



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**

Raport științific sintetic (2010-2013)

Director de proiect

Prof. Dr. Ing. Dorel BANABIC

Cluj Napoca

Octombrie 2013

1.1. Selectarea și achiziționarea materialelor de testare

În cadrul acestui proiect au fost selectate și achiziționate un oțel DC04 cu grosime de 0.85mm și un aliaj de aluminiu AA6016-T4 cu grosime de 1mm. Ambele materiale sunt frecvent utilizate în industria auto. Din acest motiv, modelele teoretice dezvoltate vor fi validate cu date experimentale pentru aceste sortimente de tablă. Tabelele 1.1 și 1.2 prezintă compoziția chimică a tablei de oțel DC04, respectiv a aliajului de aluminiu AA6016-T4.

Tabelul 1.1 Compoziția chimică a semifabricatelor de tablă DC04 (în %)

Carbon	Mangan	Fosfor	Sulf	Fier
0,08	0,40	max. 0,03	max. 0,03	Restul până la 100

Tabelul 1.2 Compoziția chimică a aliajului de aluminiu AA6016-T4 (în %)

Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Ti	Mn	Zn	Impurități	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 tablelor de oțel și de aluminiu 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 materialelor: coeficientul de anizotropie r , limita de curgere $R_{p0,2}$, limita la rupere R_m , exponentul ecruisării din legea Swift n și modulul de ecruisare K dar și a unei caracteristici elastice : modulul Young. Acești parametri au fost măsurați pe epruvete prelevate la 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° respectiv 90° față de direcția laminării tablei (DL).

Tabelul 1.3: Parametrii mecanici ai tablei DC04 cu grosimea de 0,85 mm (valorile prezentate corespund direcțiilor de prelevare a epruvetelor)

	r[-]	$R_{p0,2}$[Mpa]	R_m[MPa]	n[-]	K[MPa]	E[GPa]
0°	1.954	196.241	309.210	0.2093	526.759	170.920
15°	1.705	201.849	313.333	0.2080	528.333	197.660
30°	1.394	208.411	319.750	0.2000	538.010	215.916
45°	1.298	209.416	321.350	0.2028	541.323	190.800
60°	1.415	209.050	317.500	0.1970	530.500	221.410
75°	1.865	208.484	310.333	0.1970	520.000	211.681
90°	2.192	205.648	306.270	0.2014	513.559	186.240

Tabelul 1.4: Parametrii mecanici ai tablei AA6016-T4 cu grosimea de 1 mm (valorile prezentate corespund direcțiilor de prelevare a epruvetelor)

	r[-]	R_{p0,2}[MPa]	R_m[MPa]	n[-]	K[MPa]	E[GPa]
0°	0.5529	158.070	264.809	0.2390	479.714	64.880
15°	0.5404	157.610	265.220	0.2373	478.375	68.070
30°	0.4297	154.760	262.690	0.2379	473.222	67.320
45°	0.4091	152.250	259.840	0.2391	468.545	72.510
60°	0.4291	154.960	261.200	0.2358	469.000	68.650
75°	0.5345	154.190	262.440	0.2408	477.125	71.350
90°	0.5497	154.750	263.320	0.2420	480.222	67.000

În tabelele 1.3 și 1.4 sunt prezentate valorile medii ale parametrilor de material obținuți prin încercarea la tracțiune pentru oțel respectiv aluminiu.

1.2. 1. Determinarea coeficientului de anizotropie biaxial

Pentru determinarea parametrului de anizotropie biaxial au fost efectuate 5 încercări de compresiune folosind epruvete circulare cu diametru de 10mm. Pentru eliminarea frecării a fost folosită folie de teflon de grosime 0.15 mm.

Coeficientul de anizotropie biaxial s-a calculat folosind următoarea formula [Bar03]:

$$r_b = \frac{d\varepsilon_{DT}}{d\varepsilon_{DL}} \quad (1.1)$$

Unde:

$$d\varepsilon = \ln \frac{\text{diam. final}}{\text{diam. initial}} \quad (1.2)$$

indicii *DT* și *DL* reprezintă direcția transversală direcției de laminare respectiv direcția laminării.

Deformarea epruvetelor a fost realizată pe mașina de încercari Zwick-Roell 150kN.

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 oțelul DC04 coeficientul de anizotropie are valoarea 0.918.

Experimentele au fost oprite în momentul în care forța atinsă de mașina a fost de 120kN. Deformația medie pe grosime a epruvetelor de aluminiu este în valoare de -0.654 iar în cazul oțelului este de -0.479.

Datorită faptului că epruvetele nu se deformează strict omogen, suma deformațiilor după cele trei direcții nu este egală cu zero. În cazul ambelor materiale, suma deformațiilor după cele trei direcții are valoarea medie de 0.05.

1.3. Determinarea parametrilor mecanici prin încercarea de umflare hidraulică

Parametrul mecanic determinat este limita de curgere biaxială pentru trei sortimente de tablă. Astfel, a fost determinată limita de curgere pentru cele 2 materiale prezentate în subcapitolele 1.1 și 1.2, dar și a aliajului de aluminiu AA1100-O cu grosime de 1 mm.

Utilizând mașina universală de încercări de tip ERICHSEN împreună cu sistemul optic de măsurare a deformațiilor de tip ARAMIS, s-au determinat curbele tensiune biaxială-deformație biaxială prin încercarea la umflare hidraulică. Curbele astfel obținute au fost combinate cu curbele determinate prin încercarea la tracțiune uniaxială în cadrul activității 1.1, pentru a determina așa-numită limită de curgere biaxială. În acest scop s-a folosit un program de calcul realizat pe baza principiului lucrului mecanic echivalent. Rezultatele acestor determinări sunt prezentate în tabelul 1.5.

Tabelul 1.5. 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

Un alt parametru determinat utilizând procedeul de umflare hidraulică a fost coeficientul de anizotropie biaxială r_b . Acesta a fost obținut ca raport mediu al deformațiilor logaritmice pe direcția transversală și respectiv pe direcția de laminare a tablei. Aceste deformații au fost determinate în prealabil cu sistemul optic ARAMIS prin încercarea la umflare hidraulică.

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 este determinată prin urmărirea distorsiunilor rețelei.

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 deformatate 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%. 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-imprăștiați (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 $\Phi_3=63$).

Recent difracția de electroni retroîmprăștiați (Electron Back Scatter Diffraction-EBSD) s-a dezvoltat ca o tehnică complementară pentru măsurătorile de textură. Această tehnică permite determinarea corelării orientărilor locale fapt deosebit de important în studiul tensiunilor interne la care apare deteriorarea materialului. Tehnica EBSD a fost aplică pentru probe de Aluminiu cu diferite grade de deformare. În urma analizei datelor obținute se poate concluziona ca în urma deformării majoritatea grăunților sunt orientați la unghiuri mici ($< 17^\circ$) față de direcția de laminare cu excepția maculelor care sunt orientate la un unghi de 60° . Maculele reprezintă aproximativ 2,5 % din numărul total al grăunților. Compararea curbei de distribuție determinată din măsurătorile de EBSD cu cea determinată din figurile polare a evidențiat o diferență de aproximativ 8 %. Această diferență poate fi explicată prin faptul că în tehnica EBSD se determină direct orientarea fiecărui grăunte în parte, pe câtă vreme

metoda figurilor polare presupune utilizarea unui model. Astfel, în mare măsură diferențele observate pot fi puse pe seama erorilor de modelare.

1.7. Determinarea microstructurii materialelor testate

Pentru proba nedeformată au fost făcute studii de microscopie optică în lumină polarizată, pentru a vedea orientarea grăunților cristalini. S-a început analiza probelor de aluminiu, unde pentru 20% grad de deformare se observă prezența unui număr mic de goluri, comparabil cu oțelul deformat la același grad. Studiul pe grosime al probelor neatacate poate conduce la determinarea unei distribuții a golurilor în volumul materialului. Analizele pe secțiuni pentru probele de oțel DC04 au fost trimise partenerului P4, atât în secțiune neatacată, cât și atacată, în scopul testării programului de prelucrare automată a imaginilor pentru determinarea formei și distribuției golurilor și pentru determinarea CLD.

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 deformatate. Algoritmul a fost testat cu succes pentru materialele testate (oțel DC04 și Aluminiu AA6116-T4). La o examinare vizuală a rezultatelor s-a constatat că algoritmul reușește să identifice cu succes microgăurile, evitând majoritatea artefactelor. La mărimi puternice (5000, 10000) și în prezența unui zgomot electric marcant, algoritmul identifică artefactele date de șlefuire ca fiind microgăuri. Pentru evitarea acestui lucru algoritmul dezvoltat în cadrul activităților din anul 2011 a fost îmbunătățit folosind abordarea învățării supervizate. Antrenarea se face folosind date etichetate manual de către un expert uman. În cadrul proiectului s-a dezvoltat o interfață grafică ce permite adnotarea manuală a regiunilor candidate. Au fost etichetate un număr de peste 860 de regiuni din 26 de imagini acoperind

toate domeniile de deformare și marire a imaginii. În urma evaluării acurateții clasificatorului s-a constatat o performanță de 97.3%. Programul dezvoltat permite prelucrarea automată cu o mare rată de succes a imaginilor pentru determinarea formei și distribuției golurilor.

1.9 Determinarea experimentală a formei și distribuției golurilor din material

În cadrul acestei activități a fost realizat un studiu prin microscopie electronică de baleiaj (SEM) și microanaliza cu radiații X (EDX) a tablelor din oțel DC04 înainte de deformare. Pentru examinare, probele au fost șlefuite, lustruite și atacate cu reactiv Nital. Observarea microstructurii prin contrast topografic obținut cu ajutorul electronilor secundari permite evidențierea grăunților cristalini.

S-a observat clar existența unei texturi, un indiciu că după laminare probele au fost tratate termic. La mărimi mai mari se poate distinge însă existența a două tipuri de grăunți cristalini: monofazic cu structură feritică și respectiv bifazici (amestec de 2 faze), de tip perlitic.

O analiză chimică, prin metoda EDX, confirmă existența a două tipuri de grăunți cristalini. În timp ce per ansamblu proba conține: 99,32 %Fe, 0,55% Cr și 0,12 %Mn.

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 șapte direcții în planul tablei (la 0, 15, 30, 45, 60, 75 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 corespunzătoare 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). Cu ajutorul acestor date, au fost determinate prin calcul suprafețele de plasticitate prezise de criteriul de plasticitate BBC 2008. Pentru identificarea coeficienților acestui criteriu au fost necesari 16 parametri de material. Utilizând criteriul de plasticitate BBC2008 s-a determinat, de asemenea, variația tensiunii de curgere normalizate precum și variația coeficientului de anizotropie cu unghiul față de direcția de laminare a tablei.

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.

De asemenea, a fost propus un nou mod de determinare a curbelor limita de deformare. Testele s-au facut pentru aliajul de aluminiu AA6016-T4 (1mm), folosind procedeul de umflarea hidraulică cu tabla portanta. În vederea obținerii unor stări de deformare diferite, s-au utilizat epruvete cu o geometrie speciala. Forma lor optimizata a fost obtinuta prin simulare numerica. Deformațiile limită au fost măsurate cu ajutorul unui sistem optic de tip ARAMIS. Rezultatele obtinute au fost comparate cu cele obtinute prin metoda standard.

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

În cadrul prezentului proiect se propune o generalizare a modelului BBC 2005, dezvoltat de echipa centrului CERTETA din cadrul UTCN. Modelul BBC 2005 a fost implementat cu succes în programul de simulare a proceselor de deformare plastică a tablelor AutoForm 4.1 de către firma AUTOFORM din Zurich, Elveția. Prin dezvoltarea noului model propus în cadrul acestui proiect cresc performanțele de predicție a modelului BBC 2005 și

prin aceasta și precizia rezultatelor obținute prin simulare. Noul model este dezvoltat pentru cazul stării plane de tensiuni și va putea descrie comportarea plastică a tablelor cu anizotropie pronunțată.

Suprafața de curgere definită de acest model rezultă din ecuația implicită

$$\Phi(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12} = \sigma_{21}, Y) := \bar{\sigma}(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12} = \sigma_{21}) - Y = 0 \quad (1)$$

unde $\bar{\sigma}(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12} = \sigma_{21}) \geq 0$ este tensiunea echivalentă (vezi mai jos), $Y > 0$ este parametru de curgere, σ_{11}, σ_{22} și $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ sunt componentele planare ale tensorului tensiune exprimate într-un sistem de axe orthonormal suprapus peste sistemul local de axe de orthotropie plastică. Se face presupunerea că a treia direcție a vectorului din sistemul local de axe este întotdeauna normal la suprafața mediană a tablei.

În noul criteriu de plasticitate, tensiunea echivalentă este definită astfel:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\sigma}^{2k}}{w-1} &= \sum_{i=1}^s \left\{ w^{i-1} \left\{ [L^{(i)} + M^{(i)}]^{2k} + [L^{(i)} - M^{(i)}]^{2k} \right\} + w^{s-i} \left\{ [M^{(i)} + N^{(i)}]^{2k} + [M^{(i)} - N^{(i)}]^{2k} \right\} \right\} \\ k, s &\in \mathbf{N}^* \\ w &= (3/2)^{1/s} > 1 \\ L^{(i)} &= \ell_1^{(i)} \sigma_{11} + \ell_2^{(i)} \sigma_{22} \\ M^{(i)} &= \sqrt{[m_1^{(i)} \sigma_{11} - m_2^{(i)} \sigma_{22}]^2 + [m_3^{(i)} (\sigma_{12} + \sigma_{21})]^2} \\ N^{(i)} &= \sqrt{[n_1^{(i)} \sigma_{11} - n_2^{(i)} \sigma_{22}]^2 + [n_3^{(i)} (\sigma_{12} + \sigma_{21})]^2} \\ \ell_1^{(i)}, \ell_2^{(i)}, m_1^{(i)}, m_2^{(i)}, m_3^{(i)}, n_1^{(i)}, n_2^{(i)}, n_3^{(i)} &\in \mathbf{R}. \end{aligned} \quad (2)$$

Mărimile următoare $\ell_1^{(i)}, \ell_2^{(i)}, m_1^{(i)}, m_2^{(i)}, m_3^{(i)}, n_1^{(i)}, n_2^{(i)}, n_3^{(i)}$ ($i = 1, \dots, s$) sunt parametrii de material. Se poate ușor observa că tensiunea echivalentă definită prin relația (2) se reduce la formularea isotropă propusă de Barlat și Richmond [BAR87] dacă

$$\ell_1^{(i)} = \ell_2^{(i)} = m_1^{(i)} = m_2^{(i)} = m_3^{(i)} = n_1^{(i)} = n_2^{(i)} = n_3^{(i)} \quad (i = 1, \dots, s) \quad (3)$$

În aceste circumstanțe, valoarea exponentului întreg k poate fi ales în funcție de structura cristalografică a materialului tablei, ca în criteriul Barlat și Richmond [BAR87]: $k = 3$ pentru materiale cu structură cristalografică Cubică cu Volum Centrat (CVC) și $k = 4$ pentru materiale cu structură cristalografică Cubică cu Fete Centrare (CFC).

În vederea identificării coeficienților criteriului propus, s-a elaborat o procedură numerică robustă BBC 2008. 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

Într-o primă fază au fost identificate metodelor de procesare a imaginilor ce permit identificarea anizotropiei locale precum și a metodelor de segmentare a imaginii prin utilizarea ODF în programe de analiză a texturilor. Aceste metode sunt multirezoluție, iar avantajul utilizării lor constă în faptul că sunt sunt invariante la translații, rotații sau chiar și la scalări a imaginii prelucrate.

Functia ODF a fost determinata utilizand software-ul PANalytical X'Pert Texture. S-au calculat coeficienții pari ai serie armonice realizându-se o regresie a figurilor polare măsurate. Odată obținuți coeficienții pari ai seriei armonice sferice se calculează complet funcția ODF. 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

Astfel, a fost testată capacitatea criteriului de plasticitate fenomenologic BBC 2008 de a surprinde anizotropia determinată prin calcul, folosind modelele cristalografice implementate in VPSC, 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 mai bune decât varianta cu 8 parametrii. Chiar și în varianta utilizării datelor de intrare furnizate de modelul ALAMEL, varianta cu 16 coeficienți a criteriului BBC 2008 funcționează bine, singurele discrepante semnificative apărând în cazul distribuției planare a limitei de curgere la tracțiune uniaxială.

Cuplare directă a modelelor de plasticitate cristalografice (CP), cu formulări de Elemente Finite încă mai are aplicabilitate limitată la procesele macroscopice de formare datorită costurilor sale de calcul prohibitive.

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 că ecruisarea matricii variază în funcție de distanța față 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 înainte de atingerea deformației limită. Plasticitatea a fost descrisă de funcția anizotropă tip Barlat (cu o singură transformare liniară). Modelul Gurson a fost extins pentru a acoperi și materialele cu plasticitate anizotropă bazate pe mai multe transformări liniare. Expresia găsită pentru disipația plastică asociată acestor materiale cu plasticitate complexă nu are o formă analitică explicită, ci este dată de minimizarea unei expresii analitice în raport cu o familie de deformații. Cum însăși metoda Gurson constă în analiza limită aproximativă a unui volum reprezentativ elementar (VRE) sferic sau elipsoidal cu vid confocal prin minimizarea aproximativă a integralei disipatiei plastice pe volumul studiat, cele două minimizări consecutive pot fi aplicate în ordine inversă, ceea ce permite obținerea unei expresii analoage pentru disiparea macroscopică a unui VRE și în final, a unui model de plasticitate de tip Gurson. Modelele de plasticitate anizotropă de tip BBC2005 au fost dezvoltate direct pentru cazul 2D al tensiunilor plane (plăci sau table) fără a proveni dintr-o model de plasticitate 3D explicit. Metodologia Gurson descrisă mai sus se aplică și acestei extinderi 3D particulare a modelului BBC2005.

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

A fost elaborat un algoritm bazat pe schema de calcul propusă de Anand și Kothari, care a fost 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 a fost folosită ipoteza lui Taylor.

Astfel, s-a reușit, dezvoltarea unei metode generale de a deduce într-un mod complet riguros modelul constitutiv la nivel macro asociat unui agregat din constituenți (cristale) satisfăcând un model dat elastic-plastic. În particular, s-a demonstrat că tensorul vitează de deformare plastică este în fapt rezultanta a doua componente: una structurală, datorată evoluției texturii, iar alta esențială, datorată deformării efective (prin alunecare pe planurile cristalografice) a cristalelor; partea esențială este într-o relație bine definită cu suprafața de plasticitate. S-a reușit astfel să se dea, din nou pentru prima dată, o definiție (și o justificare) riguroasă a tensorului de reorientare plastică (plastic spin) la nivel macro.

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 continuu distribuite.

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

A fost studiată modelarea instabilităților termo-mecanice care însoțesc fenomene de localizare a deformației în materiale metalice. Studiul pornește de la fapte experimentale. Este cunoscut faptul că din punct de vedere mecanic efectul Portevin-LeChatelier (PLC) este caracterizat de localizarea spontană a benzilor de deformare în timpul curgerii vâscoplastice a materialului.

Au fost investigate două modele fenomenologice ale propagării instabilităților termo-mecanice în materiale metalice: primul model, bazat pe fenomenul de scăderea 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. În cadrul primei direcții de cercetare s-a pornit de la modelul termo-viscoelastic de tip Maxwellian cu diminuare a limitei de curgere și s-a construit un model termo-viscoplastic de tip „overstress”. A fost considerată și dezvoltată o a doua direcție de cercetare în care fenomenele de instabilitate sunt datorate scăderii tensiunii de curgere la creșterea vitezei de deformare plastică („negative strain-rate sensitivity”). Pentru aceasta a fost considerat un model elasto-vascoplastic cu răspuns instantaneu liniar de tip „ovrestress”. În acest caz tensiunea de curgere este descrisă de două funcții, una care

descrie ecruisarea materialului si este de tip Voce-ansatz și o a doua care descrie fenomenul de "îmbătrânire dinamică" și este datorată lui Cottrell si Bilby. Menționăm că acest tip de analiză nu a mai fost efectuat pentru un astfel de model. O schemă numerică a fost dezvoltată pentru rezolvarea problemelor inițiale și la limita pentru sistemul de ecuații cu derivate parțiale în cazul în care este controlată viteza de deformare a epruvetei. Aceasta a permis punerea în evidență a unor curbe tensiune-deformatie de tip "sawtooth" asemănătoare celor obținute în experimente de laborator efectuate asupra materialelor care prezintă efectul PLC.

Obiectivul 3: Implementarea modelelor elaborate în programe de calcul

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

Plecând de la versiunea standard 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 ecruisare. 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 ecruisare 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 ecruisare folosit în calcule. Modelul a fost testat în vederea studierii parametrilor de convergență și a stabilității modelului Marciniak-Kuczynski (M-K) destinat determinării deformațiilor limită ale tablelor. Verificările au vizat evaluarea performanțelor numerice ale implementării modelului M-K pentru diverse combinații între expresii ale tensiunii echivalente (von Mises, Hill 1948, Hosford-Logan, Barlat 1989, BBC 2005, BBC 2008) și legi de ecruisare (Hollomon, Swift, Voce, Hockett-Sherby, Ghosh, medie ponderată a legilor Ghosh și Hockett-Sherby). În urma testării, s-a constatat că atât parametrii de convergență, cât și stabilitatea sunt insensibile față de schimbarea expresiei tensiunii

echivalente și a legii de ecrusare. Pentru toate combinațiile care au făcut obiectul verificării, performanțele de ansamblu ale modelului M-K au fost în general foarte bune, neînregistrându-se nici un caz de divergență a schemei de calcul numeric.

3.1. Elaborarea unor metode de calcul numeric paralel

Au fost propuse patru variante ale unei metode multigrid pentru rezolvarea inegalităților quasi-variationale compuse dintr-un termen provenind din minimizarea unei funcționale și altul dat de un operator. De asemenea, a fost elaborat un algoritm multigrid pentru inegalități variationale ale căror restricții sunt de tipul două-obstacole. Acest algoritm este descris ca o metoda multigrid de tip V-ciclu, iterațiile sale având o complexitate de calcul optimă, dar rezultatele sunt valabile și pentru alte tipuri de iterari, W-cicluri, de exemplu. Rezultatele obținute sunt comparate cu estimările ratelor asimptotice de convergență obținute în literatura pentru problemele de complementaritate. De asemenea, au fost dezvoltate mai multe metode bazate pe algoritmi de corecție pe subspații pentru probleme dintr-un spațiu Banach reflexiv. Se demonstrează că acești algoritmi sunt global convergenți și se dau, făcând anumite ipoteze, estimări ale erorii. În cazul spațiilor de elemente finite, algoritmi introduși devin, în fapt, metode Schwarz de descompunere a domeniilor cu două nivele de discretizare. În acest caz, se arată că ipotezele facute pentru a demonstra rezultatul de convergență generală sunt îndeplinite și, în plus, putem exprima rata de convergență în funcție de parametri de discretizare și cei de suprapunere a domeniilor. În acest fel se demonstrează că metodele introduse sunt foarte eficiente pentru rezolvarea problemelor de plasticitate, având rata de convergență și o complexitate de calcul optimale.

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 Principal, funcționalitatea rutinelor puse la dispoziție de programele comerciale este asemănătoare. În esență, utilizatorului i se transmit valorile curente ale parametrilor de stare asociația 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.).

Includerea modelului constitutiv BBC 2008 in programul ABAQUS a fost raportata in anul 2011. Activitatile din anul 2012 s-au focalizat pe implementarea modelului Gurson modificat, cuplat cu un model 3D de tip BBC 2005. In general, modelele de tip Gurson obtinute direct din analiza limita aproximativa a unui volum reprezentativ prin utilizarea a numai doua campuri de viteze, unul care descrie cresterea cavitatii iar celalalt deviatoric uniform, nu prezic corect comportamentul unui material cu gauri, in special in cazul micilor triaxialitatilor (raport dintre tensiunea medie si cea echivalenta) care se intalnesc in cazul placilor si tablelor. Pentru a imbunatati calitatea predictiilor, este necesar ca anumiti coeficienti din modelul Gurson sa fie determinati prin interpolarea rezultatelor obtinute printr-o analiza numerica precisa a volumului reprezentativ elementar. In acest scop, au fost propuse doua metode numerice noi, prima bazata pe o analiza spectrala a VRE ce foloseste o familie noua de campuri de viteze incompresibile, definite pe intregul volum, ce respecta exact si conditiile la limita. Noutatea consta in extinderea unei familii de campuri de viteze axisimetrice, propuse in literatura, la cazul 3D general. Aceasta extindere este necesara din cauza ca plasticitatea ortotropa nu mai respecta axisimetria, chiar in cazul unor incarcari axisimetrice. A doua metoda consta intr-o analiza limita bazata pe metoda elementului finit si aplicabila unei geometrii arbitrare, analiza ce utilizeaza metoda lagrangeanului augmentat si se reduce la o suita convergenta de iteratii, pentru fiecare iteratie fiind necesara rezolvarea unei probleme globale, de elasticitate cu forte de volum impuse, urmata de o problema locala, ce consta in proiectia pe convexul de plasticitate a unui camp de tensiuni (realizata practic in fiecare punct Gauss). Prima metoda numerica (analiza spectrala a unui volum reprezentativ elementar) a fost implementata intr-un program de sine statator, scris in limbajul C. A doua metoda (analiza limita cu metoda lagrangeanului augmentat) a fost implementata ca script intr-un program comercial de element finit. Implementarea modelelor de tip Gurson nou obtinute ca subrutine utilizator in cadrul unui program comercial de element finit nu este inca complet finalizata. Dificultatea principala este ca aceste modele au o forma analitica ce depinde de valorile proprii a unei transformari liniare a tensorului de tensiune; pentru acest caz derivatele de ordin 1 pot fi usor calculate folosind vectorii proprii asociati, in schimb expresiile pentru derivatele de ordin 2 devin degenerate in cazul in care doi vectori proprii coincid. Pentru a rezolva aceasta dificultate, am dezvoltat o metoda noua si robusta de proiectie pe convexul de plasticitate asociat, fara utilizarea metodei Newton ce implica determinarea analitica a curbii sau a derivatelor de ordin doi. Implementarea acestei metode

noi de proiectie pe convexul de plasticitate este in curs pentru subrutine utilizator si va fi finalizata la sfarsitul lunii martie 2013.

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 a fost realizată pe un stand de tip Erichsen 142-20.

Pentru testarea programelor de simulare cu element finit s-a optat pentru utilizarea unor geometrii simple a piesei (piesă cu simetrie axială de tip cupă cilindrică și pătrată) respectiv piesa umflată hidraulic. Ambutisarea s-a realizat pe un stand de tip Erichsen 142-20. S-a urmărit precizia de predicție a următorilor parametri geometrici: înălțimea festoanelor pieselor ambutisate, distribuția de grosime de-a lungul a trei direcții în planul tablei și a unuia energetic: variația forței de ambutisare. În cazul umflării hidrostatice s-a analizat variația grosimii piesei pe direcție radială precum și variația presiunii în funcție de înălțimea polului piesei.

4.2 Dezvoltarea unui program de măsurare a deformațiilor pieselor complexe

În cadrul acestei activități a fost dezvoltat un sistem de achiziție și reconstrucție 3D bazat pe senzor de stereoviziune. A fost proiectat un algoritm original de reconstrucție 3D care a fost implementat și testat. Au fost dezvoltate două programe, unul pentru cazul depunerii unei rețele stohastice pe piesa de test (prin spray-erea unei vopsele negre) iar al doilea pentru cazul depunerii prin electroeroziune pe piesa de test a unei rețele de pătrate. Testele au fost efectuate pe piese întinse pe poanson (de tip Nakajima), utilizate pentru determinarea Curbelor Limita de Deformare. Rezultatele testelor au fost foarte bune, ceea ce permite utilizarea sistemului conceput pentru determinarea distribuției deformațiilor pe piese de formă complexă ambutisate.

4.3 Validarea programului de simulare pentru cazul tracțiunii uniaxiale.

Obiectivul acestei etape a constat în testarea preliminară a implementării criteriului de plasticitate BBC2008 ca rutină VUMAT în versiunea dinamic-explicită a programului

ABAQUS. Verificările s-au limitat la simularea unei încercări la tracțiune uniaxială pe două sortimente de tablă: oțel carbon de calitate DC04 cu grosimea nominală de 0,85 mm, respectiv aliaj pe bază de aluminiu AA6016-T4 cu grosimea nominală de 1 mm. În ambele cazuri, identificarea criteriului de plasticitate BBC2008 s-a realizat cu date experimentale determinate în cadrul altor activități din prezentul proiect, activități desfășurate de membrii laboratorului CERTETA. Pentru testarea rutinei VUMAT s-a procedat la compararea curbelor care definesc evoluția forței de tracțiune în funcție de cursa fâlcii mobile a mașinii de încercări. În general, s-a constatat o bună concordanță a predicțiilor cu datele experimentale. Acest fapt denotă atât corectitudinea implementării, cât și acuratețea procedurii de determinare a datelor experimentale care au servit la calibrarea modelului BBC 2008 pentru cele două sortimente de tablă analizate. De asemenea, s-au eficientizat performanțe numerice ale rutinei VUMAT care implementează criteriul de plasticitate BBC 2008 în versiunea dinamic-explicită a programului ABAQUS.

4.4 Validarea modelelor de predicție a Curbelor Limită de Deformare (CLD)

Modelele teoretice de predicție a Curbelor Limită de Deformare au fost validate pe un oțel DC04 (grosime de 0.85mm) și pe un aliaj de aluminiu AA6016-T4 (grosime 1mm). Parametrii de material utilizați în vederea predicției curbei limită de deformare au fost cei determinați experimental în cadrul activitatilor din anii precedenți. Modele constitutive (suprafețele de curgere și curbele de ecrusare) au fost implementate în modelul teoretic dezvoltat în cadrul Activității 3.1. Curbele limită de deformare prezise de către noul model au fost comparate cu datele experimentale date determinate în cadrul activității: Determinarea experimentală a Curbelor Limita de Deformare (CLD). Datele prezise de model sunt în bună concordanță cu datele experimentale.

4.5 Validarea modelului de calcul al CLD pentru materiale care prezintă efect PLC

A fost determinată Curba Limiă de Deformare pentru aliajul de aluminiu AA5182-T4 care prezintă efect PLC la solicitarea de tracțiune uniaxială. Curbele de tracțiune uniaxială prezintă efectul de „dinți de fierăstrău” care face ca modelele de predicție a CLD să fie foarte greu de rezolvat numeric, apărând problema instabilității numerice a soluțiilor ecuațiilor modelului.

4.6 Validarea rezultatelor simulării procesului de umflare hidraulică și de ambutisare

S-a urmărit să se aprofundeze testele referitoare la acuratețea și stabilitatea numerică a implementării criteriului de plasticitate BBC 2008 ca rutină VUMAT în versiunea dinamic-explicită a programului ABAQUS. Verificările s-au concentrat asupra a două tipuri de procese de deformare plastică: umflare hidraulică, respectiv ambutisare cilindrică a unei piese fără flanșă. Alegerea acestor procese are drept justificare posibilitatea realizării lor experimentale pe sistemul Erichsen aflat în dotarea laboratorului CERTETA. Testele au vizat parametrii calitativi ai predicțiilor referitoare la următoarele aspecte:

- evoluția săgeții și a grosimii polare în funcție de presiunea aplicată pe fața inferioară a epruvetei supuse umflării hidraulice;
- evoluția forței de presare în funcție de cursa poansonului și distribuția circumferențială a înălțimii peretelui, în cazul pieselor ambutisate;
- distribuția de grosime a pieselor ambutisate de-a lungul a trei direcții din planul tablei.

Ca elemente de comparație au fost utilizate datele experimentale obținute pentru două sortimente de tablă: oțel carbon de calitate DC04 cu grosimea nominală de 0,85 mm, respectiv aliaj pe bază de aluminiu AA6016-T4 cu grosimea nominală de 1 mm. În general, testarea a evidențiat o bună concordanță a predicțiilor cu valorile măsurate experimental. Singura excepție a fost reprezentată de evoluția forței de ambutisare. În cazul acesteia, predicțiile modelului BBC 2008 au subestimat valorile experimentale. Membrii echipei de cercetare consideră că discrepanțele pot avea două explicații: cunoașterea insuficientă a parametrilor care definesc interacțiunile de frecare pe suprafețele de contact cu sculele, respectiv efectul parazit al rezistențelor hidraulice din sistemul Erichsen care au determinat o creștere artificială a forțelor măsurate.

Tot în cadrul acestei activități a fost realizată o analiză a influenței variabilității proprietăților mecanice a materialului asupra grosimii tablelor supuse umflării hidraulice. Pentru aceasta a fost utilizat modulul SIGMA din cadrul programului cu elemente finite AutoForm.