perfecționarea tehnicilor tradiționale și la adaptarea lor la cerințele moderne, extinzând utilizarea oțelului de Damasc în aplicații de înaltă performanță.

6.4. Concluzii generale privind rezultatele studiilor experimentale

1. Studiul experimental a testat și validat tehnologii pentru fabricarea oțelului stratificat, similar oțelului de Damasc, urmărind obținerea unor materiale rezistente și cu un aspect distinctiv.

2. S-au forjat pachete din mai multe tipuri de oțel pentru a evalua sudabilitatea la presiune și comportamentul materialelor în procesul de fabricație. Analiza finală a confirmat o bună sudare a straturilor, iar eventualele defecte, precum incluziunile de zgură, au fost localizate și corectate.

3. Un experiment suplimentar a testat un pachet mai complex de fâșii din oțeluri diferite, analizând sudabilitatea, tratamentul termic și duritatea materialului obținut.

4. Studiul microstructural a arătat o bună sudare în zona centrală și acumulări de zgură la margini, cauzate de oxidare. Diferențele de plasticitate dintre oțeluri au influențat deformarea în timpul forjării.

5. Experimentul bazat pe aglomerarea particulelor de oțel a produs un material omogen și rezistent, potrivit pentru aplicații ce necesită durabilitate. Testele viitoare vor confirma performanțele și utilizările industriale.

6. S-a testat un pachet cu 92 de fâșii subțiri pentru a reduce timpul de fabricație, obținându-se un semifabricat compact, cu un model ondulat specific oțelului de Damasc.

7. Utilizarea oțelului inoxidabil a generat dificultăți în sudarea prin forjare, din cauza pierderilor de material și desprinderii straturilor exterioare. Analiza rezultatelor oferă soluții pentru optimizarea procesului.

8. Trei epruvete cu 40 de benzi de oțel, având diferite compoziții, au fost testate pentru influența asupra forjabilității, rezistenței mecanice și uzurii prin abraziune. Sudarea eficientă a asigurat stabilitatea pachetelor.

9. Analiza experimentală și modelarea matematică au demonstrat că forța de apăsare și compoziția influențează uzura. Creșterea durității prin călire reduce pierderile materiale, oferind o bază pentru optimizarea procesului.

6.5. Contribuții proprii

1. A realizat o cercetare documentară amplă, sintetizând informații științifice și tehnice despre istoria, proprietățile și tehnologia de fabricație a oțelului de Damasc.

2. A inițiat și dezvoltat experimente practice privind fabricarea obiectelor tăietoare din oțel de Damasc și alte oțeluri aliate, cu peste 10 ani înainte de studiile doctorale, creând un atelier propriu echipat pentru prelucrarea la cald.

3. A proiectat și construit un dispozitiv pentru răsucirea probelor prismatice la cald, permițând măsurarea cuplului de torsiune și controlul numărului de răsuciri.

4. A desfășurat cercetări experimentale privind optimizarea tehnologiilor de fabricație, testând combinații unice de materiale și dezvoltând modele matematice pentru a analiza factorii care influențează producția pieselor din oțel de Damasc.

5. A proiectat și realizat un dispozitiv pentru testarea uzurii prin abraziune, montat pe un polizor cu bandă abrazivă, utilizat în propriul atelier.

6. A publicat rezultatele cercetării în jurnale științifice și conferințe, cu 13 articole prezentate și incluse în volumele unor conferințe, alături de alte articole publicate. A fost prim autor pentru mai multe lucrări și coautor la 4 propuneri de invenție.

6.6. Direcții viitoare de cercetare

Conturate pe baza cercetărilor teoretice și experimentale realizate până în prezent se vor aprecia ca viitoare direcții de cercetare, următoarele:

1. Se propune extinderea gamei de materiale utilizate pentru epruvetele din cadrul cercetărilor experimentale, incluzând nu doar materialele deja analizate, ci și alte aliaje metalice. Printre acestea se numără diverse tipuri de oțeluri cu proprietăți specifice, precum și materiale neferoase, care ar putea oferi perspective noi asupra comportamentului mecanic, structural și funcțional al componentelor studiate. Această abordare ar permite o evaluare mai cuprinzătoare a performanțelor materialelor în diferite condiții de solicitare mecanică.

2. Se propune concentrarea cercetărilor teoretice privind fezabilitatea și optimizarea implementării soluției constructive pentru un utilaj de tip ciocan mecanic, destinat forjării pieselor din oțel de Damasc. Acest demers vizează atât analiza detaliată a principiilor de funcționare și a parametrilor tehnici ai echipamentului, cât și identificarea celor mai eficiente metode de adaptare la cerințele specifice ale procesului de forjare.

3. Explorarea posibilităților de includere a unor funcții suplimentare în dezvoltarea modelelor matematice empirice, cu scopul de a evidenția influența factorilor de intrare asupra parametrilor de ieșire specifici proceselor de prelucrare la cald a pieselor din oțel de Damasc. Această strategie urmărește creșterea preciziei și fiabilității modelelor, facilitând o înțelegere mai profundă și o optimizare eficientă a proceselor tehnologice implicate.

4. Extinderea cercetărilor teoretice și experimentale prin analiza influenței factorilor de intrare asupra unui spectru mai larg de parametri de ieșire. Printre aceștia se numără microduritatea în zonele de contact dintre suprafețe, distribuția tensiunilor interne după forjare, precum și aspecte legate de variația conținutului de carbon în materialele componente ale oțelurilor de Damasc. Această abordare va contribui la o caracterizare mai detaliată a procesului de prelucrare și la îmbunătățirea proprietăților finale ale pieselor obținute.

5. Aprofundarea cercetărilor teoretice și experimentale privind dezvoltarea forjării prin metoda aglomerării de particule utilizând materiale reciclate, în special resturi tehnologice rezultate în urma prelucrărilor mecanice și a prelucrării prin electroeroziune a oțelurilor înalt aliate.

LISTĂ SELECTIVĂ A REFERINTELOR BIBLIOGRAFICE

1. Balasubramanian, N., *Additive manufacturing creates Wootz-Damascus steel*, Springer, 2020, consultată la data de 05.09.2021, <https://link.springer.com/article/10.1557/mrs.2020.233>
2. Belous, V., *Creația tehnică în construcția de mașini. Inventica*. Iași: Editura Junimea, 1986, consultată la data de 25.11.2022
3. Crawford, C. *Canister Damascus with J. Neilson*, 2017. Disponibil la https://www.youtube.com/watch?v=eRiubNeCGe4_ Accesat 30.08.2022
4. Dodun O., Cavique M., Slătineanu L., Dușa, P., *Using the axiomatic design in engineering*, in *Advances in Product Design Engineering*. (Eds.: Kyratsis P., Efkolidis N., Davim J.P.), Springer, 2022, p. 25-58, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-98124-2_2.
5. Durand-Charre, M.. *Damascus and pattern-welded steels*. In *Damascus and pattern-welded steels*. EDP Sciences, 2014.
6. Gnesin, G. G., *Iron Age: Origin and evolution of ferrous metallurgy*, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2016, vol. 55, p. 114-123, consultată la data de 11.11.2022
7. Surugiu, I., Hrițuc, A., Ermolai, V., Boca, M. A., *Observatii privind realizarea unor piese din oțeluri de DAMASC*, Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor, Chișinău, Republica Moldova, 29-31 Martie 2022, Vol. I, p 664-668, consultată la data de 17.10.2022 https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/p-664-668.pdf;
8. Lamsam, K., Lauer, C., Shepanski, P., Talmor, M., *Historical Evolution Of Samurai Arms And Armors Japan, 700 AD – 1880 AD* <https://digitalcommons.wpi.edu/iqp-all>, accesat la data 14.06.2023
9. Litchfield, J.T.Jr., Wilcoxon, F., *Rank correlation method*, Analytical Chemistry, 1955, vol. 27, 2, p. 299–300, consultată la data de 14.02.2022, <https://doi.org/10.1021/ac60098a03>,
10. Lohan, N.M., *Tehnici de analiză și caracterizare a materialelor*, Suport de curs pentru uzul studenților, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași 2020, https://sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2021/05/Curs-TACM_2020.pdf, accesat la data 27.02.2024.
11. Nagâț, G., Rusu, B., Iepușă, E., Slătineanu, L., *Asupra posibilității de aplicare a noi metode de stimulare a creativității în proiectarea dispozitivelor de deformare plastică superficială*. P R A S I C ' 02, 2002 Vol. III – Design de Produs 7-8 Noiembrie, Brașov, România,
12. Nagâț, G., Slătineanu, L., *Bazele Creației Tehnice în Construcția de Mașini*, Rotaprint, 1998, consultată la 25.08.2024
13. Nichici, A., Cicală, E., Mee, R., *Prelucrarea datelor experimentale. Curs și aplicații*, Universitatea „Politehnica”, Centrul de multiplicare, Timișoara, 1996.
14. Perttula, J., *Wootz Damascus steel of ancient orient*. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2004, vol.33(2), p. 92-97, consultată la 19.07.2023
15. Perttula, J., *Reproduced wootz Damascus steel*, Scandinavian Journal of Metallurgy, 2001, vol. 30.2, p. 65-68, consultată la 19.07.2023
16. Plahteanu, B., *Ingineria valorii și performanța în creația tehnică*. Iași: Editura Performantica, 1999, consultată la 25.03.2023
17. Reibold, M., Paufler, P., Levin A.A., Kochmann, W., Pätzke, N., Mey, D. C., *Discovery of Nanotubes in Ancient Damascus Steel*, – Springer, 2009, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88201-5_35, consultată la data de 25.05.2022
18. Reibold, M., Pätzke, N., Levin, A. A., Kochmann, W., Shakhverdova, I. P., Paufler, P., & Meyer, D. C., *Structure of several historic blades at nanoscale*, Crystal Research and Technology: Journal of Experimental and Industrial Crystallography, 2009, vol. 44(10), p. 1139-1146, consultată la data de 25.05.2022
19. Royer, K., *Making a Damascus Fighting Knife in Under 19 Minutes*, 2022. Disponibil la <https://www.youtube.com/watch?v=eZD93VuAxk8>. Accesat: 28.08.2022
20. Sachse, M., *Damascus steel – Myth, History, Technology, Applications* – 2008 by Verlag Stahleisen, dusseldorf, Germania, 2008, p. 19-20;
21. Slătineanu, L., *Bazele cercetării științifice*, Editura PIM, Iași, 2020.
22. Slătineanu, L., *Bazele cercetării științifice*, Iași: Editura PIM, 2019, p 120-124, 333-336, 385-391
23. Slătineanu, L., Dușa, P., *Bazele Creației Tehnice în Construcția de Mașini*. Iași, Universitatea Tehnică „Gh.Asachi”, 1996, pp. 382-385.
24. Slătineanu, L., German, L., Coteață, M., Beșliu, I., Dodun, O., *Using creative resources in applying axiomatic design*. ICAD 2013, 2013, accesat la 15. 11.2023
25. Srinivasan, S., *Ultrahigh-carbon “wootz” from crucible carburization of molten iron: Hypereutectoid steel from “Tamil Nadu Process” at Mel-siruvalur*. Materials and Manufacturing Processes, (2017), vol. 32(7-8), ISSN:1042-6914,p.909-915, accesată la 25.08.2023, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2016.1221106>,
26. Srinivasan, S., și Ranganathan, S., *India's legendary wootz steel: an advanced material of the ancient world*, National Institute of advanced studies, 2004, p. 1-153, <http://eprints.nias.res.in/651/>, accesată la 25.08.2023

27. Stefanivic, S., Kiss, I., Stanojevic, D., Janjic, N., *Analysis of technological process of cutting long using Ishikawa diagram*, *Acta Tehnica Corviniensis*, Bulletin of Engineering, 2014, vol. 4 :93, <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2014-4/ACTA-2014-4-15.pdf>, accesat la 25.03.2023
28. Sternstein, L., *Note on the rank correlation method*, *The Professional Geographer*, vol. 14, no. 2, 1962, accesată la 22.08.2023, <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1111/j.0033-0124.1962.00010.x>,
29. Strobl S., Haubner R., *Microstructural characterization of ferrous materials forged by the Damascus technique*, *Materials Performance and Characterization*, 2016, vol. 5; p. 617 – 626, disponibil la: <https://asmedigitalcollection.asme.org/materialsperformance/article-abstract/5/5/617/1186640/Microstructural-Characterization-of-Ferrous?redirectedFrom=fulltext>, accesat la 14.05.2023
30. Strobl, S., Haubner, R., Scheiblechner, W., *Damascus steel inlay on a sword blade – production and characterization*, In: *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 742, p. 333-340, acesată la 14.05.2023, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.742.333>.
31. Suh N. P., *Axiomatic Design: Advances and Applications*, Oxford University Press, New York, 2001.
32. Suh N. P., *The principles of design*, University Press, Oxford, 1990
33. Suh N.P., Cavique M., Foley J.T., *Design engineering and science*, Springer Cham, 2021, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49232-8>, accesată la data 16.05.2023
34. Sukhanov, D. A., Arkhangel'Skii, L. B., *Damascus steel microstructure*, *Metallurgist*, 2016, vol. 59.9, p. 818-822, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11015-016-0178-x>,
35. Sukhanov, D. A., & Plotnikova, N. V., *Wootz: cast iron or steel?*, *Materials Sciences and Applications* 7.11.2016, p. 792-802, disponibil la: <https://scirp.org/journal/PaperInformation?PaperID=72327>, accesat la 16.05.2023
36. Sukhanov, D. A., Arkhangel'Skii, L. B., & Plotnikova, N. V., *Nature of angular carbides in Damascus steel*. *Metallurgist*, 2017, vol. 61, p. 40-46, disponibil la: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11015-017-0451-7>, accesat la 15.05.2023
37. Sukhanov, D. A., Arkhangelsky, L. B., Plotnikova, N. V., & Belousova, N. S., *Morphology of excess carbides Damascus steel*. *Journal of Materials Science Research*, 2016, vol. 5(3), p. 59-65, disponibil la: https://arhangelskie.com/pdf/eng/pdf_eng_01.pdf, accesat la 28.05.2023
38. Sukhanov, D. A., & Plotnikova, N. V., *Formation of faceted excess carbides in Damascus steels ledeburite class*, *Journal of Materials Science and Engineering B*, 2018, vol. 8, p. 36-44, disponibil la: <https://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/5aeffd9950046.pdf>, consultată la data 23.06.2023
39. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11015-018-0654-6>, accesat la 10.06.2023
40. Sukhanov, D., Plotnikova, N., *Influence of the Distribution of Excess Carbide on the Properties of Genuine Damascus Steel*, *Materials Sciences and Applications*, 2019, Vol.10(2), 2019, p. 118-136, disponibil la: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=90292>, accesat la 25.06.2023
41. Surugiu, I., Coteață, M., Jureschi, Ș., Hrițuc, A., Crăciun, E., Beșliu-Băncescu, I., & Slătineanu, L., *Using the rank correlation method for ordering the factors influencing the results of some wear tests*. *TEHNOMUS*, 2023, <https://fim.usv.ro/wp-content/uploads/sites/9/2023/12/01.pdf>
42. Taleff, E. M., Bramfitt, B. L., Syn, C. K., Lesuer, D. R., Wadsworth, J., Sherby, O., *Processing, structure, and properties of a rolled, ultrahigh-carbon steel plate exhibiting a damask pattern*, *Materials Characterization*, Vol. 46, Nr. 1, Ianuarie 2001, p. 11-18, disponibil la: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580300000875> accesat la data 01.08.2023
43. Verhoeven, J., *Pattern formation in wootz Damascus steel swords and blades*, *Indian Journal of History of Science*, 2007, vol. 42(4), p. 559-574, [http://www.hefajstos.agh.edu.pl/files/\[2007\]%20Pattern%20formation%20in%20wootz%20damascus%20steel%20swords%20and%20blades%20-%20J.%20Verhoeven.pdf](http://www.hefajstos.agh.edu.pl/files/[2007]%20Pattern%20formation%20in%20wootz%20damascus%20steel%20swords%20and%20blades%20-%20J.%20Verhoeven.pdf) , accesat la data 14.06.2023
44. Verhoeven, J. D., *The mystery of Damascus blades*. *Scientific American*, 2001, Vol. 284, Nr.1, p. 74-79, disponibil la: <https://www.jstor.org/stable/26059015>, accesat la data 24.06.2023
45. Verhoeven, J., Pendray, A., *The Mystery of the Damascus Sword*, *Muse*, 1998, Vol. 2(2), p. 35-43, disponibil la: [http://www.hefajstos.agh.edu.pl/files/\[1998\]%20The%20Mystery%20of%20the%20Damascus%20Sword%20-%20J.%20Verhoeven%20A.%20Pendray.pdf](http://www.hefajstos.agh.edu.pl/files/[1998]%20The%20Mystery%20of%20the%20Damascus%20Sword%20-%20J.%20Verhoeven%20A.%20Pendray.pdf), accesat la 15.06.2022
46. Verhoeven, J.D., Pendray, A.H., Dauksch, W.E., Wagstaff, S.R., *Damascus steel revisited*. In: *The Minerals, Metals & Materials Society*, 2018, 70, pp. 1331-1336. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2915-z>
47. Verhoeven, J. D., *Genuine Damascus steel: a type of banded microstructure in hypereutectoid steels*, *Steel Research*, 2002, vol. 73.8, p. 356-365, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/srin.200200221>, accesat la 15.06.2022
48. Wadsworth J., Lesuer D. R., *Ancient and Modern Laminated Composites, From the Great Pyramid of Gizeh to Y2K*, *Materials Characterization*, 2000, vol. 45(4-5), p. 289-313, disponibil la: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580300000772> accesat la 05.05.2022
49. Zidzik, A., Mital'ova, Z., Botko, F., Simkulet, V., Botkova, D., Mital', D., *Evaluation of Mechanical Properties of Damascus Steel*, *TEM Journal*, 2021, Vol. 10, pp 1616-1620, ISSN 2217-8309, disponibil la: <https://www.cceol.com/search/article-detail?id=997879>, consultată la data 12.04.2022