



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 de activitate pe anul 2012

Director de proiect

Prof. Dr. Ing. Dorel BANABIC

Cluj Napoca

Decembrie 2012

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

1.2 Determinarea parametrilor mecanici prin încercări la tracțiune

În cadrul acestei activități s-a continuat cu determinarea parametrilor mecanici pentru un lot nou de material și anume: tablă din aliaj de aluminiu EN AW-AA6016 – T4 Lot3, cu grosimea de 1.0 mm, precum și pentru tabla din oțel laminat la rece EN 10130 DC04 (0.85 mm). Au fost determinați experimental următorii parametrii mecanici care descriu plasticitatea materialului: coeficientul de anizotropie r , limita de curgere $R_{p0.2}$, limita la rupere R_m , exponentul de ecruisare n , modulul de ecruisare K , și alungirea uniformă A_g . Acești parametrii au fost mășurați pe epruvete prelevate la 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° respectiv 90° față de direcția de laminare a tablei (DL). Pentru materialul DC04, parametrii mecanici sus-menționați au fost determinați doar la 15° , 30° , 60° și 75° față de direcția de laminare a tablei, pentru restul direcțiilor, parametrii mecanici fiind determinați anterior. Pentru realizarea acestei activități s-a folosit mașina universală de încercare la tracțiune-compresiune Zwick Roell Z150 și extensometrul Zwick pentru măsurarea deformațiilor.

1.3. Determinarea parametrilor mecanici prin încercarea de umflare hidraulică

Necesitatea continuării acestei activități este faptul că s-a primit un nou lot de material: aliaj de aluminiu EN AW-AA6016 – T4 Lot3, cu grosimea de 1.0 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-numita tensiune de curgere biaxială. În acest scop s-a folosit un program de calcul realizat pe baza principiului lucrului mecanic echivalent. Un alt parametru determinat în cadrul acestei activități 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.

1.6. Determinarea texturii materialelor testate bazată pe XRD și EBSD

Recent difracția de electroni retroimprăstiați (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. Este de remarcat ca tehnica EBSD este limitata doar pentru probe cu un grad mic de deformare (<50%). Determinarea orientarii fiecărei granule in parte prezinta avantajul ca permite determinarea functiei de distributie (ODF-Orientation Distribution Function) in mod direct, in acest fel fiind eliminate ambiguitatile inerente la determinarea ODF-ului din figurile polare. Din acest motiv tehnica EBSD este complemetara tehnicii de difractie de raze X, ea fiind utilizata in special pentru scalarea rezultatelor obtinute din figurile polare. Un alt avantaj important al acestei metode consta in faptul ca, fiind o masuratoare locala, permite determinarea texturii unui material multifazic. In cadrul acestei faze a fost aplicata tehnica EBSD pentru probe de Aluminiu cu diferite grade de deformare. In urma analizei datelor obtinute se poate concluziona ca in urma deformarii majoritatea graunților sunt orientati la unghiuri mici (< 17°) fata de directia de laminare cu exceptia maclelor care sunt orientate la un unghi de 60°. Maclele reprezinta aproximativ 2,5 % din numarul total al graunților. Compararea curbei de distributie determinata din masuratorile de EBSD cu cea determinata din figurile polare a evidentiat o diferenta de aproximativ 8 %. Aceasta diferenta poate fi explicata prin faptul ca in tehnica EBSD se determina direct orientarea fiecărui graunte in parte, pe cata vreme metoda figurilor polare presupune utilizarea unui model. Astfel, in mare masura diferentele observate pot fi puse pe seama erorilor de modelare.

1.7. Determinarea microstructurii materialelor testate

S-au efectuat analize pentru a realiza o distribuție a golurilor în volumul tablelor deformate plastic. Pentru aceasta s-au studiat tablele pe secțiune – pe direcția de laminare și perpendicular pe aceasta. Probele au fost studiate înainte, cât și după efectuarea unui atac chimic (Nital 10% HNO₃ și 96% C₂H₅OH). Pentru realizarea unei statistici s-au înregistrat imagini succesive pe toată lungimea probei la mărimi de 500x și 2000x. Pentru probele neatacate se constată că pe latura paralelă cu direcția de deformare golurile tind să se alinieze paralel odată cu creșterea gradului de deformație. Pe latura perpendiculară ele nu au o ordine anume. La grade mari de deformare (70 - 90 %) pe probele doar lustruite pare să se evidențieze forma grăunților alungiți; lucru posibil datorită puternicei ecrisări care face ca unii din acești grăunți să fie mai duri și să creeze un contrast topografic datorită faptului că fiind duri au rămas puțin înafara suprafeței șlefuite. Cele mai mari schimbări apar la aprobele atacate unde se poate observa clar faptul că golurile urmează direcția de laminare și se formează în general la limitele de grăunți. Pe latura paralelă cu deformarea se poate observa foarte clar apariția structurii fibroase cu grăunți foarte alungiți, la probele deformate puternic. Pe de altă parte, pe cealaltă latură are loc o micșorare a dimensiunii lor și o

aplatizare a grăunților cristalini, odată cu creșterea gradului de deformare. La grade de deformare mari, 70 %, se constată apariția unor structuri paralele și în secțiune. Apariția acestor linii paralele la acest grad de deformare este probabil legată de depășirea tensiunilor maxime de forfecare suportate de material, caz în care un sistem de alunecare poate fi activat. 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 otel 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.

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 cu succes pentru materialele testate (otel 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

Programul dezvoltat permite prelucrarea automată cu o mare rată de succes (peste 97%) a imaginilor pentru determinarea formei și distribuției golurilor. 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

În această activitate s-a continuat cu determinarea suprafețelor de curgere pentru două sortimente de tablă: aliaj de aluminiu EN AW-AA6016 – T4 Lot3 (1.0 mm) și oțel laminat la rece EN 10130 DC04 (0.85 mm). În acest sens s-a folosit criteriul de plasticitate BBC2008 identificat cu 16 parametrii de material, și anume: coeficienții de anizotropie r și tensiunile de curgere $R_{p0,2}$, obținuți prin încercarea la tracțiune uniaxială a unor epruvete orientate pe 7 direcții diferite față de direcția de laminare (vezi activitatea 1.1), coeficientul de anizotropie biaxială r_b și respectiv tensiunea de curgere biaxială Y_b obținuți prin încercarea la umflare hidraulică (vezi activitatea 1.3). Spre deosebire de activitățile anterioare, în acest caz s-a utilizat un număr sporit de date de intrare în procedura de identificare a coeficienților criteriul de plasticitate BBC2008: 16 parametrii, față de 8 și respectiv 6 parametrii folosiți în activitățile anterioare. 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 aliajul de aluminiu AA6016-T4 (1mm), folosind noul procedeu de umflarea hidraulică cu tabla portanta. În vederea obținerii unor stări de deformare diferite, s-au utilizat epruvete cu o geometrie speciala, obtinuta prin simulare numerica. Deformațiile limită au fost măsurate cu ajutorul unui sistem optic de tip ARAMIS versiunea 6.1.7. Rezultatele obtinute urmeaza sa fie comparate cu cele obtinute prin metoda standard, utilizata in cadrul activitatilor din anul 2011.

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

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

A fost continuata activitatea privind elaborarea unei proceduri de identificare robuste a criteriului de plasticitate BBC 2008 prin dezvoltarea si implementarea unei proceduri care operează cu parametrii de anizotropie asociați unor stări plane de deformație (plane-strain). 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 foarte bine caracteristicile de anizotropie folosite ca date de intrare. In plus fata de acest model, a fost propus un nou model plastic ortotrop pornind de la criteriul isotrop a lui Drucker. Acest nou model se aplica pentru un material elasto-plastic ortotrop, cu deformatii finite, care este capabil sa descrie schimbarea directiilor de ortotropie a materialului si efecte de anisotropie directionala in tensiuni (strength-differential effect) (specific aliajelor de magneziu si a unor aliaje de aluminiu). Noul model propus poate sa descrie experiente cu incarcare si reincarcare, de tip compresiune, tractiune, compresiune sau tractiune, compresiune, tractiune.

2.2 Modele de plasticitate pentru monocristale.

Cele trei elementele constitutive fundamentale ale modelelor curente de descriere a plasticitatii cristalelor sunt urmatoarele: 1) multimea de sisteme de alunecare si formula Taylor corespunzatoare pt viteza de deformare plastica (legea de curgere); 2) criteriul de activare/dezactivare a unui sistem de alunecare; 3) legea de ecruisare a unui sistem de alunecare. S-a studiat in proiectul de fata legatura dintre formula lui Taylor si criteriul de incarcare, aceasta legatura fiind esentiala pt caracteristicile unui model al deformarii plastice la nivel macroscopic (de policristal). In teoria clasica (in care cristalul este modelat ca un mediu rigid-plastic), sistemul de alunecare este activ daca si numai daca este indeplinit criteriul lui Schmid. Acest fapt are drept consecinta o structura geometrica remarcabila: suprafata de activare (sau de incarcare) a cristalului este convexa si directia de curgere plastica este normala la suprafata de activare (in punctul de incarcare). Pe de alta parte, in teoriile moderne asupra plasticitatii cristalelor, cristalul este modelat ca un mediu elastic-plastic. Pana acum nu a existat un studiu al relatiei dintre directia de curgere plastica si suprafata de incarcare in cadrul unui model elastic-plastic. Am reusit in cadrul acestui proiect sa dezvoltam o metoda generala de caracterizare a legaturii dintre directia de curgere plastica si suprafata de activare in cazul modelelor elastic-plastice ale cristalelor. Am putut arata astfel

ca pot exista suprafețe de activare care nu sunt convexe (deși deviația de la convexitate este mică), și ca relația de "normalitate" continuă să fie valabilă și în cazul acestor modele, dacă se adoptă definiții corespunzătoare ale curgerii plastice.

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

Cuplare directă a modelelor de plasticitate cristal (CP), cu formulări de Elemente Finite încă mai are aplicabilitate limitată la procesele macroscopice de formare datorită costurilor sale de calcul prohibitiv. O alternativă convenabilă ar putea fi aproximative ieșirile unui PC printr-o formulă relativ simplă, descriind o proprietate de interes, de exemplu, anizotropie de plastic. În această lucrare vom presupune că anizotropia de plastic dintr-un aliaj policristalin este predominant determinat de textura acestuia cristalografice. Astfel, un model de CP, cum ar fi FC Taylor sau ALAMEL, ar fi în măsură să furnizeze date complete de identificare ale loci randament. Noi folosim acest concept pentru a calibra două formule fundamentale diferite macroscopice care descriu anizotropia de plastic: un plan de stres-curgere criteriul BBC2008 [1] și o fațetă de plastic, în general, se aplică un potențial [2]. Cadrul matematic al BBC2008 este suficient de flexibil pentru a permite parametri 8, 16 sau 32. Pentru a determina acestea, numărul de puncte de date conform este necesar, fiecare constând dintr-un r -valoare în direcția dată de încărcare și uniaxială de stres corespunzătoare. Acest lucru implică dificultăți în achiziționarea de date, deoarece ambele modele considerate CP sunt rata de tulpina condus. Va prezentăm cum să depășească această limitare, prin intermediul unei proceduri de căutare iterativă. În schimb, funcția de Facet potențial poate fi complet determinată prin apeluri directe către rata de tulpina condus coduri CP. Un studiu de caz privind aliaj de aluminiu AA1100 este prezentat. Noi investigăm calitatea aproximării de BBC208 și Facet. Se constată că ambele formule complexe poate captura anizotropă "opt-înspicare" comportamentul materialului testat. Am, de asemenea, să verifice anizotropia de plastic derivat din textura de rezultatele testelor mecanice, oferind instantanee și cumulative r -valori.

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

Modelul de tip Gurson dezvoltat în etapa anterioară pentru un material cu gauri și plasticitate anizotropă de tip Barlat (cu o singură transformare liniară) a fost extins pentru a acoperi și materialele cu plasticitate anizotropă bazate pe mai multe transformări liniare. Principala dificultate în acest demers a fost legată de găsirea unei expresii relativ simple pentru disipatia plastică asociată care să permită aplicarea metodei Gurson. Expresia găsită

pentru disipatia plastica asociata acestor materiale cu plasticitate complexa nu are o forma analitica explicita, ci este data de minimizarea unei expresii analitice in raport cu o familie de deformatii. Cum insasi metoda Gurson consta in analiza limita aproximativa a unui volum reprezentativ elementar (VRE) sferic sau elipsoidal cu vid confocal prin minimizarea aproximativa a integralei disipatiei plastice pe volumul studiat, cele doua minimizari consecutive pot fi aplicate in ordine inversa, ceea ce permite obtinerea unei expresii analoage pentru disiparea macroscopica a unui VRE si in final, a unui model de plasticitate de tip Gurson. Modelele de plasticitate anizotropa de tip BBC2005 au fost dezvoltate direct pentru cazul 2D al tensiunilor plane (placi sau table) fara a proveni dintr-o model de plasticitate 3D explicit. Gasirea unui astfel de model 3D exact si simplu s-a dovedit pana acum infructoasa; in schimb exista o extindere 3D bazata pe doua transformari liniare care se reduce in cazul 2D la un model apropiat de BBC2005 (continand un termen suplimentar). Metodologia Gurson descrisa mai sus se aplica si acestei extinderi 3D particulare a modelului BBC2005.

2.5. Modele policristaline si de evolutie a texturii

Principalul obiectiv al acestui proiect este dezvoltarea de modele ale deformarii plastice a metalelor la nivel macro. Acuratetea acestor modele depinde crucial de gradul in care incorporeaza informatie despre fenomenele ce au loc la nivel micro in timpul curgerii plastice. Prima tentativa in aceasta directie ii apartine lui Taylor, 1938. Ideea lui Taylor a fost preluata de catre Bishop si Hill, 1951, si transformata intr-o metoda riguroasa de analiza a agregatelor de cristale rigid-plastice. In anii 60-70 Hill si Rice initiaza studii in clarificarea caracteristicilor esentiale pe care ar trebui sa le aiba la nivel macro ecuatiile plasticitatii metalelor in cazul general al constituentilor elastic-plastici. Unele dintre analizele lor sunt bazate pe aproximari ce exclud/neglijaza evolutia texturii, iar altele folosesc un formalism destul de neproductiv in ce priveste definitia vitezei de deformare plastica. In cadrul acestei activitati s-a reusit, pentru prima data, dezvoltarea unei metode generale de a deduce intr-un mod complet riguros modelul constitutiv la nivel macro asociat unui agregat din constituinti (cristale) satisfacand un model dat elastic-plastic. In particular, s-a demonstrat ca tensorul viteza de deformare plastica este in fapt rezultanta a doua componente: una structurala, datorata evolutiei texturii, iar alta esentiala, datorata deformarii efective (prin alunecare pe planurile cristalografice) a cristalelor; partea esentiala este intr-o relatie bine definita cu suprafata de plasticitate. S-a reusit astfel sa se dea, din nou pentru prima data, o definitie (si o justificare) riguroasa a tensorului de reorientare plastica (plastic spin) la nivel macro. Aceste rezultate au fost raportate in articolul "About the influence of hydrostatic

pressure upon the yielding and flow of metallic polycrystals" aflat in recenzie la un jurnal Elsevier.

2.6. Model de deteriorare anizotrop

A fost continuata cercetarea prin elaborarea de modele macroscopice pentru materiale elasto-plastice cu defecte la nivelul micro-structurii. Defectele microstructurale, de tipul dislocatiilor si disclinatiilor, sunt descrise matematic prin masuri de incompatibilitate a distorsiunii plastice si a conexiunii plastice. Prezenta incompatibilitatilor mentionate genereaza in cadrul teoriei macroscopice campurile de vectori de tip Burgers si Frank, care se evidentiaza experimental. Diferite aspecte in studiul influentei defectelor rețelei cristaline asupra comportamentului ireversibil al materialelor, au fost puse in discutie in ciclul de lucrari, care au facut si obiectul unor prezentari in Conferinte internationale.

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

A fost considerata si dezvoltata o a doua directie de cercetare in care fenomenele de instabilitate sunt datorate scaderii tensiunii de curgere la cresterea vitezei de deformare plastica ("negative strain-rate sensitivity"). Pentru aceasta a fost considerat un model elasto-vascopic cu raspuns instantaneu liniar de tip "ovrestress". In acest caz tensiunea de curgere este descrisa de doua functii, una care descrie ecrisarea materialului si este de tip Voce-ansatz si o a doua care descrie fenomenul de "imbatranire dinamica" si este datorata lui Cottrell si Bilby. Este introdus ca variabila interna un timp de "imbatranire dinamica" care corespunde timpului de asteptare al unei dislocatii in vecinatatea unui obstacol localizat. Evolutia acestei variabile interne este descrisa de o ecuatie de relaxare care poate caracteriza fenomenul de "negative strain-rate sensitivity". Pentru efectuarea unei analize a fenomenelor de instabilitate si determinarea conditiilor critice care conduc la formarea benzilor de deformatie a fost considerata o stare de tensiune unidimensionala. Au fost obtinute estimari pentru solutia omogena viscoplastica. Stabilitatea acestei solutii omogene a fost analizata prin metoda perturbatiilor lineare. Acest studiu permite identificarea acelor valori ale parametrilor de material si ale vitezei de deformare care conduc la fenomene de instabilitate si de localizare a deformatiei. Mentionam ca acest tip de analiza nu a mai fost efectuat pentru un astfel de model. O schema numerica a fost dezvoltata pentru rezolvarea problemelor initiale si la limita pentru sistemul de ecuatii cu derivate partiale in cazul in care este controlata viteza de deformare a epruvetei. Aceasta a permis punerea in evidenta a unor curbe tensiune-deformatie de tip "sawtooth" asemanatoare celor obtinute in experimente de laborator efectuate asupra materialelor care prezinta efectul PLC. Finalizarea acestei analize teoretice

permite trecerea la abordarea cazului bi-dimensional atat din punct de vedere numeric cat si al validarii lui pentru table din aluminiu..

Obiectivul 3: Implementarea modelelor elaborate în programe de calcul

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

Obiectivul acestei activități a constat în testarea 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 ecruisare. 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.

3.2. Elaborarea unor metode de calcul numeric paralel

În cadrul acestei activități 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 introdusi devin, în fapt, metode Schwarz de descompunere a domeniilor cu două nivele de discretizare. În acest caz, se arată că ipotezele făcute pentru a demonstra rezultatul de convergență generală sunt indeplinite și, în plus, putem exprima rata de convergență în funcție de parametrii 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

Includerea modelului constitutiv BBC 2008 în programul ABAQUS a fost raportată în anul 2011. Activitățile din anul 2012 s-au focalizat pe implementarea modelului Gurson modificat, cuplat cu un model 3D de tip BBC 2005. În general, modelele de tip Gurson obținute direct din analiza limită aproximativă a unui volum reprezentativ prin utilizarea a numai două câmpuri de viteze, unul care descrie creșterea cavității iar celălalt deviatoric

uniform, nu prezic corect comportamentul unui material cu gauri, în special în cazul micilor triaxialitatilor (raport dintre tensiunea medie și cea echivalentă) care se întâlnesc în cazul placilor și tablelor. Pentru a îmbunătăți calitatea predicțiilor, este necesar ca anumiți coeficienți din modelul Gurson să fie determinați prin interpolarea rezultatelor obținute printr-o analiză numerică precisă a volumului reprezentativ elementar. În acest scop, au fost propuse două metode numerice noi, prima bazată pe o analiză spectrală a VRE ce folosește o familie nouă de câmpuri de viteze incompresibile, definite pe întregul volum, ce respectă exact și condițiile la limită. Noutatea constă în extinderea unei familii de câmpuri de viteze axisimetrice, propuse în literatură, la cazul 3D general. Această extindere este necesară din cauza că plasticitatea ortotropă nu mai respectă axisimetria, chiar în cazul unor încărcări axisimetrice. A doua metodă constă într-o analiză limită bazată pe metoda elementului finit și aplicabilă unei geometrii arbitrare, analiză ce utilizează metoda lagrangeanului augmentat și se reduce la o suită convergentă de iterații, pentru fiecare iterație fiind necesară rezolvarea unei probleme globale, de elasticitate cu forțe de volum impuse, urmată de o problemă locală, ce constă în proiectia pe convexul de plasticitate a unui câmp de tensiuni (realizată practic în fiecare punct Gauss). Prima metodă numerică (analiză spectrală a unui volum reprezentativ elementar) a fost implementată într-un program de sine stătător, scris în limbajul C. A doua metodă (analiză limită cu metoda lagrangeanului augmentat) a fost implementată ca script într-un program comercial de element finit. Implementarea modelelor de tip Gurson nou obținute ca subrutine utilizator în cadrul unui program comercial de element finit nu este încă complet finalizată. Dificultatea principală este că aceste modele au o formă analitică ce depinde de valorile proprii a unei transformări liniare a tensorului de tensiune; pentru acest caz derivatele de ordin 1 pot fi ușor calculate folosind vectorii proprii asociați, în schimb expresiile pentru derivatele de ordin 2 devin degenerate în cazul în care doi vectori proprii coincid. Pentru a rezolva această dificultate, am dezvoltat o metodă nouă și robustă de proiectie pe convexul de plasticitate asociat, fără utilizarea metodei Newton ce implică determinarea analitică a curbării sau a derivatelor de ordin doi. Implementarea acestei metode noi de proiectie pe convexul de plasticitate este în curs pentru subrutine utilizator și va fi finalizată la sfârșitul lunii martie 2013.

Obiectivul 4: Validarea rezultatelor simulării unor procese de deformare

4.1. Determinarea parametrilor geometrici și de proces pentru piese deformate

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) cu diametrul de 50 mm și

înălțime de 35 mm respectiv piesa umflata hidraulic. Ambutisarea cilindrica s-a realizat pe un stand de tip Erichsen 142-20. S-a urmarit precizia de predictie a doi parametri geometrici: inaltimea festoanelor piesei cilindrice si variatia grosimii piesei precum si a unuia energetic: variatia fortei de ambutisare. In cazul umflarii hidrostatice s-a analizat variatia grosimii piesei pe directie radiala precum si variatia presiunii in functie de inaltimea polului piesei.

4.2 Dezvoltarea unui program de măsurare a deformațiilor pieselor complexe

In cadrul acestei activitati 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 doua 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 patrate. 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 forma complexa ambutisate.

4.3 Validarea programului de simulare pentru cazul tracțiunii uniaxiale.

Obiectivul acestei etape a constat în testarea preliminară a implementării criteriului de plasticitate BBC 2008 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 BBC 2008 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 fălcii 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.

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 (suprafetele 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 Limita de Deformare pentru aliajul de aluminiu AA5182-T4 care prezintă efect PLC la solicitarea de tracțiune uniaxială. Curbele de tracțiune uniaxială prezintă efectul de „dinti de fierastru” care face ca modelele de predicție a CLD să fie foarte greu de rezolvat numeric, aparind problema instabilității numerice a soluțiilor ecuațiilor modelului. Se vor continua cercetările în următoarea etapă în vederea găsirii unei soluții convenabile pentru predicția CLD pentru acest tip de materiale.

4.6 Validarea rezultatelor simulării procesului de umflare hidraulică și de ambutisare

Această etapă a urmărit să 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 piesei ambutisate.

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.

Obiectivul 5: Activități de management

5.1. Activități de management: Achiziții

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

- Spectrometru FTIR Bruker Tensor 27
- Magnetron
- Etuva
- Microscop metalurgic cu accesorii.