



Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca
Str. C. Daicoviciu, Nr. 15
400020 Cluj -Napoca

URCERETA
Centrul de Cercetari in
Tehnologia Deformarii
Plastice a Tablelor Metalice

Contract PN-II-ID-PCCE 6/2010

MODELAREA CONTINUA - DE LA MICRO LA MACRO SCARA - A MATERIALELOR AVANSATE IN FABRICATIA VIRTUALA

Obiective

1. Caracterizarea experimentală la nivel micro și macro a aliajelor selectate
2. Modelarea la nivel micro și microscopic a comportării materialelor testate
3. Implementarea modelelor elaborate în programe de calcul
4. Validarea rezultatelor simulării unor procese de deformare
5. Activități de management

Director de proiect

Prof. Dr. Ing. Dorel BANABIC

Cluj Napoca
Decembrie 2011

Obiectivul 1: Caracterizarea experimentală la nivel micro și macro a aliajelor selectate

1.1. Selectarea și achiziționarea materialelor de testare

Alături de sortimentul de oțel testat în 2010, s-a achiziționat și un aliaj pe bază de aluminiu AA6016-T4 de grosime 1.00 mm. Acest material a fost selectat întrucât are o utilizare extinsă în industria auto. Compoziția chimică a aliajului AA6016 este prezentată în tabelul de mai jos.

Tabelul 1.1.1 Compoziția chimică a aliajului de aluminiu AA6016-T4 (în %)

| Mg | Si | Fe | Cu | Cr | Ti | Mn | Zn | Impuritati | Al |
|----------|---------|-----|-----|------|------|------|------|------------|--------|
| 0.25-0.6 | 1.0-1.5 | 0.5 | 0.2 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.20 | <= 0.15 | restul |

1.2. Determinarea parametrilor mecanici prin încercări la tracțiune

Parametrii mecanici ai tablei AA6016-T4 cu grosimea de 1.00 mm au fost determinați folosind mașina de încercări Zwick/Roell aflată în dotarea laboratorului CERTETA de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. Au fost determinate experimental următoarele caracteristici de plasticitate ale materialului: coeficientul de anizotropie r , limita de curgere $R_{p0,2}$, rezistența la rupere R_m , coeficientul de ecrusare n și modulul de ecrusare K . Acești parametri au fost măsurați pe epruvete prelevate la 0° , 45° , respectiv 90° față de direcția laminării tablei. Pentru fiecare înclinare au fost prelevate câte șapte epruvete, și au fost determinate șapte curbe tensiune-deformație. Dintre acestea, au fost validate câte cinci curbe pentru fiecare direcție de prelevare. În tabelul 1.2.1 sunt prezentate valorile medii ale parametrilor de material obținuți prin încercarea la tracțiune.

Tabelul 1.2.1: Parametrii mecanici ai tablei AA6016-T4 cu grosimea de 1.00 mm

| | $r[-]$ | $R_{p0,2}[\text{MPa}]$ | $R_m[\text{MPa}]$ | $n[-]$ | $K[\text{MPa}]$ | $E[\text{GPa}]$ |
|------------|--------|------------------------|-------------------|--------|-----------------|-----------------|
| 0° | 0.64 | 139.26 | 264.26 | 0.25 | 487.44 | 67.33 |
| 45° | 0.53 | 137.23 | 261.22 | 0.26 | 483.96 | 68.45 |
| 90° | 0.64 | 136.30 | 260.10 | 0.25 | 481.57 | 67.91 |

Pentru determinarea coeficientului de anizotropie biaxial au fost efectuate 5 încercări de compresiune folosind epruvete circulare cu diametrul de 10mm. Pentru aliajul de aluminiu AA6016-T4, valoarea coeficientului de anizotropie obținută ca media a 5 încercări de

compresiune este 1,069, iar în cazul tablei de oțel DC04, coeficientul de anizotropie are valoarea 0,918.

1.3. Determinarea parametrilor mecanici prin încercarea de umflare hidraulică

Parametrul mecanic determinat este limita de curgere biaxială pentru trei sortimente de tablă. Pe baza curbelor experimentale obținute prin umflare hidraulică, în final au fost determinate limitele de curgere biaxiale. Materialele testate au fost sub formă de tablă din oțel laminat la rece din clasa DC04 (0,85 mm), respectiv aliajele de aluminiu AA6016-T4 (1 mm) și AA1100-O (1 mm). Rezultatele acestor determinări sunt prezentate în tabelul 1.3.1.

Tabelul 1.3.1. Limite de curgere biaxiale determinate prin încercări de umflare hidraulică

| Nr. | Material | Y_0 [MPa] | Media mediilor rapoartelor $(Y_b / Y_0)_{mediu}$ | Y_b [MPa] | |
|-----|----------|-------------|--|--|-------------|
| | | | | Metoda echivalării lucrului mecanic | Prin fitare |
| 1 | DC04 | 195 | 1.2806 | 249.725 | - |
| 2 | AA6016 | 139 | 1.0127 | 140.764 | - |
| 3 | AA1100 | - | - | - | 27.940 |

1.4. Determinarea experimentală a efectului spinului plastic

Pentru analiza experimentală a spinului plastic, a fost elaborată o metodologie care constă în solicitarea la tracțiune simplă a unor epruvete pe care a fost imprimată inițial o rețea cu rol de reper. Legea care descrie evoluția spinului plastic urmează a fi determinată prin urmărirea distorsiunilor rețelei. Influența anizotropiei materialului asupra spinului plastic va fi analizată prelevate la diverse unghiuri față de direcția laminării tablei.

1.5. Realizarea unor grade de deformare diferite ale tablelor prin laminare

Cercetările experimentale au fost efectuate pe două sortimente de tablă: DC04 (0,85 mm), respectiv AA6016-T4 (1 mm). În vederea testării, din cele două materiale au fost prelevate fâșii de 10 mm lățime, orientate pe trei direcții în planul tablei (0, 45, respectiv 90° față de direcția laminării). Acestea au fost deformate folosind o instalație de laminare, obținându-se următoarele grade de reducere a grosimii: 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%. În cazul tablei DC04, a fost atins un grad maxim de deformare de 84%, iar în cazul tablei AA6016-T4, un grad de deformare maxim de 93%. În a doua etapă a cercetărilor,

epruvetele au fost testate prin încercări la tracțiune uniaxială, fiind de asemenea supuse unor analize de microscopie metalografică și de textură.

1.6. Determinarea texturii materialelor testate bazată pe XRD și EBSD

Textura de deformare a fost determinată prin două metode : difracție de raze X (XRD) și difracție de electroni retro-imprăstiați (EBSD). Măsurătorile au fost efectuate pe planele cristaline (111), (200), (220), (222), (311), (331), (400), (420) și (422). Textura formată în timpul deformării este o combinație dintre textura caracteristică a alamei (textura de tip α care se compune din suprapunerea texturilor pure de tip B și G) și textura caracteristică a cuprului (textura de tip β formată din suprapunerea texturilor de tip B, S și C). Acestea pot fi vizualizate în spațiul eulerian ca două linii, prima pornește din punctul G ($\Phi_1=0$, $\Phi_2=45$ și $\Phi_3=90$ corespunzătoare unei texturi pure de tip Goss $\{110\}[001]$) până la punctul B corespunzător orientării $\{110\}[1-12]$ sau ($\Phi_1=35$, $\Phi_2=45$ și $\Phi_3=90$), a doua pornește din B și ajunge în C $\{112\}[111]$ sau ($\Phi_1=90$, $\Phi_2=35$ și $\Phi_3=45$ – textura pură de tipul cuprului) trecând prin punctul S $\{123\}[634]$ sau ($\Phi_1=59$, $\Phi_2=37$ și $\Phi_3=63$).

1.7. Determinarea microstructurii materialelor testate

Analiza prin microscopie metalografică efectuată la mărimi mici pe epruvete prelevate din tablă DC04 indică faptul că structura inițială este cea a feritei cu grăunți poligonali, având o distribuție a dimensiunii neomogenă, până la 50 μm . În probele nedeformate, golurile sunt prezente în număr foarte mic. Deformarea plastică la rece induce importante schimbări structurale în ceea ce privește forma, dimensiunea și structura fiecărui grăunte. La grade mici de deformare (20 %) grăunții încep să fie alungiți în direcția de deformare, gradul de alungire a acestora crește odată cu creșterea deformării materialului. La o deformare de 70 %, o structură cu grăunți foarte orientați este vizibilă. Continuarea deformării duce la apariția unei structuri fibroase, când grăunții sunt ruși și prezintă structură discontinuă, cu multe goluri (89 % grad de deformare).

1.8. Dezvoltarea unui program de prelucrare automată a imaginilor pentru determinarea formei și distribuției golurilor

A fost elaborat un algoritm pentru detecția și măsurarea micro-golurilor din materialele deformate. Algoritmul a fost testat pe un număr de peste 180 de imagini. Cu excepția câtorva situații, s-a observat că algoritmul a reușit să identifice cu succes micro-golurile. La mărimi puternice (5000X, 10000X) și în prezența unui zgomot electric marcant, algoritmul identifică artefactele date de șlefuire ca fiind micro-goluri. Acest lucru se datorează

faptului că minimele locale din interiorul artefactelor au valori de gri foarte apropiate (identice, de cele mai multe ori) cu cele din goluri. În această situație, algoritmul nu mai poate discrimina între minimele locale din micro-goluri și cele din artefacte. Rezolvarea acestor dificultăți ale algoritmului va fi obiectul cercetărilor viitoare.

1.9. Determinarea experimentală a formei și distribuției golurilor din material

Probele deformate în prealabil au fost tăiate și înglobate în rășină pentru analiza metalografică. Probele au fost lustruite cu pulbere de alumină. Analiza probelor neatacate indică o creștere a numărului de goluri mari odată cu creșterea gradului de deformare, cel mai mare număr de goluri observându-se la probele deformate 50 %. Cu creșterea gradului de deformare la valori superioare, 70 sau 89 % apare o reducere a numărului de goluri mari și o multiplicare a golurilor mici (mai ales pentru proba deformată 89%).

La grade de deformare mici (până la 20 %), golurile apar la limiele de grăunți, iar la grade de deformare mai mari, ele evoluează în direcția deformării. Începând de la grade de deformare de 40 %, se observă apariția unor familii de goluri care probabil au posibilitatea să comunice între ele. Continuarea deformării până la 70 %, duce la apariția de goluri și în interiorul grăunților, dar și la apariția unor linii paralele care pot reprezenta fie perlită, fie linii de alunecare formate datorită depășirii limitei de forfecare în material. La ultimul grad de deformare investigat (89 %), structura observată prezintă grăunți foarte alungiți. De asemenea, există fracturi de grăunți și grăunți mici, care nu prezintă o orientare pe direcția de deformare. Golurile sunt vizibile atât în interiorul grăunților, cât și la limita lor.

1.10. Determinarea experimentală a suprafețelor de curgere

Pentru determinarea suprafețelor de plasticitate au fost efectuate încercări la tracțiune uniaxială pe trei direcții în planul tablei (la 0, 45, respectiv 90° față de direcția laminării), experimente de umflare hidraulică pe epruvete de formă de formă circulară, precum și compresiunea pe grosime a unor epruvete discoidale. În urma acestor experimente au fost determinați următorii parametri mecanici: limitele de curgere normalizate și coeficienți de anizotropie corespunzători unor stări de solicitare uniaxială, respectiv biaxială. Încercările au fost efectuate pe două sortimente de tablă: DC04 (0,85 mm) și AA6016-T4 (1 mm). Parametrii mecanici ai celor două materiale sunt prezentați în tabelul 1.10.1. Cu ajutorul acestor date, au fost determinate prin calcul suprafețele de plasticitate prezise de criteriul de plasticitate BBC 2008.

Tabelul 1.10.1. Parametrii mecanici ai materialelor testate

| Nr. | Material | y_{0° | y_{45° | y_{90° | y_b | r_{0° | r_{45° | r_{90° | r_b | k |
|-----|----------|---------------|----------------|----------------|-------|---------------|----------------|----------------|-------|-----|
| 1 | DC04 | 1 | 1.067 | 1.048 | 1.281 | 1.955 | 1.299 | 2.192 | 1.045 | 3 |
| 2 | AA6016 | 1 | 0.985 | 0.979 | 1.013 | 0.640 | 0.530 | 0.640 | 1.050 | 4 |

1.11. Determinarea experimentală a Curbelor Limita de Deformare (CLD)

Au fost determinate curbele limită de deformare pentru tabla de oțel DC04 (0.85mm) și pentru aliajul de aluminiu AA6016-T4 (1mm), folosind procedeul de întindere pe poanson sferic și umflarea hidraulică, respectând metodologia experimentală definită în standardul ISO 12004-2/2008. În vederea obținerii unor stări de deformare diferite, s-au utilizat epruvete cu geometrie de tip Hasek, în conformitate cu prevederile normativului ISO 12004-2/2008. Deformațiile limită au fost măsurate cu ajutorul unui sistem optic de tip ARAMIS versiunea 6.1.7, prin procedeul Bragard. Pentru fiecare punct de pe curba limită de deformare au fost utilizate deformațiile rezultate în urma a cel puțin trei experimente valide.

Obiectivul 2: Modelarea la nivel micro și microscopic a comportării materialelor testate

2.1 Dezvoltarea unui model de suprafețe de curgere anizotrope și validarea acestuia

Principalul obiectiv al acestei activități a constat în elaborarea unei proceduri de identificare robuste a criteriului de plasticitate BBC 2008 și testarea fiabilității acesteia. Membrii echipei de cercetare au optat pentru o procedură care operează cu parametrii de anizotropie asociați unor stări de solicitare la tracțiune de tip uniaxial și biaxial. Testarea performanțelor de convergență ale strategiei de identificare a fost realizată pe cazul a două sortimente de tablă: DC04 (0,85 mm), respectiv AA6016-T4 (1 mm). Verificările au demonstrat că modelul constitutiv reușește să descrie exact absolut toate caracteristicile de anizotropie folosite ca date de intrare.

2.2 Utilizarea ODF in programe de analiza de textura

Functia ODF a fost determinata utilizand software-ul PANalytical X'Pert Texture. Pentru proba deformata la 90%, a fost remarcat faptul că figurile polare experimentale sunt in buna concordanta cu cele determinate pe baza ODF, fapt ce releva gradul ridicat de incredere al procedurii de determinare a ODF-urilor din figurile polare experimentale. Pentru proba

deformata la 40% concordanta intre figurile polare experimentale si teoretice nu este asa de buna din cauza rezolutiei experimentale mai reduse a determinarii figurilor polare din cauza faptului ca textura este mai putin definita la grade reduse de deformare. Figurile polare determinate prin EBSD sunt in concordanta cu cele determinate prin XRD. Trebuie notat faptul ca nu se poate face o comparatie cantitativa intre cele doua tipuri de figuri polare din cauza faptului ca in prezent nu exista un software pentru a determina ODF-urile din analize EBSD.

2.3 Identificarea unui model fenomenologic de plasticitate utilizand date din analiza de textura

A fost testată capacitatea criteriului de plasticitate fenomenologic BBC 2008 de a surprinde anizotropia determinată prin calcul, folosind modelele cristalografice Taylor, respectiv ALAMEL. Datele furnizate procedurii de identificare BBC 2008 au fost reprezentate de parametrii ce definesc anizotropia unui semifabricat de tablă AA1100-O (1 mm) în stări de solicitare uniaxială la unghiuri reprezentând multipli de 15° în planul semifabricatului, precum și anizotropia în regim de tracțiune biaxială. În urma testelor, s-a constatat că modelul constitutiv nu reușește să descrie decât aproximativ caracteristicile de anizotropie folosite ca date de intrare. A fost totuși sesizat faptul că, în formularea cu 16 coeficienți, criteriul BBC 2008 furnizează predicții mult mai bune, în special atunci când identificarea pleacă de la rezultatele modelului Taylor. Chiar și în varianta utilizării datelor de intrare furnizate de modelul ALAMEL, varianta cu 16 coeficienți a criteriului BBC 2008 funcționează bine, singurele discrepanțe semnificative apărând în cazul distribuției planare a limitei de curgere la tracțiune uniaxială.

2.4 Elaborarea unor modele de tip Gurson pentru materiale anizotrope cu goluri

A fost propusă o variantă îmbunătățită a modelului Gurson. Noul model introduce o aproximare mai realistă, considerând ca ecruisarea matricii variaza in functie de distanta fata de goluri, regiunile mai apropiate de gol prezentând o ecruisare mai pronunțată. În continuare, modelul Gurson modificat a fost cuplat cu modelul Marciniak-Kuczynski, în vederea determinării curbelor limita de deformare. A fost analizat efectul golurilor din material inainte de atingerea deformatiei limita, scopul final fiind acela de a dezvolta un model de predictie a curbelor limita care sa nu aiba nevoie de o zona initial mai slaba. O altă direcție de cercetare a constat în dezvoltarea unui model de tip Gurson pentru materiale poroase cu goluri elipsoidale cu plasticitate anizotropa bazata pe transformari liniare. Dificultatile principale rezolvate in faza actuală sunt determinarea functiei de disipatie plastica pentru convexe de plasticitate

anizotrope și ne-patratice, aproximarea câmpului microscopic de viteze, aproximarea disipatiei plastice macroscopice și în fine reducerea la un model de tip Gurson.

2.5. Model de plasticitate și lege de ecrusare fenomenologice bazate pe textură

A fost elaborat un algoritm bazat pe schema de calcul propusă de Anand și Kothari, care urmează a fi implementat ca în programul de element finit ABAQUS, sub forma de subrutină constitutivă, în vederea simulării curgerii plastice a cristalelor. Pentru a evita posibile variații în rezultate, datorate distribuției spațiale a cristalelor, ca schema de omogeneizare se va folosi ipoteza lui Taylor. După implementare, vor fi parcurse următoarele etape:

1) Folosind textura inițială a materialului precum și o curbă de tracțiune obținută experimental, se identifică parametrii interni ai cristalelor constitutive (în modelul de față, parametrii curbei de ecrusare a unui cristal): epruveta virtuală este supusă la aceeași deformare ca și în experimentul de determinare a curbei de ecrusare și parametrii se ajustează iterativ până când predicția numerică coincide, în marja de eroare, cu măsurătorile experimentale;

2) După ce parametrii cristalelor constitutive au fost identificați, se poate trece la generarea de suprafețe de plasticitate, curbe de ecrusare, sau studiu de evoluție a texturii. De exemplu, pentru generarea unui punct pe suprafața inițială de plasticitate, epruveta virtuală este supusă la un program de încărcare ce duce materialul în direcția de tensiune dorită. În particular, teste mecanice ce implică compresiunea tablei în planul acesteia sunt acum numeric posibile.

Ca validare preliminară, programul va fi testat și ilustrat pe materialul DC04.

2.6. Model de deteriorare anizotrop

Au fost elaborate modele care descriu deteriorarea mecanică cu ajutorul unor variabile tensoriale care descriu efectul neomogenităților structurale și al texturii materialului. Abordarea este caracterizată prin admiterea unei descompunerii multiplicative a gradientului deformației, descompunere în care unul dintre factori descrie efectul deteriorării materialului în raport cu o configurație fictivă lipsită de defecte. De asemenea, a fost efectuat un studiu al comportării materialelor elasto-plastice în prezența unor defecte de tip dislocații continue distribuite.

2.7. Model fenomenologic al efectului Portevin–Le Chatelier pentru table de aluminiu

Au fost investigate două modele fenomenologice ale propagării instabilităților termo-mecanice în materiale metalice: primul model, bazat pe fenomenul de scădere a limitei de

curgere în raport cu deformația, iar al doilea, bazat pe fenomenul de diminuare a limitei de curgere în raport cu viteza de deformare. Activitatea desfășurată în cadrul contractului până în prezent s-a bazat pe prima direcție de cercetare. Pornind de la modelul termo-viscoelastic de tip Maxwellian cu diminuare a limitei de curgere, s-a construit un model termo-viscoplastic de tip „overstress”. Modelul descrie localizări ale deformației și fenomene de instabilitate termomecanică. De asemenea, au fost analizate undele progresive pe care aceste modele le generează, precum și proprietățile lor. Modelul considerat nu satisface una din cerințele efectului PLC și anume sensibilitatea negativă a tensiunii de curgere la creșterea vitezei de deformare. Incluziunea acestui aspect într-un model fenomenologic va fi obiectul cercetărilor viitoare.

Obiectivul 3: Implementarea modelelor elaborate în programe de calcul

3.1. Elaborarea unui algoritm și a unui program pentru predicția CLD

Plecând de la formularea clasică a modelului Marciniak-Kuczynski (MK), a fost elaborată o schemă de calcul de tip implicit care determină starea limită prin rezolvarea numerică a unei singure ecuații de tip neliniar. Reducerea problemei la o singură ecuație simplifică procedura de rezolvare și elimină dificultățile legate de divergențe numerice. De asemenea, schema de calcul implicit este necondiționat stabilă, implementarea sa fiind adaptabilă celor mai diverse expresii ale tensiunii echivalente și legii de ecrusare. În structura sa actuală, programul operează cu următoarele modele constitutive: expresii ale tensiunii echivalente de tip von Mises, Hill 1948, Hosford-Logan, Barlat 1989, BBC 2005, BBC 2008; legi de ecrusare de tip Hollomon, Swift, Voce, Hockett-Sherby, Ghosh, medie a legilor Ghosh și Hockett-Sherby. Performanțele programului au fost testate prin compararea predicțiilor sale cu deformații limită determinate experimental pentru tabla DC04 (0,85 mm), respectiv AA6016-T4 (1 mm). Verificările au evidențiat faptul că, pe ansamblu, performanțele modelului sunt bune. Pentru ambele materiale, rezultatele numerice se află în apropierea datelor experimentale. În cazul tablei DC04, a fost constatată o subevaluare a deformabilității pe ramura din stânga a curbei limită. Această discrepanță este datorată dependenței modelului de modelul de ecrusare folosit în calcule.

3.2. Elaborarea unor metode de calcul numeric paralel

Au fost propuse patru variante ale unei metode multigrad pentru rezolvarea inegalităților quasi-variabile compuse dintr-un termen provenind din minimizarea unei funcționale și altul dat de un operator. De asemenea, a fost elaborat un algoritm multigrad

pentru inegalități variaționale ale caror restricții sunt de tipul două-obstacole. Acest algoritm este descris ca o metoda multigrad de tip V-ciclu, iterațiile sale având o complexitate de calcul optimă, dar rezultatele sunt valabile și pentru alte tipuri de iterări, W-cicluri, de exemplu. Rezultatele obținute sunt comparate cu estimările ratelor asimptotice de convergență obținute în literatura pentru problemele de complementaritate.

3.3. Includerea modelelor constitutive ca rutine utilizator în programe EF existente

Majoritatea programelor comerciale destinate analizei cu elemente finite a proceselor de deformare oferă mecanisme de implementare a unor modele constitutive definite de utilizator. Principial, funcționalitatea rutinelor puse la dispoziție de programele comerciale este asemănătoare. În esență, utilizatorului i se transmit valorile curente ale parametrilor de stare asociați momentului de început al unui interval de timp, precum și incrementul tensorului deformație logaritmică asociat acestui interval, așteptându-se ca implementarea modelului său constitutiv să furnizeze ca date de ieșire tensorul tensiune asociat momentului final. Pe principiul de mai sus, s-a procedat la implementarea criteriului de plasticitate BBC 2008 ca rutină VUMAT în versiunea dinamic-explicită a programului ABAQUS. Această implementare urmează a fi testată în următoarele etape ale proiectului, prin simularea numerică a unor procese de ambutisare și compararea rezultatelor cu date experimentale (grosimi ale piesei ambutisate, amplitudinea festoanelor, evoluția forței de presare etc.).

Obiectivul 4: Validarea rezultatelor simulării unor procese de deformare

4.1. Determinarea parametrilor geometrici și de proces pentru piese deformate

Pentru validarea modelelor constitutive elaborate în cadrul proiectului, au fost alese două piese cu geometrie realizabilă prin ambutisare. Prima piesă are simetrie axială cu diametrul de 80 mm și înălțime de 60 mm. Ambutisarea acesteia urmează a fi realizată pe un stand de tip Erichsen 142-20. Cea de a doua piesă are forma unei tăvi cu flanșă, având raze de racordare diferite (20, 30, respectiv 120 mm). Această geometrie a fost aleasă în vederea obținerii experimentale a unor stări de deformare neomogene, care să permită investigarea cât mai extinsă a deformabilității materialelor metalice. Piesa de tip tavă va fi utilizată și pentru analiza influenței forțelor de reținere asupra deformabilității. Ambutisarea acesteia se va efectua pe o presă hidraulică de tip Benedetti HPS-100.

Obiectivul 5: Activități de management

5.1. Activități de management: Achiziții

Au fost achiziționate următoarele echipamente necesare pentru desfășurarea cercetărilor prevăzute în cadrul proiectului:

- mașină universală de testare a tablelor metalice tip Erichsen 142-20
- calculatoare de tip PC destinate simulărilor numerice
- instalație de metalizare în vid
- magnetometru cu probă vibrantă
- camere de înaltă rezoluție
- software specializat.