

11 39.972



MINISTERUL EDUCAȚIEI, TINERETULUI ȘI SPORTULUI
UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN GALAȚI
FACULTATEA DE MECANICĂ
DOMENIUL INGINERIE INDUSTRIALĂ



Teză de doctorat-Rezumato

Modelarea multi-scalară a comportării mecanice a nichelului cu aplicații în microdeformare plastică

Autor ing. Mitiță Afteni

Conducători științifici

Prof. dr. ing. Mihaela Banu
Habraken

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Prof. dr. ing. Anne Marie

Universite de Liege, Belgia

Lucrare finanțată în cadrul proiectului POSDRU SIMBAD 6853-6/1.5/S/1/ 2008.

Galați, 2011



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL EDUCAȚIEI, TINERETULUI ȘI
SPORTULUI



Fondul Social European
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



EDUCATIE



UNIVERSITATEA
DUNAREA DE JOS
DIN GALATI

7 39.942

ROMANIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI
UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN GALAȚI

Strada Domnească nr. 47, cod poștal 800008
Galați, România
E-mail: rectorat@ugal.ro



Tel.: (+4) 0336-130.109; 0336-130.108; 336-130.104
Fax: (+4) 0236 - 461.353
www.ugal.ro

C13081/12-12-2011

Către

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați vă face cunoscut că în data de 20.12.2011, ora 12.00, în sala D12 a Facultății de Mecanică, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: "MODELAREA MULTI-SCALARĂ A COMPORTĂRII MECANICE A NICHELULUI, CU APLICAȚII ÎN MICRO-DEFORMARE PLASTICĂ", elaborată de domnul/doamna ing. AFTENI MITICĂ, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - Inginerie industrială.

Comisia de doctorat are urmatoarea componență :

- Președinte:** Prof.univ.dr.ing. Cătălin FETECĂU
Decan - Facultatea de Mecanică
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
- Conducător de doctorat:** Prof.univ.dr.ing. Mihaela BANU
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
- Referent 1:** Prof.univ.dr. Anne-Marie HABRAKEN
Universite de Liege, Belgia
- Referent 2:** Prof.univ.dr.ing. Dumitru NEDELICU
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași
- Referent 3:** Prof.univ.dr.ing. Viorel PĂUNOIU
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
- Referent 4:** Prof.univ.dr.ing. Cătălina MAIER
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați



Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.



SECRETAR DOCTORAT,

Ing. Luiza AXINTE

AXINT

Mușumiri

Finalizarea cercetărilor numerice și experimentale efectuate în cadrul acestei lucrări, îmi oferă posibilitatea de a adresa câteva cuvinte de mulțumire celor care m-au ajutat pe parcursul celor trei ani de studiu.

Primele mulțumiri sunt adresate conducătorului științific al lucrării, Prof. dr. ing. Mihaela Banu, care pe tot parcursul studiilor a avut grijă să îmi acorde încredere și sfaturi care în final s-au concretizat în conturarea acestei lucrări.

Sincere mulțumiri adresez și colaboratorilor din cadrul Departamentului ARGENCO, Universitatea din Liege, Dr. ing. Anne Marie Habraken, Research Director, Dr. ing. Laurent Duchene, Dr. ing. Clement Keller și tuturor membrilor care alcătuiesc echipele de cercetare din cadrul acestui departament pentru sfaturile acordate pe parcursul stagiilor de cercetare desfășurate.

Sincere mulțumiri adresez Domnului Prof. dr. ing. Viorel Paunoiu pentru ajutorul acordat pe parcursul derulării campaniei de teste experimentale realizată în cadrul „Laboratorului de Tehnologia Presării la Rece”, Facultatea de Mecanică, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați. Adresez mulțumiri domnilor profesori: Cătălina Maier, Vasile Marinescu, Dumitru Nicoară, Alexandru Epureanu, Nicolae Oancea, Valentin Tâbîțaru, Oviudiu Ciocan, pentru sfaturile acordate.

Adresez mulțumiri domnilor ingineri: Eni Cristian, Gălbînband SA Galați, Danuț Potop, Costianu Danuț, Arcelor Mitall, Galați, personalului firmei Alfa Ceres, Galați și Florin Susac, DMTH Galați.

Adresez mulțumiri și domnilor prof. dr. ing. Gheorghe Brabie și drd. ing. Eugen Hergheliegu, Universitatea „Vasile Alecsandri” din Bacău, pentru sprijinul și timpul acordat în vederea decupării unei părți din semifabricatele utilizate pentru testele experimentale.

Sincere mulțumiri conducerii și tuturor cadrelor didactice din cadrul Facultății de Mecanică.

Mulțumesc domnului șef de lucrări Constantin Ionuț pentru colaborarea și ajutorul acordat pe parcursul studiului și domnului șef de lucrări Virgil Teodor.

Mulțumesc în mod deosebit colegelor de birou, drd. ing. Olgața Marinescu și drd. chim. Simona Patriche pentru sprijinul și ajutorul acordat.

Mulțumesc membrilor din conducerea proiectului POSDRU-SIMBAD 6853/2008, pentru sprijinul financiar acordat în vederea finalizării acestui studiu.

Mulțumesc părinților și fraților mei pentru faptul că m-au sprijinit și m-au îndrumat în fiecare moment.

Drd. ing. Mitică Afteni

Mulțumiri	i
Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind microdeformarea plastică	1
1.1. Procedee de deformare plastică abordate la scară micro	1
1.1.1. Microdeformarea volumică	2
1.1.2. Microdeformarea semifabricatelor sub formă de table	2
1.2. Aspecte privind factorii care influențează procesele de microambutisare	2
1.2.1. Factori ce depind de materialul prelucrat	2
1.2.2. Factori ce depind de tipul echipamentului utilizat	3
1.3. Caracterizarea multiscalarității proceselor de deformare plastică a tablelor subțiri	3
1.4. Modelarea numerică a proceselor de microdeformare plastică la rece	3
1.5. Concluziile stadiului actual al cercetărilor realizate în domeniul microdeformării tablelor subțiri	4
Direcții de cercetare	4
Capitolul 2. Cercetări privind modelul de plasticitate cristalină aplicat monocristalelor de nichel	5
2.1. Descrierea matematică a modelului plasticității cristaline	5
2.2. Identificarea valorii coeficientului de sensibilitate al vitezei de deformare prin metoda reordonării deformațiilor	8
2.3. Concluzii privind modelarea comportării mecanice a monocristalelor de nichel utilizând modelul plasticității cristaline	9
Capitolul 3. Cercetări privind modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalelor din nichel având orientări cristalografice diferite	10
3.1. Modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [001]	10
3.1.1. Construcția modelului	10
3.1.2. Rezultatele modelării	11
3.2. Modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [111]	11
3.2.1. Construcția modelului	11
3.2.2. Rezultatele modelării	12
3.3. Modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [-3, 34, -14]	13
3.3.1. Construcția modelului	13
3.4. Construcția modelului și conceperea unui program în Matlab pentru reprezentarea hârtilor de evoluția densităților de dislocații-pentru monocristalului orientat după direcția cristalografică [001]	13
3.4.1. Rezultatele modelării utilizând programul conceput	14
3.5. Concluzii privind modelarea comportamentului mecanic al monocristalelor de nichel	15
Capitolul 4. Modelarea numerică a testelor de tracțiune biaxială	15
4.1. Modelarea comportării mecanice a policristalelor de nichel cu un singur grăunte cristalin în grosime	16
4.1.1. Geometria policristalului de nichel având un singur grăunte cristalin pe grosime	16
4.2. Validarea modelului numeric	16

4.3. Concluziile studiului privind modelarea numerică a testelor de tracțiune biaxială	18
Capitolul 5. Cercetări experimentale privind procesul de ambutisare a tablelor subțiri din oțel și nichel	18
5.1. Rezultate experimentale privind ambutisarea convențională a tablelor din oțel	19
5.1.1. Variația forței de ambutisare în funcție de raza de racordare a plăcii active	19
5.2. Cercetări experimentale privind ambutisarea convențională a tablelor din nichel(99,999%)	20
5.2.1. Cercetări experimentale privind influența tratamentului termic aplicat tablelor din nichel (99,999%) asupra forței de ambutisare	20
5.2.2. Cercetări experimentale privind influența geometriei și dimensiunilor elementelor active asupra forței de ambutisare	22
5.2.2.1. Analiza influenței valorii razei de racordare a matriței asupra forței de ambutisare	22
5.2.2.2. Analiza influenței geometriei poansonului asupra forței de ambutisare a tablelor din nichel	25
5.3. Concluzii privind ambutisarea convențională a tablelor de nichel (99,999%) și oțel	25
Capitolul 6. Cercetări experimentale privind procesul de microambutisare a tablelor subțiri din nichel (99,999%)	26
6.1. Cercetări experimentale privind efectul geometriei poansonului asupra forței de microambutisare	26
6.2. Concluzii privind analiza experimentală a proceselor de microambutisare	30
Capitolul 7. Contribuții privind modelarea proceselor de ambutisare și microambutisare	30
7.1. Cercetări privind stabilirea tipului optim de elemente finite utilizate în modelarea proceselor de ambutisare	31
7.1.1. Rezultate ale modelării - determinarea zonei de apariție a găturii materialului	31
7.2. Conceperea unui model de tip „compozit” utilizat în modelarea proceselor de ambutisare	33
7.2.1. Modelarea procesului de ambutisare sferică prin utilizarea modelului “simplu”	34
7.2.2. Modelarea procesului de ambutisare sferică prin utilizarea modelului de tip “compozit”	35
7.2.3. Rezultate privind modelarea procesului de ambutisare sferică a tablelor subțiri din nichel având diferite grosimi	35
7.2.4. Determinarea distribuției tensiunilor echivalente Von Mises în secțiunea pieselor având grosimi submilimetrice	36
7.3. Contribuții privind modelarea multi-scalară a proceselor de ambutisare	40
7.3.1. Cercetări asupra modelării influenței geometriei și dimensiunilor elementelor active asupra forțelor de ambutisare	40
7.3.2. Contribuții privind analiza prin modelare	

cu element finit a proceselor de microambutisare	42
7.3.2.1. Modelarea influenței geometriei și dimensiunilor elementelor active asupra forței de microambutisare	42
7.4. Validarea modelului „compozit” pe baza rezultatelor experimentale	44
7.4.1. Validarea modelului „compozit” pentru procese de ambutisare convențională a tablelor din nichel	44
7.5. Concluzii privind modelarea comportamentului mecanic al tablelor subțiri din nichel supuse proceselor de ambutisare	46
Capitolul 8. Concluzii și contribuții aduse în domeniu	47
Bibliografie selectivă	49

Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind microdeformarea plastică

În cadrul acestui capitol au fost analizate rezultatele cercetărilor privind modelarea microambutisării tablelor subțiri, și în special, a celor din metale cu aplicabilitate în medicina prezentate în jurnalele de specialitate cu factor de impact mare. S-au identificat obiectivele tezei de doctorat, și anume: conceperea unui model redus de plasticitate cristalină de deformare a monocristalelor aplicat la încercările de tracțiune, extinderea modelului de plasticitate cristalină în cazul policristalelor prin aplicarea testelor de tracțiune biaxială, validarea modelului redus de plasticitate cristalină pentru policristale, analiza experimentală a procesului de ambutisare și microambutisare a tablelor subțiri de nichel, validarea experimentală a modelului de tip "compozit" și aplicarea modelelor de tip "compozit" pentru caracterizarea răspunsului mecanic al materialelor metalice pure și extinderea aplicării acestor modele în cazul altor materiale cu o puritate redusă. vedere științific în tendințele existente în domeniul studierii proceselor de microdeformare plastică.

Dezvoltarea rapidă a tehnologiilor din ultimii ani a condus la o aplicabilitate ridicată a proceselor de microdeformare plastică în industria chimică, în industria aerospațială, biologie și medicină [Shen Yu, 2006], [Adams, 2007] astfel încât produsele obținute pot fi clasificate după cum urmează:

- echipamente medicale (aparatură cardiovasculară și in-vitro, implanturi medicale),
- tehnologia senzorilor,
- componente optoelectronice (componente pentru fibre optice),
- electronică (pini conectori utilizați la CD playere, MP3 playere, unități de IC și micro procesoare),
- diferite microdispozitive mecanice (șuruburi, arcuri) pentru robotică etc.

Microambutisarea este un proces de deformare plastică la rece a tablelor metalice subțiri prin care semifabricatul plan este transformat într-o piesă cavă de dimensiuni foarte mici [Engel, 2000], [Kals, 1998]. În general, se poate spune că un proces de ambutisare este în domeniul microambutisării dacă două dintre dimensiunile piesei rezultate sunt micrometrice. Exemple tipice de piese obținute în urma aplicării asupra materialelor metalice a unor procedee de deformare plastică, respectiv de microdeformare plastică sunt: șuruburi micrometrice, capacele unor led-uri, arcuri micrometrice precum și orice element de conexiune din electronica.

1.1. Procedee de deformare plastică abordate la scară micro

1.1.1. Microdeformarea volumică

Piese obținute în urma acestor procedee realizate la scara micrometrică sunt sub forma unor cilindri având diametre mai mici de 10 micrometri. Singura problemă care apare în cazul acestor procedee este aceea a manipulării pieselor între operații într-un timp foarte scurt respectând precizia cerută în desenul de execuție. În plus, mărimea graunților cristalini [Chan, 2011] este un factor determinant în obținerea pieselor de precizie. Astfel, la microdeformare se folosesc materiale nanostructurate, la care mărimea graunților este mult mai mică decât în structura inițială, ajungând până la 50μm față de 100-150 μm în stare inițială.



Figura 1.1. Piese cilindrice obținute prin microextrudare a) grăunți normali, b) grăunți ultrafini [Rosoehowski, 2007]

1.1.2. Microdeformarea semifabricatelor sub formă de table

Microdeformarea plastică a foilor de tablă a fost investigată din punct de vedere al proceselor de îndoire pneumatică, îndoire cu laser, microambutisare convențională sau cu laser. Grosimea foilor de tablă este mai mică de 0.1mm.

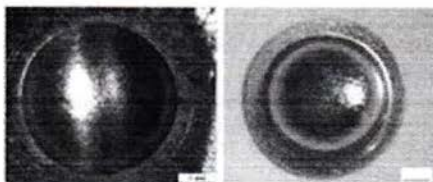


Figura 1.2. Piese obținute prin micro ambutisarea cu laser [Wielage, 2008]

1.2. Aspecte privind factorii care influențează procesele de microambutisare

În urma cercetărilor efectuate au fost găsiți o serie de factori care influențează procesele de deformare plastică atât în cazul microproceselor [Eichenhuller, 2008], [Eichenhuller, ICOMM] cât și în cazul proceselor efectuate la dimensiuni convenționale.

Factorii de influență pot fi clasificați în următoarele categorii: factori ce depind de materialul prelucrat, factori ce depind de tipul echipamentului utilizat și factori ce depind de procesul analizat.

Tratarea acestor categorii de factori de diferiți cercetători și influența acestora asupra rezultatelor ambutisării sunt prezentate în cele ce urmează.

1.2.1. Factori ce depind de materialul prelucrat

Caracteristicile microstructurale ale materialelor metalice, cum ar fi mărimea grăunților cristalini [Fung-Huei Yeh, 2008], limitele de grăunte și densitățile de dislocații [Cotterel, 1961] au o influență deosebită asupra rezultatelor obținute în urma aplicării procedurilor de deformare plastică cum ar fi ambutisarea în cazul materialelor sub formă de table și extrudarea în cazul deformărilor volumice.

1.2.2. Factori ce depind de tipul echipamentului utilizat

În general, pentru realizarea matritelor utilizate în procesele de deformare plastică se folosesc materiale metalice respectiv oțeluri de scule [Adrian, 1983] sau materiale speciale ce prezintă o rezistență la uzură ridicată [Teodorescu, 1983].

Echipamentele tehnologice de dimensiuni mici utilizate în procesele de microdeformare plastică pot fi construite din elemente ce pot fi utilizate pentru aplicații multiple dar și din elemente ce sunt specifice doar proceselor de microdeformare [Yi Qin, 2006].

1.3. Caracterizarea multiscalarității proceselor de deformare plastică a tablelor subțiri

Prin abordarea multiscalară a proceselor de deformare plastică a tablelor subțiri se face legătura între modificările de la nivel microstructural [Manabe, 2004] și implicațiile acestora asupra comportării globale a materialului în timpul unui macroproces de deformare [Mahabunphachai, 2008]. Studiul proceselor de deformare plastică a materialelor metalice implică atât caracterizarea la nivel macro a semifabricatului, cât și caracterizarea la nivel micro a materialelor metalice. Este cunoscut faptul că o influență deosebită asupra capacității de deformare a materialelor metalice o au sursele de dislocații, dimensiunile grăunților precum și tratamentele termice aplicate materialului înaintea procesului de deformare plastică.

În ultimii ani s-a observat și o creștere a atenției acordate în ceea ce privește tehnicile din modelare multiscalară a proceselor de deformare plastică [Huang, 2011]. Modelarea numerică multiscalară a proceselor de deformare plastică [Zbib, 2002], [Peng, 2010], precum procesele de ambutisare are drept scop predicția comportării întregului sistem implicat în procesul de deformare. Analizând din punct de vedere experimental procesele de deformare plastică se înregistrează de asemenea o creștere a interesului în ceea ce privește reducerea dimensionalității, reducere aplicată atât pieselor finale obținute cât și echipamentelor de lucru.

1.4. Modelarea numerică a proceselor de microdeformare plastică la rece

Creșterea cererii pentru produse având dimensiuni din ce în ce mai reduse dar care sunt capabile să realizeze funcții complexe a condus către abordarea proceselor de deformare plastică la nivel multiscalar. Efectele microstructurale declanșate de efectele gradientilor deformațiilor [Li, 1996], [Vliet, 1999], [Lee, 2005], macroscopice sunt efecte ce apar concomitent și care pot fi analizate împreună cu efectele straturilor aflate în vecinătatea zonelor libere ale tablelor deformate, numite în continuare straturi de suprafață.

Teoriile clasice ale mecanicii mediului continuu dau posibilitatea explicării fenomenelor macroscopice implicate de aplicarea unei stări de tensiune asupra unui material. Aplicarea acestor teorii în vederea prezicerii comportării mecanice a materialelor metalice la micro sau nano-scalară nu este posibilă datorită efectelor microstructurale și ale influenței diminuării dimensiunilor semifabricatelor, care sunt, în acest moment, explicate numai prin metode discrete utilizând modele matematice bazate pe statistică.

Din punct de vedere experimental, la scăderea dimensiunilor semifabricatului, efectul cel mai studiat este ecruisarea deoarece, în cele mai multe studii, s-a observat o durificare suplimentară a semifabricatelor supuse proceselor de deformare. Aceste studii au fost realizate pe epruvete de tracțiune supuse solicitărilor mecanice, dar nu pe semifabricate din care se prelucrează piese ambutisate. În acest punct, este identificată o direcție de cercetare, și anume

dezvoltarea unor cercetări experimentale care să pună în evidență efectul diminuării semifabricatelor pe procese reale de microambutisare.

Mai mult, cercetările existente nu consideră ansamblul unor factori ce caracterizează comportarea materialului din punct de vedere micro și macro, cum ar fi: mărimea și orientarea grăunților cristalini [Mika,1998], istoria deformațiilor, densitățile de dislocații precum și orientările rețelei cristaline. Odată cu dezvoltarea echipamentelor de investigare la nivel nanometric (Transmission Electronic Microscopy, High Resolution Transmission Microscopy) precum și a evoluției modelelor de plasticitate cristalină [Ma, 2004], [Louchet, 2000], a devenit posibilă descrierea cu mai mare precizie a fenomenelor microstructurale și cuplarea acestora cu macroscala pentru o caracterizare globală a rezultatelor micro- și macro- proceselor.

Au fost propuse o serie de modele numerice cu ajutorul cărora se poate face predicția influenței fiecărui factor asupra comportării materialelor metalice microdeformate plastic.

1.5. Concluziile stadiului actual al cercetărilor realizate în domeniul microdeformării tablelor subțiri

1. Procesele de microdeformare plastică pot fi împărțite în trei clase principale :

- microdeformarea volumică incluzând și procesele de microexturdare a metalelor;
- microdeformarea semifabricatelor sub formă de foi;
- microambutisarea tablelor metalice.

2. Rezultatele unui proces de microambutisare depind de natura materialului deformat, de echipamentele folosite și de sculele utilizate.

3. Calitatea pieselor obținute în urma unui proces de microambutisare depinde de microstructura materialului deformat dar și de rugozitatea poansonului respectiv a plăcii active cu ajutorul cărora se realizează deformarea.

4. O influență deosebită asupra rezultatelor proceselor de micro-ambutisare dar și a proceselor de microdeformare plastică în general o are lubrifierea în timpul procesului, cantitatea de lubrifiant folosită conduce la reducerea coeficientului de frecare dintre semifabricat și sculă.

9. Analiza influenței diferitelor categorii de factori asupra proceselor de microambutisare a condus la următoarele concluzii:

- principala influență asupra rezultatelor proceselor de microambutisare o are grosimea materialului deformat;
- o influență la fel de importantă o are și cunoașterea microstructurii materialului ce urmează a fi deformat;
- mărimea grăunțului cristalin influențează valoarea forței de ambutisare.

Direcții de cercetare

Din analiza rezultatelor cercetărilor recente în domeniul microdeformării materialelor cu puritate ridicată, rezulta ca direcții de cercetare ale lucrării prezente sunt următoarele:

1. Conceperea unui model redus de plasticitate cristalină de deformare a monocristalelor aplicat la încercările de tracțiune;
2. Utilizarea unui model compozit pentru analiza procesului de ambutisare, ce ține seama de interacțiunea dislocațiilor produse la deformare cu suprafețele libere ale semifabricatului;

3. Extinderea modelului de plasticitate cristalină în cazul policristalelor prin aplicarea testelor de tracțiune biaxială;
4. Validarea modelului redus de plasticitate cristalină pentru policristale;
5. Analiza experimentală a procesului de ambutisare convențională și microambutisare a tablelor subțiri de nichel în vederea stabilirii unor valori optime ale parametrilor caracteristici proceselor de ambutisare;
6. Validarea experimentală a modelului de tip "compozit" utilizat în cazul simulărilor numerice a proceselor de ambutisare;
7. Aplicarea modelelor de tip "compozit" pentru caracterizarea răspunsului mecanic al materialelor metalice pure și extinderea aplicării acestor modele în cazul altor materiale cu o puritate redusă.

Capitolul 2. Cercetări privind modelul de plasticitate cristalină aplicat monocristalelor de nichel

Este prezentat modelul de plasticitate cristalină dezvoltat și implementat în programul de element finit FEAP. Ținând cont de faptul că modelul de plasticitate cristalină a fost aplicat cu succes în modelarea comportării monocristalelor de cupru de către [Evers, 2003], în cadrul acestui capitol se propune aplicarea modelului respectiv și pentru determinarea comportării mecanice a monocristalelor de nichel.

Pe baza modelului de plasticitate cristalină dezvoltat și implementat în programul de element finit FEAP de către Evers [Evers, 2003] a fost determinat un set de valori numerice pentru parametrii caracteristici acestui model. Prin modelarea numerică a testelor de tracțiune și de compresiune aplicate unui monocristal de nichel, s-au identificat, cu ajutorul programului FEAP, parametrii modelului de plasticitate cristalină ce vor fi utilizați, în continuare, pentru modelarea policristalelor de nichel. Deoarece identificarea presupune un proces de optimizare a valorilor țintă, s-a pornit în identificare de la un set de valori inițiale ale parametrilor modelului, determinați experimental în cadrul Laboratorului Crismath, Universitatea din Caen, Franța.

Modelarea numerică a proceselor de microdeformare necesită investigații suplimentare ale relației structură-proprietăți care, mai apoi, să fie introduse în programele de simulare cu element finit. La microdeformarea plastică, comportarea materialului este dată de starea de tensiuni și deformații la care este supus materialul deformat, dar și de mărimea, orientarea graunților și densitatea de dislocații care este în material. Datorită faptului că dimensiunile pieselor microdeformate devin comparabile cu dimensiunile graunților (pe grosime), relația microstructură-proprietăți trebuie definită prin intermediul unor variabile interne exprimate sub forma unui model de plasticitate cristalină.

2.1. Descrierea matematică a modelului plasticității cristaline

Abordările privind deformarea plastică a materialelor metalice s-au axat atât pe studii mecanismelor de deformare la nivel macroscopic cât și pe fenomenele microscopice generate de tensiunile externe aplicate materialului. Aceste fenomene pot fi: comportarea rețelei cristaline în timpul procesului de deformare, activarea sau inactivarea sistemelor de alunecare în interiorul unui material și influența densității de dislocații asupra comportării mecanice a materialului.

Primele cercetări dedicate studierii posibilităților de alunecare într-un monocristal au fost focalizate pe descrierea modului de deformare a materialului. În acest scop, tensorul deformației este descompus în cele două componente:

- componenta plastică - calculată pentru cazul în care un singur sistem de alunecare este activat și alunecarea sistemului respectiv este însoțită de ecrusare,
- componenta elastică - calculată în funcție de starea curentă de deformare plastică și de deformația totală.

Legătura dintre aceste două componente ale tensorului deformației este de forma:

$$F = F_e \cdot F_p \quad (2.8)$$

În studiul efectuat de [Breklemens, 2002] sunt descrise influențele acestor două componente ale tensorului deformației asupra vitezei de deformare și influența dislocațiilor asupra deformării plastice. O descriere simplificată a modelului constitutiv este realizată pentru solidele cristaline. Scopul aplicării acestui model în modelarea comportării monocristalelor și apoi a policristalelor din materiale metalice cu structură cristalină de tip cub cu fețe centrate, este acela de a determina eventualele stări de tensiune datorate unei anumite deplasări. Este știut faptul că deformarea plastică pentru epruvetele de dimensiuni micrometrice este influențată pe de o parte de viteza de deformare și pe de altă parte de deplasarea dislocațiilor. Dislocațiile produc perturbări în ceea ce privește regularitatea rețelelor cristaline și sunt o sursă de tensiuni interne [Suciu, 2007].

Plasticitatea metalelor cristaline poate fi explicată utilizând teoria dislocațiilor în cazurile relativ simple cum ar fi monocristalele metalelor care prezintă structuri de tip hexagonal-compact și structura de tip cub cu fețe centrate [Haasen, 1958], [Nicola, 2003a].

Având ca punct de plecare descompunerea tensorului deformației în cele două componente și ținând cont de relația (2.8) poate fi calculat gradientul tensorului vitezei definit în relația [Lee, 1969].

Deformația elastică include micile deformații ale rețelei cristaline și posibile rotații ale corpului rigid.

Tensorul vitezei poate fi definit în raport cu relația (2.8) astfel:

$$L = \dot{F} \cdot F^{-1} [s^{-1}] \quad (2.9)$$

Înlocuind relația (2.9) în relația (2.8) se obține o descompunere aditivă a tensorului L:

$$L = L_e + F_e \cdot L_p \cdot F_e^{-1} \quad (2.10)$$

În relația (2.10) componentele elastică și plastică sunt definite astfel:

$$L_e = \dot{F}_e \cdot F_e^{-1} \quad (2.11)$$

$$L_p = \dot{F}_p \cdot F_p^{-1} \quad (2.12)$$

Tensorul de ordinul II al tensiunilor, Piola-Kirchhoff, este dat de relația (2.13) ținând cont de starea intermediară de tensiuni libere [Mandel, 1974]. El este considerat ca fiind elastic conjugat cu deformația elastică Green măsurată prin parametru E_e .

$$\tau \equiv \det(F_e) F_e^{-1} \cdot \sigma \cdot F_e^{-T} \quad (2.13)$$

$$\tau = {}^4 C : E_e, \quad E_e \equiv \frac{1}{2} (C_e - I), \quad C_e \equiv F_e^T \cdot F_e, \quad (2.14)$$

unde: σ este tensorul tensiunii a lui Cauchy; C_e - tensorul deformației Cauchy-Green; I -tensorul unitar de ordinul II.

Tensorul izotropiei elasticității de ordinul IV ${}^4 C$ este definit prin intermediul modului lui Young E și al coeficientului lui Poisson ν .

Evoluția deformației plastice este descrisă de către gradientul componente plastice a tensorului vitezei L_p , care prin definiție poate fi scris ca sumă a vitezelor de alunecare cristalografică $\dot{\gamma}^\alpha$ în cele 12 sisteme de alunecare α având planurile dense $\{111\}$ care contin direcțiile $[110]$ pentru metalele cu structura cub cu fețe centrate [Rice, 1971].

$$L_p = \sum_{\alpha=1}^{n_s} \dot{\gamma}^\alpha \bar{s}_0^\alpha \bar{n}_0^\alpha \quad (2.15)$$

Legătura între conceptele definite pentru monocristale și dezvoltarea densităților de dislocații este dată raportând viteza de alunecare $\dot{\gamma}^\alpha$ pentru fiecare sistem de alunecare la tensiunea de forfecare remanentă efectivă τ_{eff}^α și la rezistența la deformare actuală (rezistența sistemului de alunecare) s^α . Legătura poate fi exprimată printr-o lege de tip vâsco-plastic [Evers, 2003].

$$\dot{\gamma}^\alpha = \dot{\gamma}_0^\alpha \frac{\tau_{eff}^\alpha}{s^\alpha} \left(\frac{|\tau_{eff}^\alpha|}{s^\alpha} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad \alpha=1,2,\dots,n_s, \quad (2.16)$$

unde: $\dot{\gamma}_0^\alpha$ este parametru de materiale reprezintă viteza forfecării plastice; m - senzitivitatea vitezei de forfecare; n_s - numărul sistemelor de alunecare

Valori mari ale parametrului m conduc la o comportare pur plastică în timp ce viteza inițială de forfecare $\dot{\gamma}_0^\alpha$ va rămâne neglijabilă și mai mică decât tensiunea de forfecare remanentă efectivă $|\tau_{eff}^\alpha|$, dar apropiată ca valoare cu rezistența la alunecare s^α .

Tensiunea de forfecare remanentă efectivă este presupusă ca fiind forța a cărei acțiune conduce la deplasarea dislocațiilor în sistemul de alunecare α . Această tensiune este diferența dintre tensiunea de forfecare externă aplicată τ^α (tensiunea Schmid) și tensiunea reziduală τ_b^α conform relației (2.17).

$$\tau_{eff}^\alpha = \tau^\alpha - \tau_b^\alpha, \quad \text{pentru } \alpha=1,2,\dots,n_s \quad (2.17)$$

GSNs conduc la apariția tensiunilor reziduale în starea intermediară, în timp ce densitățile de dislocații stocate statistic SSDs, cu orientare aleatoare, nu conduc la tensiuni interne.

2.2. Identificarea valorii coeficientului de sensibilitate al vitezei de deformare prin metoda reordonării deformațiilor

Pentru obținerea unei precizii ridicate a rezultatelor, a fost folosită metoda reordonării deformațiilor, care constă în reordonarea valorilor deformațiilor pentru cele patru cazuri analizate. Determinarea valorii parametrului m a fost determinată prin aproximare liniară între $\log(\sigma)$ și $\log(\dot{\epsilon})$.

Relația matematică de forma 2.18. a fost utilizată pentru caracterizarea matematică a modelului SWIFT.

$$\sigma = c(\epsilon_0 + \epsilon)^n \dot{\epsilon}^m \quad (2.18)$$

Prin logaritmare relația 2.21 devine:

$$\log(\sigma) = \log(c) + n\log(\epsilon_0 + \epsilon) + m\log(\dot{\epsilon}) \quad (2.19)$$

Se aproximează astfel:

$$\sigma = f_1(\epsilon, \dot{\epsilon}) \approx f_2(\epsilon) \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (2.20)$$

Pentru această aproximare este definită scara logaritmică astfel:

$$\log(\sigma) = \log[f_2(\epsilon)] + m\log(\dot{\epsilon}).$$

Dacă se consideră $\epsilon = \epsilon^*$ (constanta) se obține următoarea ecuație liniară

$$\log(\sigma) = c + m\log(\dot{\epsilon}) \quad (2.21)$$

Ultima ecuație poate fi scrisă sub forma unei ecuații liniare:

$$y = ax + b \quad (2.22)$$

Variația parametrului m în raport cu deformația poate fi observată în figura 2.8.

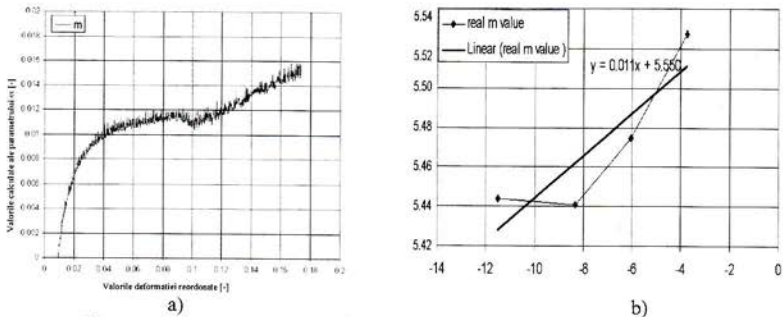


Figura 2.8. Determinarea valorii parametrului m utilizând modelul SWIFT
 a) Valorile calculate ale parametrului m ; b) Aproximarea liniară a valorii parametrului m .

În urma calculelor efectuate prin această metodă, valoarea medie a parametrului m este 0,011 pentru toate cele patru cazuri analizate.

Pentru deformațiile obținute pentru fiecare viteză de deformare se definesc variabile de tip x_1, x_2, x_3, x_4 iar pentru tensiunile obținute pentru cele patru cazuri variabile y . Pentru tensiune sunt definite variabilele y_1, y_2, y_3 și y_4 .

Utilizând variabilele definite anterior, a fost creat un sistem de ecuații de forma:

$$\begin{cases} y_1 = ax_1 + b \\ y_2 = ax_2 + b \\ y_3 = ax_3 + b \\ y_4 = ax_4 + b \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ x_3 & 1 \\ x_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ x_3 & 1 \\ x_4 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} \\ \Rightarrow \begin{pmatrix} x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 & x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 + x_4 y_4 \\ y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

Pentru fiecare valoare a deformației este obținută o valoare a parametrului m . Valorile astfel obținute sunt notate cu A în ecuațiile următoare.

$$\begin{aligned} A_{11} &= x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 \\ A_{12} &= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \\ A_{22} &= 4 \\ B_1 &= x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 + x_4 y_4 \\ B_2 &= y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \end{aligned} \Rightarrow \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} A_{11} a + A_{12} b = B_1 \\ A_{12} a + A_{22} b = B_2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow b &= \frac{B_2 - A_{12} a}{A_{22}} \\ \Rightarrow a &= \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right)^{-1} \left(B_1 - \frac{A_{12} B_2}{A_{22}} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.3. Concluzii privind modelarea comportării mecanice a monocristalelor de nichel utilizând modelul plasticității cristaline

Descrierea matematică a modelului plasticității cristaline a permis înțelegerea mecanismelor ce stau la baza apariției deformațiilor plastice la nivel cristalin.

Plasticitatea metalelor cristaline poate fi explicată utilizând teoria dislocațiilor [Gurtin, 2002] în cazurile relativ simple cum ar fi monocristalele metalelor care prezintă structuri de tip hexagonal-compact și structura de tip cub cu fețe centrate.

Validarea modelului redus al plasticității cristaline utilizat în programul de element finit FEAP s-a realizat pe baza datelor experimentale obținute în urma efectuării unor teste de tracțiune pentru monocristalele de nichel în cadrul Laboratorului Crismat, Universitatea din Caen, Franța. A fost identificată valoarea parametrului m în diferite condiții de sollicitare, cu viteze de

deformare diferite, astfel încât valoarea acestui parametru să ilustreze cât mai bine influența vitezei de deformare asupra cinematiei dislocațiilor care sunt generatoare de plasticitate.

Capitolul 3. Cercetări privind modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalelor din nichel având orientări cristalografice diferite

Utilizarea modelului de plasticitate critică prezentat în capitolul 2 pentru modelarea răspunsului mecanic al monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [001] a permis reprezentarea cu ajutorul unui program conceput în Matlab a evoluției densităților de dislocații în interiorul monocristalului. Au fost considerate două direcții cristalografice dense [001] și [111] și o direcție cristalografică aleatorie [-3,34,-14] pe care s-au realizat sollicitări mecanice în scopul activării unui număr maxim de plane de alunecare. Se are în vedere identificarea direcțiilor cristalografice capabile să genereze cel mai mare număr de sisteme de alunecare, ceea ce ar conduce la plasticitate maximă a materialului supus deformării.

Modelarea comportării mecanice a monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [-3,34,-14], în cazul aplicării unei sollicitări de tracțiune monoaxială, a permis stabilirea numărului maxim de sisteme de alunecare active.

3.1. Modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [001]

3.1.1. Construcția modelului

Reteaua de discretizare în elemente finite utilizată pentru monocristalul de nichel a avut forma prismatică dimensiunile 4000 x 1800 x 8000 μm . Au fost utilizate un număr de 64 de elemente. Numărul nodurilor a fost 765. Viteza de deplasare utilizată a fost de 1,6 $\mu\text{m/s}$. A fost impusă o deplasare de 2000 μm . Parametrii utilizați în simulare sunt prezenți în tabelul 3.1.

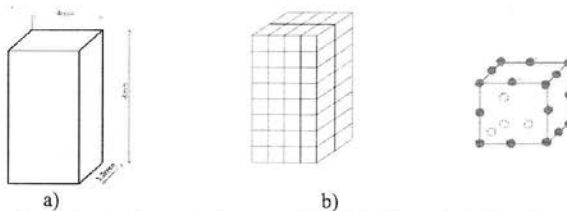


Figura 3.1. Dimensiunile și geometria monocristalului orientat după direcția cristalografică [001]

- a) dimensiunile monocristalului, b) rețeaua de discretizare în elemente finite utilizată în simulare, c) repartizarea celor 20 de noduri pe un element din rețea



Figura 3.2. Selectia unui monocristal și reprezentarea schematică a modelului de rețea cristalină

3.1.2. Rezultatele modelării

Utilizarea modelului plasticității cristaline prezentat în capitolul 2 a făcut posibilă evaluarea variației tensiune-deformație pentru monocristalele de nichel având diverse orientări cristalografice. În cazul analizat în cadrul acestui subcapitol, monocristalul de nichel a fost orientat după direcția cristalografică $[001]$.

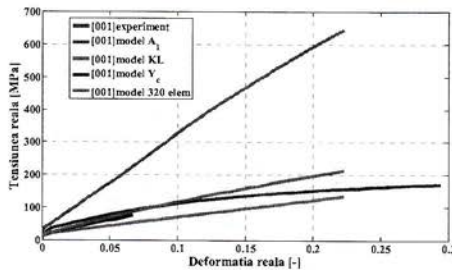


Figura 3.3. Evoluția tensiune-deformație pentru monocristalul de nichel orientat după direcția cristalografică $[001]$

3.2. Modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică $[111]$

3.2.1. Construcția modelului

Rețeaua de discretizare cu elemente finite utilizată este prezentată în figura 3.4. Rețeaua a fost compusă din 75 de elemente.

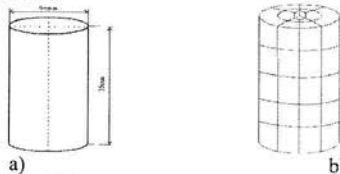


Figura 3.4. Dimensiunile și geometria monocristalului orientat după direcția cristalografică $[111]$.

a) geometria monocristalului, b) rețeaua de discretizare utilizată în simulare

În figura 3.5 se prezintă comparativ rezultatele experimentale și rezultatele numerice obținute. Elementele folosite au fost elemente de tip solid având 20 de noduri. Elementele solide sunt utilizate în programul de simulare numerică FEAP pentru a modela tridimensional comportamentul solidelor.

3.2.2. Rezultatele modelării

Identificarea valorilor numerice ale parametrilor caracteristici modelului de plasticitate cristalină [Evers, 2003] a fost efectuată pe baza simularilor numerice. Simularile numerice au fost efectuate pe baza următorului algoritim: (1) au fost efectuate un număr de cinci simulări în cazul monocristalelor orientate după direcția cristalografică [111]; (2) în cadrul fiecărei simulări unul dintre cei cinci parametri aleși pentru identificare în acest caz a fost modificat în funcție de valorile existente în literatura de specialitate, în timp ce toți ceilalți au fost menținuți constanți.

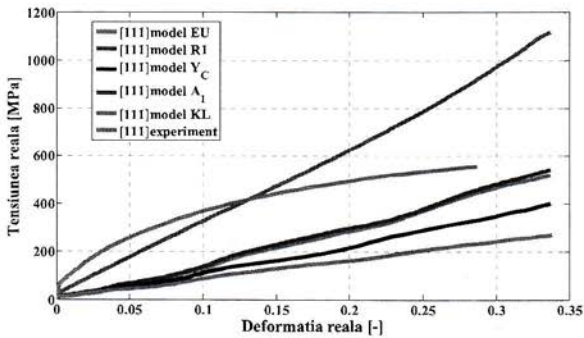


Figura 3.5. Evoluția tensiune-deformație pentru monocristalul orientat după direcția cristalografică [111]

Convergența calculului a fost testată prin modificarea pe rând a unuia dintre parametri, și anume: prin modificarea valorilor unghiurilor Euler (notate EU în figura 3.5), modificarea numărului de iterații (notat-R1- în figura 3.5).

Analizând rezultatele numerice obținute se observă faptul că diferența între tensiunea reală pentru cazul în care puterea interacțiunii dintre dislocații a fost modificată și valoarea experimentală este de aproximativ 500MPa.

În celelalte cazuri au fost observate diferențe de aproximativ 100MPa-150MPa. Se observă că valoarea maximă a diferenței se obține în cazul modificării valorii dumului liber mediu parcurs de dislocație până la întâlnirea unui obstacol care poate fi: limita de grăunte sau alta dislocație.

În cazul monocristalului analizat fiind vorba de un singur grăunte reducerea tensiunii reale poate fi explicată prin faptul că dislocațiile parasesc monocristalul respectiv.

3.3. Modelarea numerică a comportării mecanice a monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [-3, 34, -14]

3.3.1. Construcția modelului

Stabilirea unui set optim de parametri cu ajutorul cărora să poată fi modelată comportarea mecanică a nichelului utilizând modelul de plasticitate cristalină prezentat a necesitat efectuarea unor simulări numerice, atât pe direcțiile cristalografice dense din punct de vedere atomic cum ar fi [111] și [001], dar și pe o direcție oarecare [-3, 34, -14], direcție pentru care a fost reprezentată în figura 3.6 activarea sistemelor de alunecare pe parcursul deformării plastice.

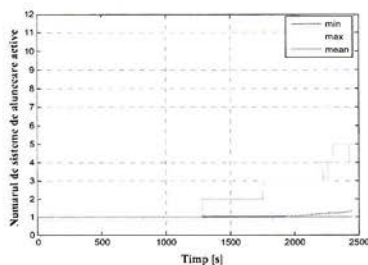


Figura 3.6. Numărul maxim de sisteme de alunecare active

3.4. Construcția modelului și conceperea unui program în Matlab pentru reprezentarea hărților de evoluție a densității de dislocații-pentru monocristalului orientat după direcția cristalografică [001]

Monocristalul supus solicitării de tracțiune monoaxială a fost secționat cu ajutorul a trei plane pentru a putea face o reprezentare a modului de distribuție a densităților de dislocații. Reprezentarea schematică a acestor plane este prezentată în figura 3.7.

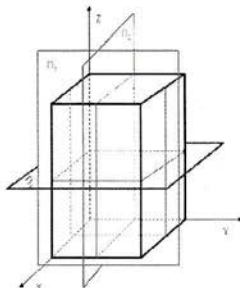


Figura 3.7. Reprezentarea schematică a planurilor de secțiune prin monocristalul de nichel orientat după direcția [001]

Pe baza ecuațiilor prezentate în capitolul 2 a fost conceput cu ajutorul softului Matlab un program care permite reprezentarea densităților de dislocații în interiorul monocristalului respectiv. În timpul modelării comportării mecanice al monocristalelor de nichel, valorile parametrilor de rețea au fost modificate și în fiecare caz a fost trasată câte o hartă de variație a distribuției densităților de dislocații. Acestea permit vizualizarea modului în care dislocațiile se deplasează de la o etapă la alta în timpul solicitării.

3.4.1. Rezultatele modelării utilizând programul conceput

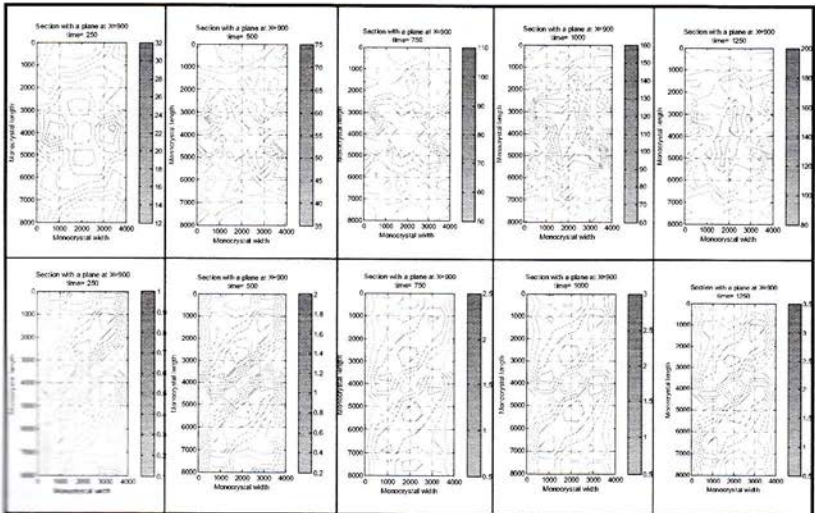
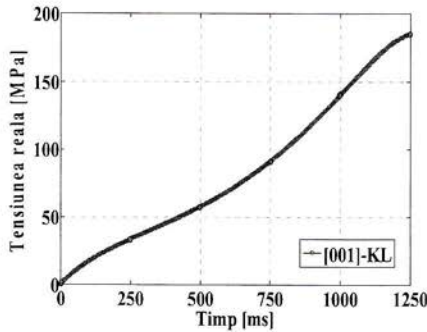


Figura 3.8. Evoluția în timp a tensiunii reale pentru monocristalul orientat după direcția cristalografică [001]

3.5. Concluzii privind modelarea comportamentului mecanic al monocristalelor de nichel

Utilizarea legii Schmid și Boas creează posibilitatea determinării condițiilor critice de activare a alunecării în cadrul unui plan de alunecare.

Modelul plasticității cristaline utilizat pentru modelarea comportamentului mecanic al monocristalelor de nichel a condus la stabilirea unui set de parametri caracteristici pentru model, valorile acestor parametri fiind corelate cu literatura de specialitate și validate pe baza studiilor efectuate de [Evers, 2003]. Cu ajutorul programului Matlab a fost realizată reprezentarea grafică a evoluției densităților de dislocații în interiorul monocristalului orientat după direcția cristalografică [001].

Analizând rezultatele obținute privind evoluția densităților de dislocații în interiorul monocristalului orientat după direcția cristalografică densă [001] se observă faptul că pe măsura ce valoarea tensiunii aplicate asupra monocristalului crește, densitatea maximă de dislocații aflate în interiorul monocristalului crește, dislocațiile acumulându-se către limitele exterioare ale monocristalului.

În figura 3.8 este prezentată evoluția în timp a tensiunii reale calculată în timpul modelării procesului de tracțiune monoaxială aplicat asupra unui monocristal din nichel orientat după direcția cristalografică [001]. Corelând aceste rezultate cu evoluția densităților de dislocații se observă faptul că la finalul timpului de deformare se înregistrează o relaxare a monocristalului fapt care conduce la o reducere a dislocațiilor acumulate la limitele exterioare ale acestuia.

Este cunoscut faptul că în cazul metalelor cu structura cristalografică de tip cub cu fe \square e centrate [CFC], numărul de sisteme de alunecare posibil active în timpul unui proces de deformare este 12 în cazul unui monocristal orientat după o direcție propice deformației. S-a determinat numărul maxim de sisteme de alunecare active pentru o deformație de 20% a monocristalului orientat după o direcție cristalografică oarecare [-3,34,-14]. Utilizarea programului proiectat a permis vizualizarea faptului că există doar 5 sisteme de alunecare active la finalul procesului de deformare în interiorul monocristalului orientat după direcția cristalografică oarecare [-3, 34, -14]. Datorită numărului redus de sisteme de alunecare active în cazul direcției considerate permite caracterizarea direcției cristalografice respective ca nefiind o direcție cristalografică propice pentru aplicarea unei sollicitări de tracțiune monoaxială.

Capitolul 4. Modelarea numerică a testelor de tracțiune biaxială

Modelarea numerică a comportării mecanice a policristalelor de nichel a avut drept scop stabilirea unei corelații între orientarea cristalografică a fiecărui grăunte cristalin în parte și comportarea întregii structuri policristaline asupra căreia se aplica sollicitări pe diferite direcții.

Modelul de plasticitate cristalină redus, validat pentru monocristale, a fost aplicat și în cazul modelării testelor de tracțiune biaxială ale policristalelor de nichel.

Principala caracteristică a policristalelor de nichel utilizate în modelarea testelor de tracțiune biaxială a fost faptul că aceste policristale conțin un singur grăunte cristalin pe grosime. Utilizarea policristalelor cu un singur grăunte pe grosime a permis analiza numerică a influenței orientării monogranulare asupra răspunsului mecanic al policristalelor.

Au fost determinate și reprezentate figurile de poli pentru fiecare dintre testele simulate, observându-se faptul că pentru orientările cristalelor după direcții mai apropiate de direcția cristalografică densă [001], tensiunea din policristal înregistrează o creștere în raport cu orientările mai depărtate de direcția [001].

4.1. Modelarea comportării mecanice a policrystalului de nichel cu un singur grăunte cristalin în grosime

4.1.1. Geometria policristalului de nichel având un singur grăunte cristalin pe grosime

Geometria și dimensiunile policristalului considerat în simulările numerice sunt prezentate în figura 4.2. S-a considerat un policristal alcătuit din 9 monocristale având unghiurile de orientare cristalografică prezentate în tabelul 4.1.

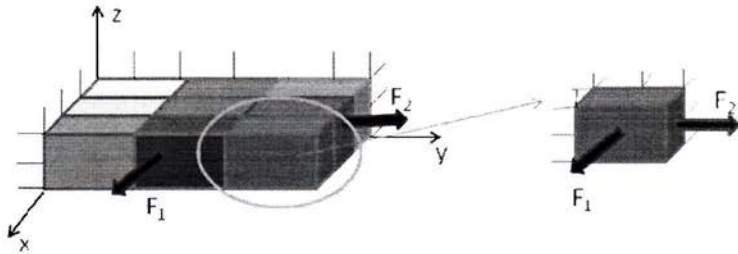


Figura 4.1. Condițiile la limită aplicate policristalului compus din 9 grăunți cristalini [Afteni, 2010]

Fiecare monocristal a fost considerat ca având forma unui cub cu latura de $100\mu\text{m}$. Direcțiile de solicitare sunt prezentate în figura 4.1.

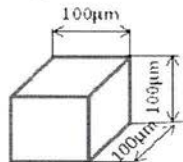


Figura 4.2. Geometria și dimensiunile unui monocristal din policristalul analizat

Datele privind unghiurile de orientare cristalografică au fost obținute utilizând tehnicile de măsurare EBSD (Electron backscatter diffraction – care este o tehnica de masurare a orientării cristalografice), în cadrul Laboratorului Crismath, Universitatea din Caen, Franța.

Pentru validarea rezultatelor numerice obținute utilizând modelul de plasticitate cristalină prezentat în cazul monocristalelor a fost efectuată o analiză comparativă a rezultatelor obținute într-un alt program de modelare utilizând aceleași dimensiuni pentru policristalul analizat.

4.2. Validarea modelului numeric

Utilizând cele două programe de element finit (FEAP și Lagamine) s-au obținut variațiile tensiune-deformație ca medie pentru cele 15 orientări considerate ale grăunților cristalini.

Aceleași condiții de simulare numerică pentru testul de tracțiune biaxială au fost aplicate în utilizarea programului de simulare Lagamine (program de element finit pentru simularea proceselor de deformare plastică a tablelor, schema explicită de calcul, realizat de colectivul de cercetatori ArGenCo, Universite de Liege, Belgia. Utilizarea programului Lagamine, în comparație cu FEAP, are avantajul că numărul punctelor de integrare este redus prin considerarea grosimii tablei ca o entitate supusă unei legi de curgere a materialului în comparație cu FEAP care consideră fiecare graunțe și frontierele dintre acestia. Pentru fiecare graunțe este definită o lege de comportare.

Din acest motiv, de simplificare a timpului de calcul în vederea trecerii la simularea unui proces de ambutisare sau microambutisare, se dorește validarea modelului folosit cu Lagamine în raport cu rezultatele date de programul FEAP. Cu ajutorul programului FEAP s-au identificat coeficienții legii de curgere a materialului, Swift, modelului de plasticitate cristalină (GNDs și SSDs), astfel încât se pot utiliza mai departe în programul Lagamine. Spre exemplu, pentru tracțiunea biaxială prezentată mai sus, timpul de calcul pentru o deformare de 20% a epruvetei este de 400s în cazul programului FEAP și 1s în cazul programului Lagamine. S-a făcut analiză comparativă a rezultatelor obținute în cadrul modelării testelor de tracțiune biaxială cu ajutorul celor două programe de modelare cu element finit a fost calculată eroarea de predicție pentru patru valori ale deformății și s-a observat faptul că eroarea minimă se obține în cazul unei deformății de aproximativ 15%.

Simularea testului de tracțiune biaxială cu cele două programe de element finit este o procedură de validare a rezultatelor obținute cu programul Lagamine în comparație cu cele obținute de FEAP.

Rezultatele comparative pentru curba tensiune-deformație sunt prezentate în figura 4.6. care arată concordanța între rezultatele obținute cu cele două programe de element finit.

Odată stabilit că rezultatele obținute utilizând programul Lagamine sunt aproximativ în același interval de mărime cu cele obținute prin utilizarea programului FEAP, se conservă setul de valori ce descrie pilicristalul de nichel, și se vor face, în continuare, simulări ale proceselor globale de ambutisare și microambutisare cu programul Lagamine.

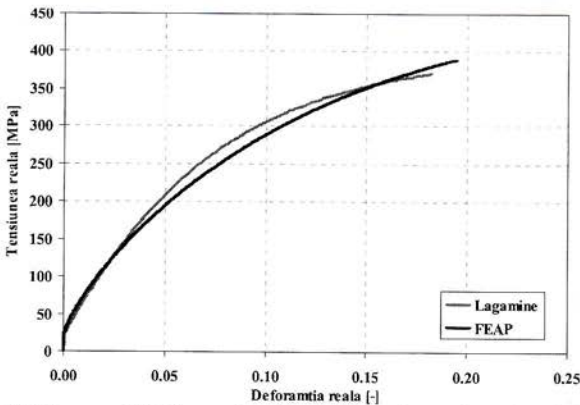


Figura 4.6. Validarea modelului numeric utilizat în Lagamine cu ajutorul modelului FEAP

267352



Modelarea comportării mecanice a policristalelor a evidențiat faptul că tensiunea de curgere pentru o deformare de aproximativ 20% se obține în cazul unor grăunți ce au orientări apropiate de direcția cristalografică [001] în cazul programului FEAP. Rezultate similare au fost obținute și în cazul programului Lagamine.

4.3. Concluziile studiului privind modelarea numerică a testelor de tracțiune biaxială

Utilizarea diferitelor softuri de modelare numerică s-a dovedit a fi în ultimii ani una dintre cele mai avantajoase soluții în ceea ce privește caracterizarea mecanică a materialelor metalice.

Principalul obiectiv urmărit prin modelarea numerică a diferitelor condiții de solicitare a fost acela de a prezice starea de tensiuni și deformații determinată de solicitările la care sunt supuse diferitele categorii de piese în timpul funcționării.

Concordanța rezultatelor obținute prin modelarea testelor de tracțiune biaxială cu ajutorul programului de calcul cu elemente finite Lagamine în comparație cu programul FEAP pune în evidență faptul că programul dezvoltat în cadrul Departamentului ArGenCo, Universitate de Liege, Belgia, este un program capabil să prezică variațiile tensiune deformație utilizând un timp de calcul mai redus dar și un număr redus de parametri pentru definirea rețelei de discretizare.

Poate fi observat de asemenea faptul că eroarea minimă de calcul în cazul celor patru valori ale deformației considerate se obține în cazul unei deformații de aproximativ 15%.

Este cunoscut faptul că în aplicațiile industriale materialele metalice sunt supuse unor stări de tensiune compuse, spre exemplu în cazul proceselor de ambutisare materialul este supus simultan la tracțiune și la solicitări de compresiune și îndoire. Tensiunile maxime care pot apărea atât în timpul prelucrării pieselor respective cât și în timpul utilizării ulterioare pot fi prezise cu o mare acuratețe prin intermediul modelării numerice.

Modelarea comportării mecanice a policristalelor a evidențiat faptul că tensiunea de curgere pentru o deformare de aproximativ 20% se obține în cazul unor grăunți ce au orientări apropiate de direcția cristalografică [001].

Capitolul 5. Cercetări experimentale privind procesul de ambutisare a tablelor subțiri din oțel și nichel

Obținerea unor piese ce prezintă caracteristicile tehnologice și de calitate impune necesitatea cunoașterii parametrilor procesului de ambutisare dar și caracterizarea mecanică a materialelor semifabricatelor.

În cadrul acestui capitol este prezentat studiul experimental asupra comportării mecanice a materialelor metalice pure Ni (99,999%) în cazul procesului de macro-ambutisare.

A fost analizată influența razelor de racordare ale plăcilor active asupra forței de macro-ambutisare. Au fost utilizate un număr de 4 plăci active având următoarele raze de racordare 1, 1,5, 2 și 2,5mm. S-a observat faptul că utilizarea plăcilor de ambutisare cu raze de racordare având valori mai mari implică forțe de ambutisare mai mici. Dezavantajul utilizării unor plăci de ambutisare cu valori ale razelor de ambutisare mari este că suprafața de reținere se reduce fapt care duce în unele cazuri la apariția atât a cutelor cât și a unor piese nesimetrice datorită alunecării neuniforme a materialului în timpul procesului de macro-ambutisare. Tabla utilizată în cadrul campaniei de teste experimentale a fost din oțel de ambutisare grosime 0,5mm și din nichel pur (99,999%) de grosime 0,5mm.

S-a observat faptul că deformabilitatea nichelului este mai ridicată comparativ cu oțelul

Testele experimentale au fost realizate în cadrul Laboratorului de Tehnologia Presării la Rece, Facultatea de Mecanică din Galați. Au fost proiectate și executate un număr de 4 plăci de ambutisare având dimensiunile și geometria indicate în figura 5.4.

5.1. Rezultate experimentale privind ambutisarea convențională a tablelor din oțel

În urma experimentelor realizate în cadrul Laboratorului de Tehnologia Presării la Rece, Facultate de Mecanică, au fost trasate graficele de evoluție a forțelor de ambutisare. Evoluția forțelor în raport cu deplasarea poansonului în cazul utilizării tablelor din oțel de ambutisare cu grosimea 0.5mm poate fi observată în figura 5.1.

5.1.1. Variația forței de ambutisare în funcție de raza de racordare a plăcii active

Utilizarea unor plăci active pentru care valoarea razei de racordare a fost modificată a făcut posibilă determinarea valorii maxime a forței în funcție de cursa poansonului. Se poate observa faptul că odată cu reducerea valorii razei de racordare se înregistrează o creștere a valorii forței de ambutisare.

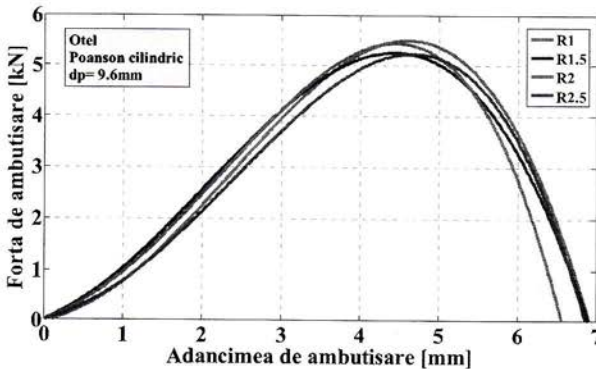


Figura 5.1.a) Variația forței de ambutisare în raport cu adâncimea de ambutisare [Afteni, 2011]

Este știut faptul că razele de racordare ale plăcilor active au o influență deosebită în ceea ce privește curgerea materialului fapt care explică diferențele între valorile maxime ale forțelor de ambutisare pentru cele patru matrițe. Analiza rezultatelor experimentale conduce către observația conform căreia odată cu reducerea valorii razei de racordare se înregistrează o creștere a valorii forței necesare pentru deformare prin ambutisare atât în cazul nichelului cât și în cazul oțelului.

Graficele forță-deplasare prezentate în figura 5.1 prezintă aceeași aliniere, diferențele în ceea ce privește valoarea maximă a forței de ambutisare fiind de aproximativ 0.5kN.

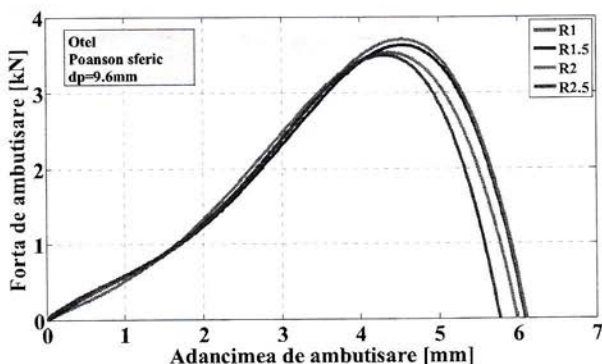


Figura 5.1.b) Variația forței de ambutisare în raport cu adâncimea de ambutisare aplicată tablei de oțel

Datorită faptului că testele experimentale au fost efectuate cu ajutorul unei prese hidraulice, lucru care a condus la existența unor vibrații în timpul procesului de ambutisare este necesară realizarea unei aproximări polinomiale a datelor experimentale aproximare ce are drept scop eliminarea variațiilor datorate acestor vibrații.

Testele experimentale de ambutisare a tablelor din oțel cu grosimea de 0.5mm au fost efectuate cu scopul dimensionării elementelor active în așa fel încât piesele din nichel să aibe caracteristicile tehnologice și dimensionale corespunzătoare.

5.2. Cercetări experimentale privind ambutisarea convențională a tablelor din nichel(99,999%)

5.2.1. Cercetări experimentale privind influența tratamentului termic aplicat tablelor din nichel (99,999%) asupra forței de ambutisare

Semifabricatele inițiale au fost ambutisate în vederea analizării efectului tratamentului termic aplicat tablelor din nichel asupra forței de ambutisare și asupra modului de curgere a materialului. Forțele de ambutisare au fost măsurate cu ajutorul aceluiași traductor de forță cu o capacitate maximă de 20kN.

Considerând rezultatele obținute se pot face următoarele aprecieri:

- micro-structura tablei din nichel supusă unui tratament termic la 1000°C, timp de două ore este compusă din grăunți aproximativ uniformi din punct de vedere al formei și dimensiunilor. Dimensiunile grăunților în cazul acestui tratament termic au fost de aproximativ 300μm, fapt care conduce la un raport între grosimea tablei și dimensiunea grăunțului de (g/d) aproximativ 1.6. ținând cont de valoarea acestui raport și de faptul că fiecare grăunte cristalin component al tablei din nichel are o orientare diferită ceea ce va conduce la o comportare diferită în momentul aplicării forței de deformare, comportare implicată de modul diferit de acomodare a deplasării dislocațiilor în interiorul materialului în fiecare dintre grăunți.

- în cazul reducerii temperaturii de tratament de la 1000°C la 700°C se observă faptul că și dimensiunile grăunților cristalini se reduc fapt care conduce la creșterea raportului dintre

grosimea tablei analizate și mărirea grăuntelui cristalin precum și numărul de grăunți aflat în grosime crește. În urma aplicării unui tratament termic în condiții de vid la temperatura de 700°C, timp de două ore au fost obținuți grăunți având dimensiunea medie de aproximativ 190 μ m. Raportul dintre grosimea tablei din nichel și mărirea grăuntelui cristalin fiind de aproximativ 2.63. Reducerea valorii dimensiunii grăuntelui cristalin conduce la o creștere a rezistenței materialului supus deformării fapt care influențează forța de ambutisare. În figura 5.2 se observă faptul că valoarea forței necesare ambutisării tablei din nichel crește odată cu reducerea temperaturii de tratament și a dimensiunilor microstructurale.

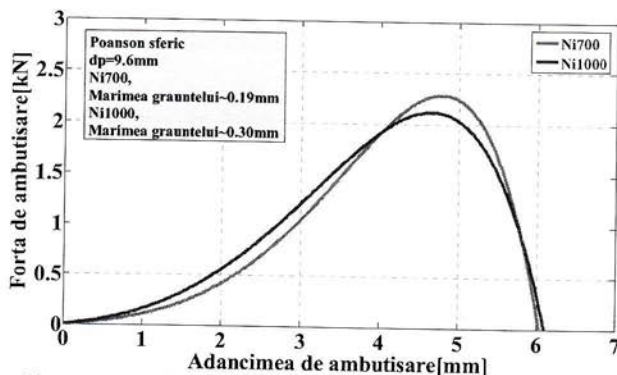


Figura 5.2. a) Variația forță-adâncime de ambutisare pentru ambutisarea tablelor din nichel (99,999%) cu un poanson cu cap sferic

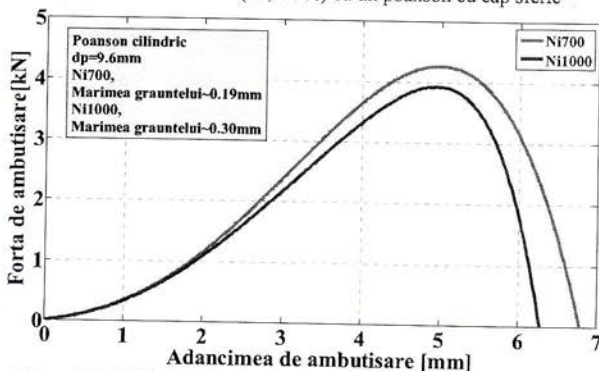


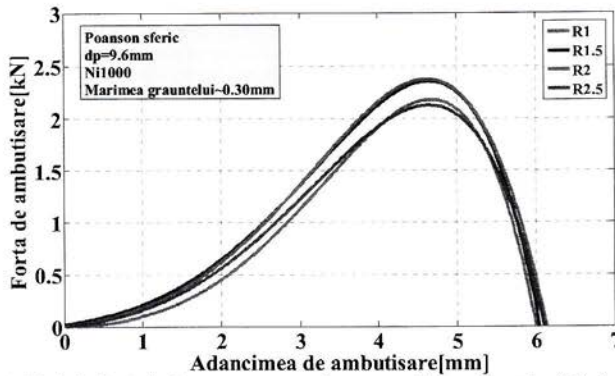
Figura 5.2. b) Variația forță-adâncime de ambutisare pentru ambutisarea tablelor din nichel (99,999%) cu un poanson cu cap cilindric

Se observă faptul că suprafața pieselor obținute în urma procesului de ambutisare convențională este influențată de microstructura materialului și de numărul redus de grăunți cristalini care se află în grosimea tablei din nichel.

5.2.2. Cercetări experimentale privind influența geometriei și dimensiunilor elementelor active asupra forței de ambutisare

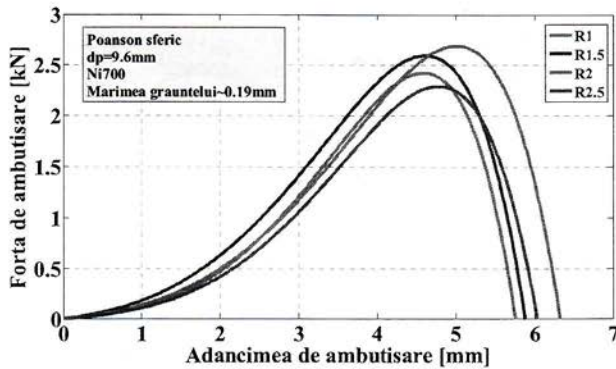
5.2.2.1. Analiza influenței valorii razei de racordare a matriței asupra forței de ambutisare

La ambutisare nichelului tratat la 700°C , pentru cazurile studiate, se observă că odată cu creșterea razei de ambutisare a plăcii active, valoarea forței de ambutisare scade (figura 5.3). La dimensiunile la care ne raportăm, această scădere este mică. Testele experimentale de ambutisare a tablelor din nichel (99,999%) având o grosime de 0,5mm au permis măsurarea forțelor de ambutisare pentru fiecare dintre cele patru plăci active proiectate în vederea stabilirii influenței valorii razei de racordare a plăcilor active ce intră în componența matrițelor de ambutisare asupra forțelor de ambutisare. Analiza rezultatelor experimentale obținute arată faptul că influența razei de racordare asupra forței de ambutisare este redusă în ambele cazuri analizate. Diferența în ceea ce privește valoarea maximă a forței de ambutisare este dată de geometria poansonului dar și de tratamentul termic aplicat tablelor din nichel înainte de deformarea prin ambutisare.



a) Variația forță-deplasare pentru cazul poansonului cu geometrie sferică și tabla din nichel tratată termic la 1000°C

Figura 5.3a. Influența razei de racordare a matriței asupra forței de ambutisare pentru Ni1000



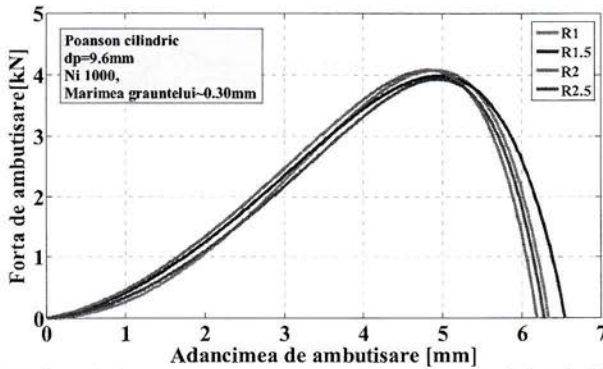
b) Variația forță-deplasare pentru cazul poansonului cu geometrie sferică și tablă din nichel tratată termic la 700°C

Figura 5.3b. Influența razei de racordare a matriței asupra forței de ambuțisare pentru Ni700

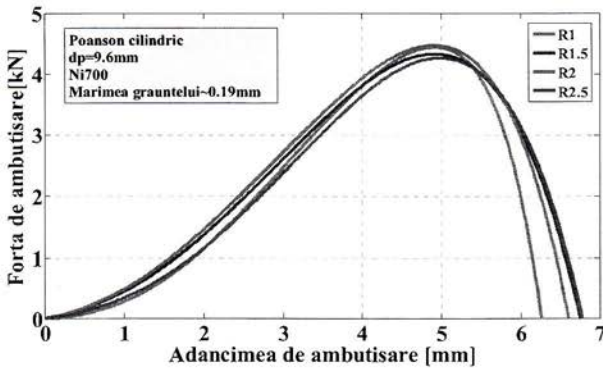
Tabelul 5.1. Piese ambuțisate sferic

	Rpl=1mm	Rpl=1.5mm	Rpl=2mm	Rpl=2.5mm
Ni1000				
Ni700				

Figurile 5.1 a) și 5.1 b) prezintă evoluția forței de ambuțisare în cazul utilizării unui poanson cu cap sferic în raport cu raza de racordare a plăcii active. Se observă faptul că valorile maxime pentru forța de ambuțisare se găsesc ca ordin de mărime în intervalul 2-2,5kN în cazul tablelor din nichel (99,999%) ce prezintă graunți cristalini cu mărimea de aproximativ 300μm, iar pentru cazul tablei în a cărei componentă microstructurală au fost obținuți în urma tratamentului termic aplicat graunți de aproximativ 190μm valorile maxime ale forțelor de ambuțisare se găsesc același interval în cazul plăcilor active cu raze de 1mm și 2,5mm în timp ce în cazul celorlalte două plăci active, de 2mm și 2.5mm valorile maxime ale forței de ambuțisare depășesc 2,5kN.



a) Variația forță-deplasare pentru cazul poansonului cu geometrie sferică și tablă din nichel tratată termic la 1000°C



b) Variația forță-deplasare pentru cazul poansonului cu geometrie sferică și tablă din nichel tratată termic la 700°C

Figura 5.2. Influența razei de racordare a matriței asupra forței de ambuțisare Poanson cilindric a) Ni1000 și b) Ni700

Figurile 5.2.a) și 5.2.b) prezintă evoluția forței de ambuțisare în raport cu raza de racordare a matriței obținute în urma testelor experimentale de ambuțisare a unor piese cilindrice cu flanșă. Rezultatele experimentale arată faptul că valoarea razei de racordare a plăcii active nu are o influență semnificativă asupra forței de ambuțisare. Se observă că valorile maxime pentru forța de ambuțisare sunt grupate în jurul valorii de 4kN în cazul utilizării tablelor tratate termic la 1000°C iar în al doilea caz al tablelor tratate la 700°C valorile maxime sunt grupate în jurul valorii de 4,5kN, fapt care conduce la concluzia că valoarea forței de ambuțisare în cazul unor plăci active cu raze de racordare cuprinse între 1 și 2,5mm este influențată pe de o parte de tratamentul termic aplicat materialului semifabricatului și de geometria poansonului utilizat pentru ambuțisare.

La ambutisare nichelului tratat la 1000°C , pentru cazurile studiate, se observă că odată cu creșterea razei de ambutisare a plăcii active, valoarea forței de ambutisare se menține relativ constantă (figura 5.2).

5.2.2.2. Analiza influenței geometriei poansonului asupra forței de ambutisare a tablelor din nichel

Pentru a determina influența geometriei poansonului (cilindrică și sferică) asupra forței de ambutisare, s-au realizat ambutisări ale tablei de Ni700, având granulație de 0,19mm, cu patru raze de racordare ale matriței și două geometrii ale poansonului. Pentru fiecare ambutisare s-au realizat trei încercări, iar rezultatele prezentate în cele ce urmează reprezintă, pentru fiecare ca, media celor trei înregistrări. Rezultatele experimentale au fost filtrate pentru a se elimina zgomotele produse la înregistrare.

În urma obținerii curbilor de variație a forței de ambutisare la deplasarea poansonului pentru a realiza adâncimea piesei de 6 mm, s-a constatat că geometria poansonului influențează în mare măsură valoarea forței de ambutisare.

Grafele prezentate în figura 5.3, arată diferențe semnificative ale valorii forțelor pentru cele două tipuri de poansoane. Valori mari se obțin în cazul utilizării poansonelor cilindrice cu rază de racordare. Pentru același tip de poanson, variațiile forței sunt relativ mici de la caz la altul. În cazul utilizării unui poanson cu cap sferic valorile maxime pentru forța de ambutisare scad odată cu creșterea valorii razei de racordare a plăcii active.

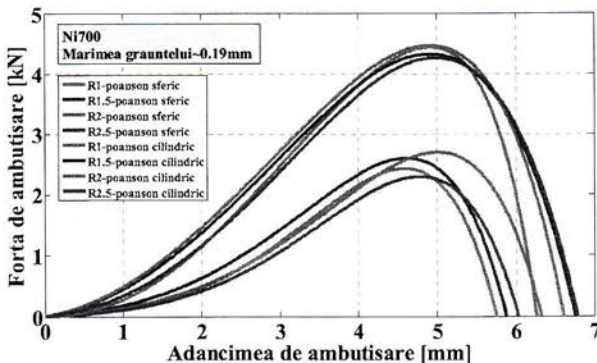


Figura 5.3. Evoluția forță-deplasare pentru ambutisarea convențională a tablelor din nichel. Identificarea prin aproximare polinomială a curbilor experimentale.

5.3. Concluzii privind ambutisarea convențională a tablelor de nichel (99,999%) și oțel.

Testele de tracțiune uniaxială au permis caracterizarea mecanică a materialului prelucrat fapt care a condus la obținerea de informații cu privire la forța necesară ambutisării.

În urma colaborării cu Arcelor Mittal Galați a fost determinată și compoziția chimică a oțelului utilizat în testele preliminare de ambutisare. Numărul ridicat de teste experimentale a permis evaluarea corectă a forței de ambutisare și proiectarea sistemului de limitare a cursei poansonului astfel încât apariția fisurilor a fost eliminată.

Scopul principal al pretestării elementelor active pe tablă din oțel a fost determinarea experimentală unor valori maxime ale forțelor de ambutisare și a unei curse limită a poansonului astfel încât riscul apariției fisurilor în cazul tablelor de nichel (99,999%) să fie eliminat.

Materialele utilizate pentru testele experimentale de ambutisare, utilizând dimensiuni convenționale au fost nichelul (99,999%) și oțelul.

Tablele de nichel au fost tratate în condiții de vid, la două temperaturi respectiv 1000°C și 700°C timp de două ore. Scopul tratamentului a fost obținerea unui raport între mărirea grăuntelui și grosimea tablei de 1 mm.

Diametrul semifabricatului inițial a fost 20,05mm și a fost obținut prin decupare pe o distanță normală de decupare. Diametrul exterior al pieselor cilindrice cu flanșă obținute în urma ambutisării a fost de 18,4 mm. Înălțimea pieselor ambutisate a fost de 4,8 mm atât în cazul pieselor de nichel cât și pentru oțel. Se observă faptul că deformabilitatea în cazul nichelului este mai bună comparativ cu oțelul.

Comparând rezultatele obținute în ceea ce privește forța de ambutisare se observă că tabla din nichel tratată la o temperatură de 1000°C prezintă valori mai mici decât în cazul tablei tratate la 700°C. Explicația acestui comportament diferit este dimensiunea redusă a grăunților cristalini în cazul tablei tratată la 700°C, fapt care conduce la o creștere a rezistenței materialului respectiv la deformare.

Capitolul 6. Cercetări experimentale privind procesul de microambutisare a tablelor subțiri din nichel (99,999%)

În cadrul acestui capitol este prezentat un studiu experimental al procesului de microambutisare. Experimentele au fost realizate în cadrul Laboratorului Tehnologia Presării la Rece, Facultatea de Mecanică, Universitatea Dunărea de Jos din Galați.

Poansoanele de microambutisare au avut un diametru de 4mm în zona activă și o rază de racordare de 1mm și respectiv 2mm în cazul poansonului cu geometrie semi-sferică. Plăcile de ambutisare au avut raze de racordare de 1, 1,5, 2 și 2,5mm. În acest capitol sunt prezentate un studiu și o clasificare a efectelor mărimii „size effects”. A fost realizat un studiu al influenței valorii razei de racordare a plăcii active asupra valorii forței de microambutisare. A fost analizată influența valorii raportului de ambutisare asupra forței de microambutisare.

6.1. Cercetări experimentale privind efectul geometriei poansonului asupra forței de microambutisare

Această influență a fost studiată utilizând dispozitivul de ambutisare prezentat mai sus și variind raza de racordare a matritei, și anume R1 și R2.5, atât pentru cazul microambutisării cu poanson cilindric, cât și în cazul microambutisării cu poanson sferic. Pentru fiecare geometrie și rază au fost realizate trei microambutisări, iar rezultatele prezentate pentru forța reprezintă media celor trei cazuri.

Valorile măsurate ale forței de ambutisare au fost reprezentate grafic în funcție de valorile măsurate ale deplasărilor poansonului pentru fiecare dintre cele două geometrii ale poansonelor de microambutisare utilizate în cadrul testelor experimentale. Pentru studiul influenței geometriei poansonului asupra forței de microambutisare au fost utilizate două geometrii: poansoane cu cap cilindric și poanson cu cap sferic. Dimensiunile și geometriile celor două poansoane utilizate sunt prezentate în figura 6.1.

Datorită faptului că a fost observată o dispersie a punctelor măsurate experimental s-a utilizat aproximarea cu ajutorul unui polinom de grad 10 în Matlab. Aceasta identificare cu un polinom a avut ca scop scop uniformizarea curbelor de variație prin eliminarea zgomotelor înregistrate la deformare și astfel, putându-se calcula valoarea medie pentru forța de microambutisare. Curbele de variație forță-deplasare sunt prezentate în figura 6.2 pentru poansonul cu cap cilindric și în figura 6.3. pentru poansonul cu cap sferic.

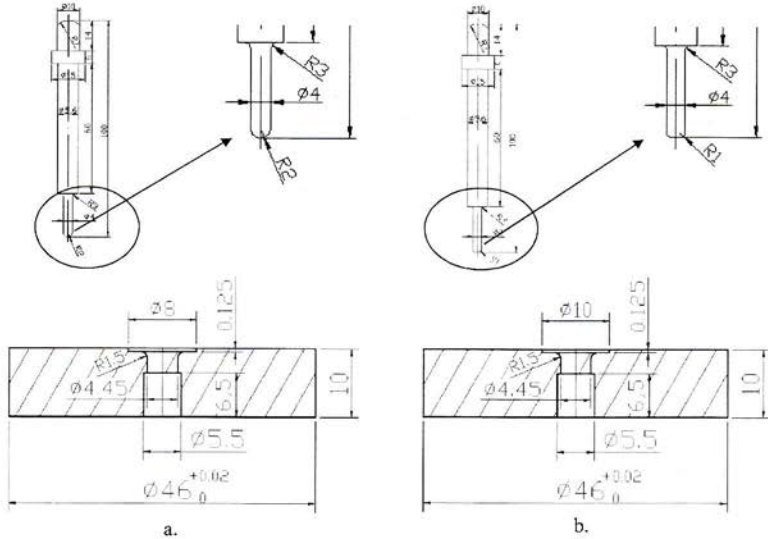


Figura 6.1. Geometria și dimensiunile elementelor active utilizate în microambutisare tablelor subțiri din nichel în cazul a) poanson sferic și b) poanson cilindric

Se poate observa din figura 6.2 faptul că valoarea forței de ambutisare are o tendință de creștere odată cu reducerea valorii razei de racordare a plăcii active.

Teste experimentale de microambutisare au fost efectuate în vederea determinării valorii maxime a forței de deformare în funcție de raza de racordare a plăcii active.

Au fost efectuate teste de microambutisare utilizând un poanson cu geometrie cilindrică și două plăci active ale cărora rază de racordare a fost modificată având o diferență de 1 mm.

Analiza rezultatelor experimentale a condus la concluzia conform căreia odată cu reducerea valorii razei de racordare a plăcii active forța necesară obținerii unei piese cilindrice cu flanșă având înălțimea de 1,8 mm înregistrează o creștere.

Testele experimentale de microambutisare utilizând un poanson cu geometrie sferică a condus la obținerea unor piese cu înălțimea de 3 mm. Au fost utilizate și în acest caz plăci active a caror rază de racordare a fost variată.

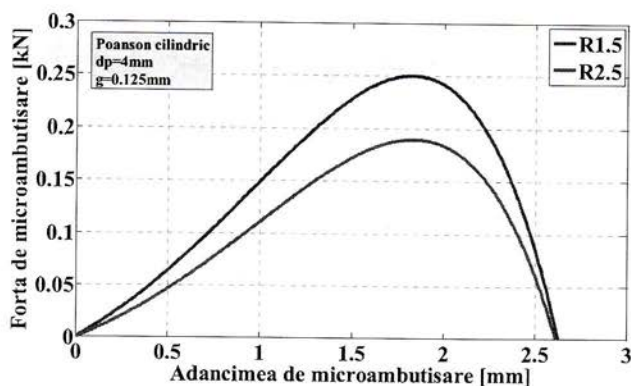


Figura 6.2. Variația forță-deplasare pentru microambutisare cu un poanson cu geometrie cilindrică

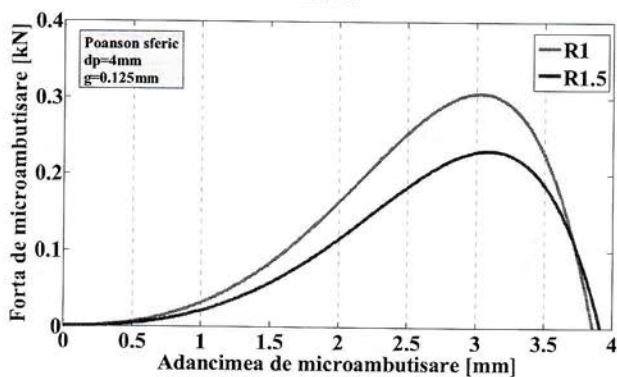


Figura 6.3. Variația forță-deplasare pentru microambutisare cu un poanson cu geometrie sferică



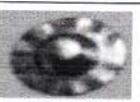





Similar cazului de microambutisare cu un poanson cu geometrie cilindrică se observă că valoarea forței de microambutisare înregistrează o creștere odată cu reducerea valorii razei de racordare a plăcii active.

În cazul geometriei sferice a poansonului de microambutisare se observă conform figurii 6.8. că pentru o creștere a razei de racordare de 0,5mm se obține o reducere a valorii forței de microambutisare de aproximativ 0,05 kN.

În cazul proceselor de microambutisare diferențe relativ mici în ceea ce privește valoarea forței de microdeformare pot conduce la apariția fisurilor respectiv a cutelor pe suprafețele flanșelor.

Variația dimensiunilor pieselor micro-ambutisate poate fi observată în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1. Piese microambutisate sferic și cilindric din tabla de nichel (99,999%)

Raza de racordare a plăcii active	R1	R1.5	R2	R2.5
Microambutisare cilindrică				
Microambutisare sferică				

Rezultatele experimentale obținute în urma microambutisării sferice a tablei din nichel (99,999%) arată faptul că odată cu creșterea valorii razei de racordare se produce o reducere a suprafeței de reținere fapt care conduce așa cum se observă în cazul la razei de 2,5 mm la apariția cutelor pe suprafața flanșei.

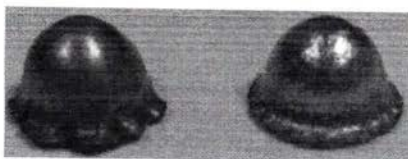
Localizarea deformației în timpul procesului de deformare plastică figura 6.9 influențează deformabilitatea prin modificarea caracteristicilor structurale și a proprietăților materialului din zona deformației localizate, ceea ce conduce la apariția fisurilor în zona respectivă, fie în timpul operației de deformare plastică, fie pe durata utilizării piesei deformate. Localizarea deformației sau a curgerii în timpul deformării este cauza comună a formării “zonei moarte” dintre semifabricatul deformat și scula de deformare. Localizarea deformației poate fi cauzată de: o lubrifiere redusă la suprafața de contact sculă-semifabricat, distribuția neuniformă a temperaturii, neuniformitatea structurală, etc.

Localizarea deformației în zona de racordare dintre peretele piesei și baza acesteia duce la apariția fisurilor.

O altă cauză a localizării deformației este și o ușoară excentricitate a poansonului folosit dar și o valoare ridicată a forței de reținere.



a) Localizarea deformației în cazul micro-ambutisării unei piese cilindrice cu flanșă, materiale folosite oțel și nichel, grosimea 0.125mm.



b) piese microambutisate sferic din oțel și nichel

Figura 6.4. Piese obținute prin microambutisare cilindrică și sferică

Analiza rezultatelor experimentale din figura 6.9 b a condus la concluzia conform careia nichelul de puritate ridicată (99,999%) prezintă capacități de deformare mai bune decât tabla din oțel. Acest lucru poate fi explicat și prin principala caracteristică a tablei din nichel aceea de a conține un singur grăunte cristalin în grosime fapt care îi conferă deformabilitate ridicată.

6.2. Concluzii privind analiza experimentală a proceselor de microambutisare

Microambutisarea este un procedeu de prelucrare complex care se folosește pentru realizarea pieselor de mici dimensiuni utilizate în domenii precum telecomunicațiile, medicină și în industria auto.

Complexitatea procesului de microambutisare se datorează dimensiunilor reduse atât a pieselor prelucrate cât și a echipamentelor necesare obținerii acestor piese, reducere dimensională ce influențează în mod direct atât procesul în sine cât și modul în care materialul se deformează pentru a căpăta forma proiectată.

Aplicarea proceselor de microambutisare în industrie este limitată deoarece cunoștințele existente la scară macro nu pot fi aplicate în mod direct la scară micro fapt care implică o bună cunoaștere a caracteristicilor microstructurale a materialului prelucrat precum și a materialului din care sunt prelucrate sculele.

Lubrifierea este unul dintre cei mai importanți factori în ceea ce privește obținerea unor piese calitative din punct de vedere dimensional cât și din punct de vedere al topografiei suprafețelor obținute în urma deformării plastice a materialului.

Unul dintre cei mai importanți factori de care trebuie ținut cont în cadrul proceselor de microdeformare plastică la rece și implicit în cazul microambutisării este "reducerii dimensionale".

Analiza rezultatelor experimentale a condus către concluzia conform căreia procesul demicro-ambutisare este afectat de efectul mărimii zonei de contact.

Astfel se poate defini conceptul de efect al mărimii zonei de contact. Acest efect al mărimii influențează valoarea forței de microambutisare respectiv distribuția tensiunilor în timpul procesului de deformare.

Efectul mărimii zonei de contact poate fi clasificat în cadrul efectelor mărimii cauzate de reducerea dimensiunilor cu respectarea teoriei similarității.

Capitolul 7. Contribuții privind modelarea proceselor de ambutisare și microambutisare

În cadrul acestui capitol este propus un nou model de comportare utilizat pentru studiul comportamentului mecanic al tablelor subțiri de nichel în cazul proceselor de micro-ambutisare. Conceperea modelului de tip compozit a fost necesară pentru a descrie comportarea grăunților cristalini aflați în diferite straturi ale materialului supus procesului de deformare. Odată cu reducerea raportului grosime/ mărimea grăuntelui, grăunții aflați în stratul de la suprafață devin predominanți fapt care conduce la o modificare a comportamentului mecanic al materialului.

Mecanismul responsabil pentru acest comportament diferit este comportarea diferită a grăunților din straturile de la suprafață. Comportarea este determinată de faptul că suprafețele libere a grăunților din straturile exterioare, permit dislocațiilor existente în interiorul acestora să iasă la suprafața materialului, determinând o relaxare, ce poate fi observată în urma analizei comparative a unor modele de tip compozit și simplu. Modelarea comportării materialelor supuse

deformării plastice utilizând modelul de tip "compozit" se bazează pe utilizarea a două legi constitutive de tip elastoplastic, suprafață/volum/suprafață.

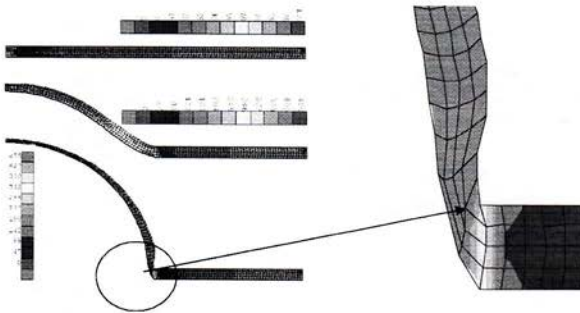
7.1. Cercetări privind stabilirea tipului optim de elemente finite utilizate în modelarea proceselor de ambutisare

Două tipuri de elemente finite au fost utilizate în cadrul simulărilor. Numărul de elemente finite a fost modificat pentru a putea realiza predicția valorii maxime a forței de ambutisare pentru fiecare caz analizat. Grosimea semifabricatului modelat a fost de 0,2mm.

Au fost efectuate un număr de trei simulări pentru fiecare tip de element. În fiecare simulare a fost modificat numărul de elemente finite din rețeaua de discretizare și anume 500, 1000 și 5000 elemente. Poansonul de ambutisare a avut o deplasare de 5 mm. Pentru fiecare număr de elemente finite a fost reprezentată variația forță-deplasare respectiv distribuția tensiunii echivalente Von Mises și apariția stricțiunii materialului piesei modelate. Simulările efectuate au fost simulări bidimensionale.

7.1.1. Rezultate ale modelării - determinarea zonei de apariție a găturii materialului

Apariția zonelor de stricțiune a materialului în cazul modelării proceselor de ambutisare a fost obținută în urma simulării numerice a proceselor de ambutisare a tablelor din nichel.



500BLZ2D

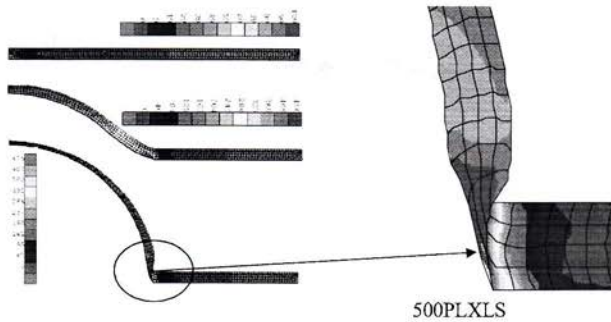


Figura 7.1. Apariția zonei de stricțiune în piesele modelate. Numarul de elemente finite utilizate pentru rețeaua de discretizare a fost 500

Zonele de apariție a stricțiunii permit prezicerea posibilităților de apariție a fisurilor sau a cutelor pe suprafața respectiv în interiorul piesei ambutisate. Cunoșterea zonelor sensibile în ceea ce privește apariția stricțiunii respectiv a apariției fisurii ulterioare, permite eliminarea acestor defecte în cazul aplicațiilor practice de ambutisare. Se observă faptul că zonele de stricțiune apar la racordarea dintre flanșa piesei ambutisate sferic și corpul piesei respective în toate cazurile analizate.

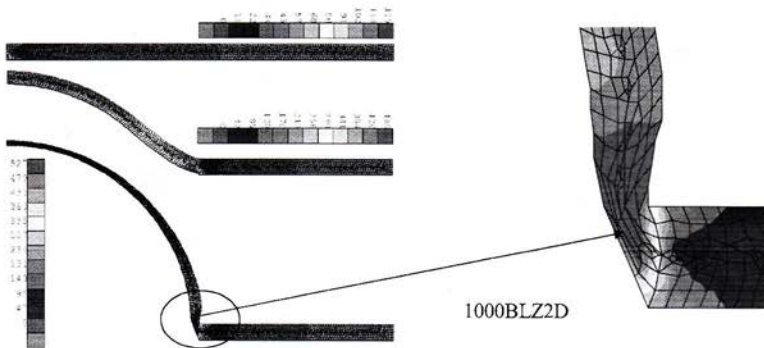


Figura 7.2. Apariția zonei de stricțiune în piesele modelate. Numarul de elemente finite utilizate pentru rețeaua de discretizare a fost 1000.

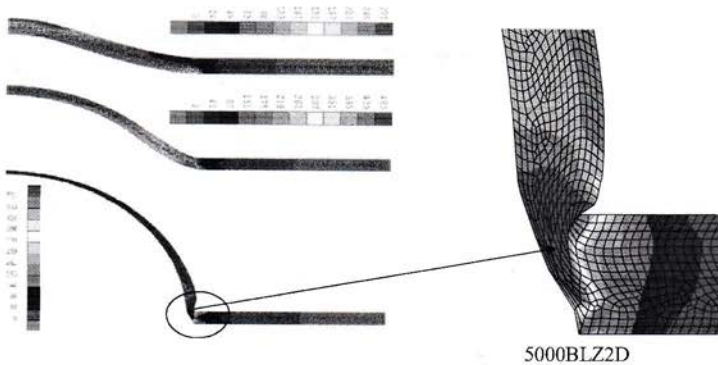


Figura 7.3. Evoluția forță-deplasare pentru 5000 de elemente finite de tip BLZ2D și PLXLS

În ceea ce privește distribuția tensiunii echivalente în interiorul pieselor modelate se observă că valoarea maximă a acestei tensiuni se obține în cazul utilizării unui număr de 5000 de elemente finite pentru rețeaua de discretizare a semifabricatului.

Localizarea valorii maxime a tensiunii echivalente respectiv distribuția acesteia în piesa ambutisată începe din centrul piesei respectiv din zona de contact dintre poansonul cu cap sferic și semifabricat și se distribuie în mod uniform atât în grosimea semifabricatului cât și pe circumferința piesei modelate.

7.2. Conceperea unui model de tip „compozit” utilizat în modelarea proceselor de ambutisare

Odată cu reducerea raportului grosimea/ mărimea grăuntelui, grăunții aflați în stratul de la suprafață devin predominanți fapt care conduce la o modificare a comportamentului mecanic. Mecanismul responsabil pentru acest comportament diferit este comportarea diferită a grăunților din straturile de la suprafață comparativ cu grăunții aflați în interiorul materialului. Modelarea comportării materialelor supuse deformării plastice utilizând acest model de tip „compozit” se bazează pe utilizarea a două legi constitutive de tip elastoplastic, suprafață/volum/suprafață.

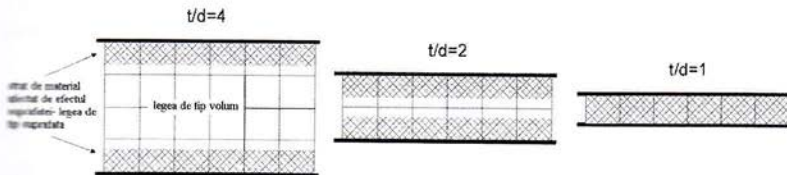


Figura 7.4. Reprezentarea schematică a modelului de tip „compozit”.

$$\sigma = \sigma_s \frac{V_s}{V_t} + \sigma_v \frac{V_v}{V_t} \quad (7.1)$$

unde: σ_s este valoarea tensiunii corespunzătoare modelului care ia în considerare efectul stratului de suprafață (2/3 din grăunțele aflate în stratul de suprafață este considerat ca fiind afectat de efectul de suprafață); σ_v valoarea tensiunii corespunzătoare modelului care nu ia în considerare efectul stratului de suprafață- acest model consideră că toți grăunții se comportă în mod similar indiferent de poziția pe care o ocupă în interiorul materialului deformat; V_s - volumul stratului de suprafață; V_v -volumul stratului interior; V_t -volumul total al tablei considerate.

7.2.1. Modelarea procesului de ambusare sferică prin utilizarea modelului „simplu”

De-a lungul timpului au fost dezvoltate diferite modele cu ajutorul cărora a fost caracterizat răspunsul mecanic al materialelor metalice supuse diferitelor stări de tensiuni, stări care au condus la deformații remanente și la obținerea unor piese cu diferite forme și dimensiuni.

Dezvoltarea micro-tehnologiilor din ultimii ani a condus la abordări din ce în ce mai complexe cu privire la modelarea comportamentului mecanic al materialelor metalice astfel au fost dezvoltate modele cu ajutorul cărora materialul pur este considerat ca având o comportare de tip „compozit”.

Noile abordări care iau în considerare straturile superficiale ale materialelor metalice conțin grăunți cristalini care influențează procesul de deformare prin faptul că o mare parte din suprafața lor este liberă comparativ cu grăunții din interiorul materialului care sunt înconjurați de alți grăunți.

Datorită suprafeței libere a acestor grăunți dislocațiile pot ieși mai ușor la suprafața materialului fapt care conduce la o reducere a rezistenței materialului respectiv [Keller, 2010].

Poate fi observat în figura 7.5 faptul că odată cu reducerea grosimii semifabricatului inițial se obține și o reducere a forței de ambusare.

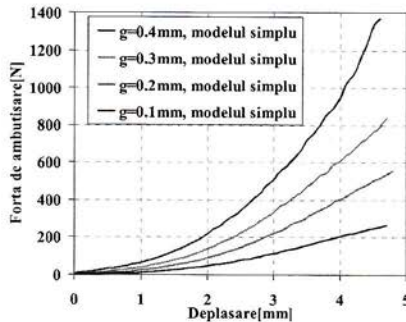


Figura 7.5. Variația forță-deplasare pentru modelul „simplu”

Reducerea grosimii conduce la reducerea raportului grosimea/mărimea grăunțului ceea ce implică creșterea numărului de grăunți din suprafațele libere ale semifabricatului și de aici poate fi concluzionat faptul că stratul de suprafață în cazul semifabricatelor foarte subțiri influențează în mod direct valoarea forței de ambutisare.

7.2.2. Modelarea procesului de ambutisare sferică prin utilizarea modelului de tip „compozit”

Modelarea comportamentului real al materialelor metalice supuse deformării plastice la rece poate fi efectuată prin considerare efectelor stratului de suprafață. Acest efect poate fi explicat prin faptul că odată cu reducerea raportului t/d grăunții de la suprafața materialului devin predominanți și comportarea materialului respectiv este determinată de comportarea acestora.

Modelul „compozit” este utilizat în cadrul acestui studiu pentru a analiza influența grosimii materialului deformat asupra forței de ambutisare în cazul proceselor de ambutisare sferică. Din figura 7.6 poate fi observată aceeași tendință ca și în cazul modelului de tip „simplu”.

Odată cu reducerea grosimii semifabricatului inițial se observă și o reducere a valorii forței de ambutisare.

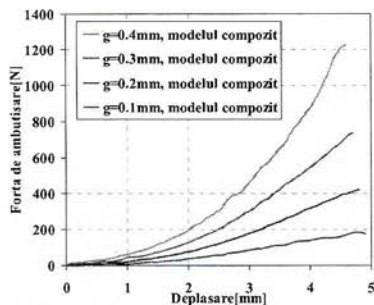


Figura 7.6. Variația forță-deplasare pentru modelul de tip „compozit”

Comparând figurile 7.5 și 7.6 se poate observa faptul că pentru fiecare dintre cele patru grosimi, materialul se deformează prin ambutisare la valori ale forțelor poansonului mai mici în cazul modelului ce ține cont de efectul stratului de suprafață comparativ cu modelul „simplu” care neglijează acest efect și consideră toți grăunții ca având aceeași comportare.

7.2.3. Rezultate privind modelarea procesului de ambutisare sferică a tablelor subțiri din nichel având diferite grosimi

Din rezultatele numerice obținute în urma modelării proceselor de ambutisare se observă faptul că între cele două modele utilizate există diferențe de aproximativ 100N în ceea ce privește forța de ambutisare.

Analizând din punct de vedere al influenței grosimii semifabricatului inițial asupra forței de ambutisare se observă că la o creștere a grosimii semifabricatului valoarea forței de ambutisare crește.

7.2.4. Determinarea distribuției tensiunilor echivalente Von Mises în secțiunea pieselor având grosimi submilimetrice

Material	Grosimea	Distribuția tensiunii în piesă	
Nichel Modelul de tip compozit	0,1		<p>Tablă din nichel, $g=0,1$mm Modelul compozit</p>
	0,2		<p>Tablă din nichel, $g=0,2$mm Modelul compozit</p>

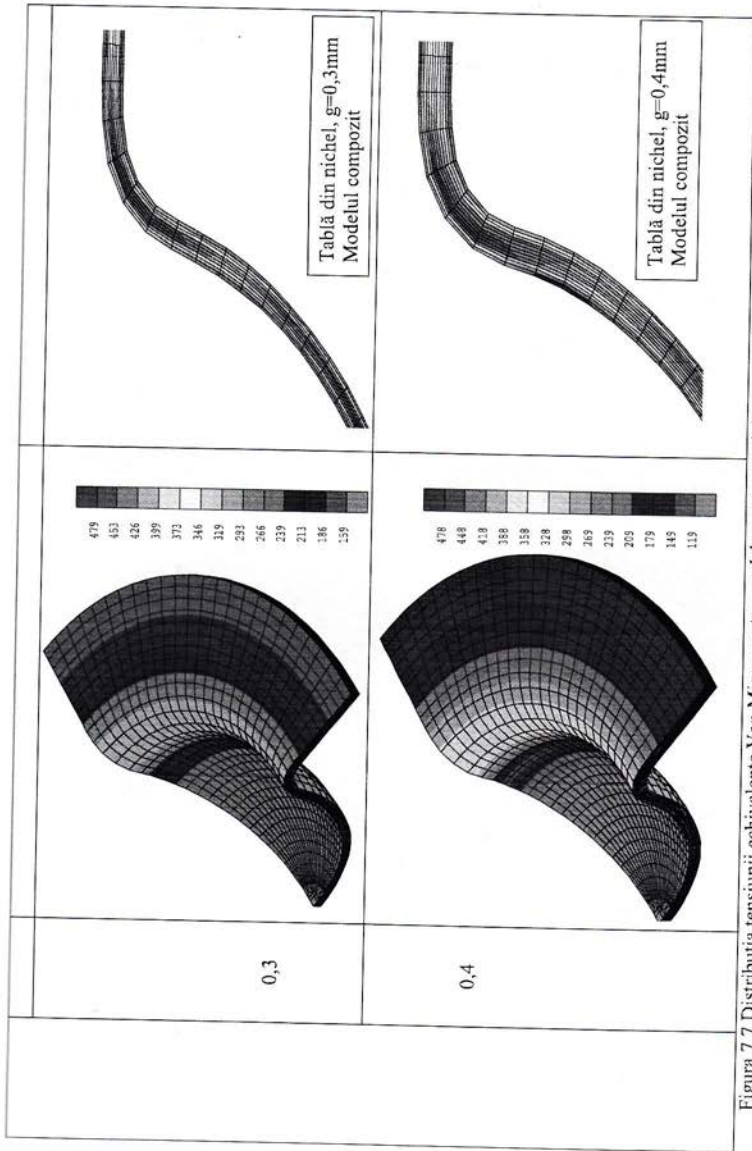
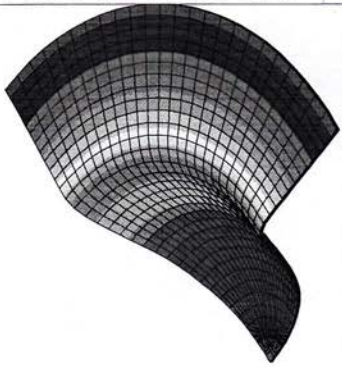





Figura 7.7 Distribuția tensiunii echivalente Von Mises pentru modelarea procesului de ambutsare sferică, modelul „compozit”

Distributia tensiunii echivalente Von Mises	
Material	Grosime
Nichel Modelul de tip simplu	0,1
	 <p>Tablă din nichel, $g=0,1\text{mm}$ Modelul simplu</p>
	0.2
	 <p>Tablă din nichel, $g=0,2\text{mm}$ Modelul simplu</p>

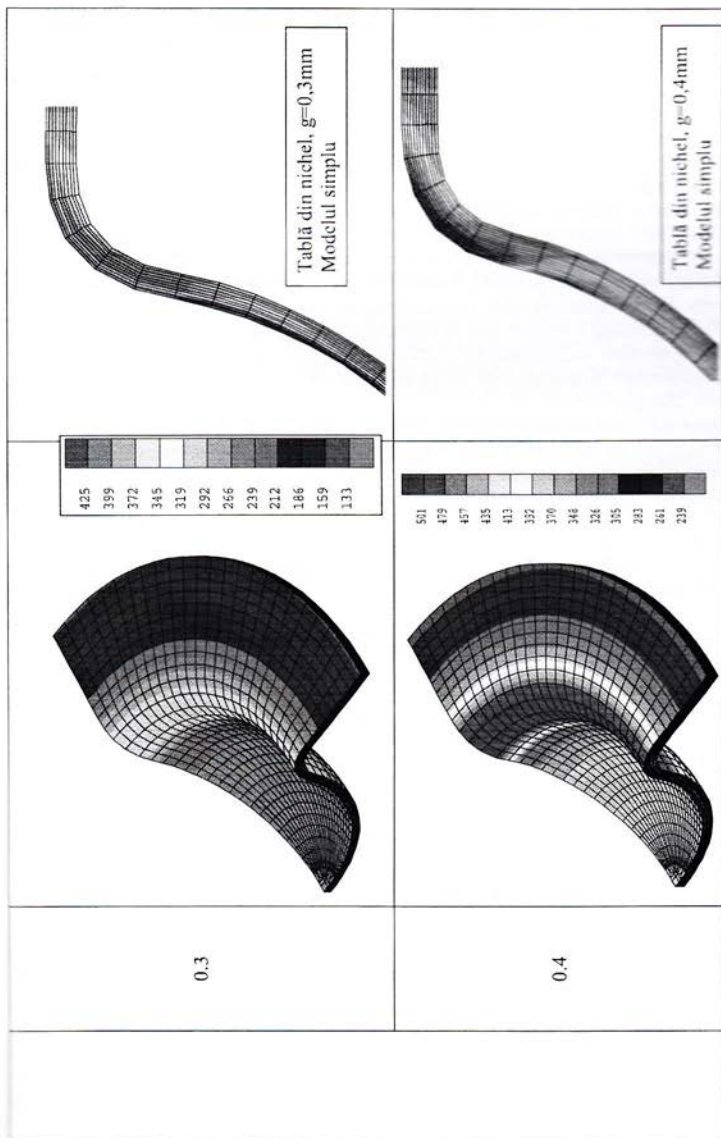


Figura 7.8. Distribuția tensiunii echivalente Von Mises pentru modelarea procesului de ambușare sferică, modelul „simplu”

Analizând rezultatele numerice obținute pentru distribuția tensiunii echivalente Von Mises în funcție de deformația echivalentă în secțiunile pieselor modelate se observă următoarele:

1. Modelul „compozit”

Figura 7.19 prezintă distribuția tensiunii echivalente Von Mises [MPa] într-un sfert din piesa modelată, pentru o creștere a grosimii de la 100 μ m la 400 μ m și pentru o adâncime de ambutisare de 5mm. Valoarea tensiunii este diferită pentru fiecare din cele patru cazuri analizate. Se observă că creșterea grosimii semifabricatului inițial determină o creștere a forței de ambutisare respectiv a tensiunii echivalente din interiorul piesei ambutisate. Utilizarea modelului „compozit” conduce la obținerea unei distribuții diferite în ceea ce privește tensiunea echivalentă Von Mises. Se observă că în straturile exterioare de material tensiunea echivalentă are valori reduse comparativ cu straturile interioare. Acest comportament poate fi explicat prin observațiile conform cărora 2/3 din grăunțele aflate în stratul exterior este afectat de apariția „efectului de suprafață”. Apariția acestui efect conduce la o reducere a valorii tensiunii echivalente. Calculele numerice au fost efectuate considerând faptul că grăunții cristalini au dimensiuni de 100 μ m caz în care grosimea afectată de apariția efectului de suprafață este de 66,66 μ m.

2. Modelul „simplu”

În figura 7.20 sunt prezentate piesele obținute prin modelarea procesului de ambutisare utilizând drept model de comportare modelul „simplu”. Modelul simplu este obținut pe baza rezultatelor experimentale ale testelor de tracțiune efectuate pe semifabricate din nichel având grosimea de 3.2mm având un singur grăunte pe grosime. Modelul simplu presupune utilizarea unei singure legi de comportare pentru toți grăunții aflați în straturile materialului deformat indiferent de poziția stratului sau a grăunțului interiorului stratului respectiv. Se observă faptul că tensiunea echivalentă maximă se obține în zona de racordare a peretelui piesei cu flanșa. Această observație a condus la ideea studierii efectului reducerii valorii razei de racordare a plăcii active asupra forțelor de ambutisare.

În ceea ce privește distribuția tensiunilor echivalente se observă faptul că spre exteriorul flanșei valoarea acestor tensiuni scade atât în cazul utilizării modelului „compozit” cât și în cazul modelului „simplu”.

7.3. Contribuții privind modelarea multi-scalară a proceselor de ambutisare

7.3.1. Cercetări asupra modelării influenței geometriei și dimensiunilor elementelor active asupra forțelor de ambutisare

În vederea validării modelului numeric pe baza rezultatelor experimentale, s-a modelat influența razei de racordare a plăcii active asupra forței de ambutisare. Modelul numeric utilizat a fost un model teoretic calculat cu ajutorul relației modelului „compozit”. Valorile tensiunii respectiv deformației au fost determinate cu ajutorul valorilor utilizate pentru cele două legi de comportare care alcătuiesc modelul compozit.

În figura 7.22 sunt prezentate graficele de evoluție forță-deplasare din analiza cărora poate fi observat că valoarea maximă a forței de ambutisare prezisă cu ajutorul modelului numeric propus este influențată de valoarea razei de racordare a matriței. Diferența dintre cele două valori este de aproximativ 1kN pentru ambele geometrii ale poansonelor de ambutisare.

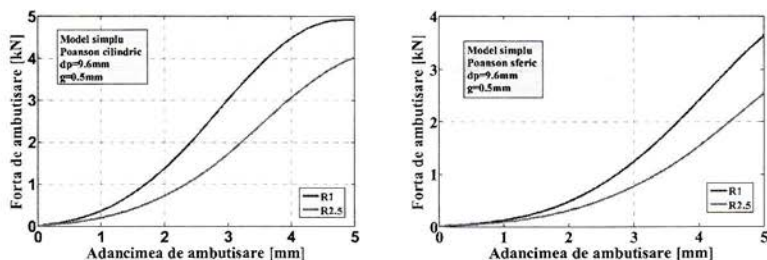


Figura 7.9. Forța versus deplasare pentru modelarea proceselor de ambutsare sferică și cilindrică

Odată cu reducerea valorii razei de racordare a matriței se produce și o creștere a suprafeței de reținere a semifabricatului fapt care are drept consecință pe de o parte creșterea valorii forței de ambutsare iar pe de altă parte se produce o reducere a curgerii materialului. Acest lucru poate conduce la apariția fisurilor respectiv la apariția unui fenomen de îngroșare a flanșei.

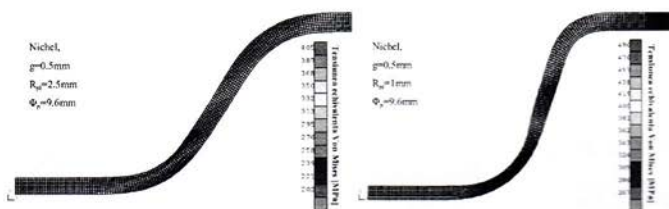


Figura 7.10. Distribuția tensiunii echivalente Von Mises în piesele modelate utilizând un poanson cu geometrie cilindrică

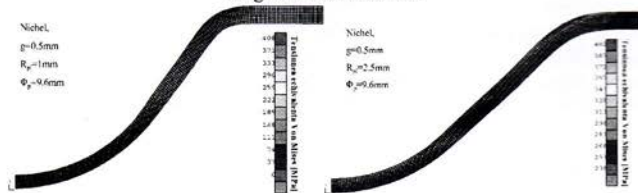


Figura 7.11. Distribuția tensiunii echivalente Von Mises în piesele modelate utilizând un poanson cu geometrie sferică

Rezultatele numerice obținute în urma modelării procesului de ambutsare a tablelor subțiri din nichel cu ajutorul modelului teoretic calculat a scos în evidență faptul că odată cu reducerea valorii razei de racordare a plăcii active forța necesară pentru deformarea materialului crește. Se observă din figura 7.11 că în ambele cazuri analizate atât în cazul poansonului cilindric

cât și în cazul poansonului sferic există diferențe în ceea ce privește valoarea tensiunii echivalente în funcție de valoarea razei de racordare a matriței. Diferența este de aproximativ 90 MPa în cazul unui poanson cu geometrie cilindrică în timp ce utilizarea unei geometrii sferice pentru poanson conduce la obținerea unor valori aproximativ egale pentru tensiunea echivalentă maximă.

7.3.2. Contribuții privind analiza prin modelare cu element finit a proceselor de microambutisare

7.3.2.1. Modelarea influenței geometriei și dimensiunilor elementelor active asupra forței de microambutisare

Modelarea proceselor de microambutisare a fost efectuată în cadrul Laboratorului ArGenCo, Universite de Liege, Belgia.

Analizând rezultatele obținute în cazul studiului efectuat pentru determinarea influenței grosimii semifabricatului asupra forței de microambutisare a fost stabilit faptul că pentru grosimi mai mici de 200 μm efectul stratului de suprafață poate fi neglijat și modelarea poate fi efectuată utilizând un singur model de comportare. Rezultatele modelării pot fi observate în figura 7.12.

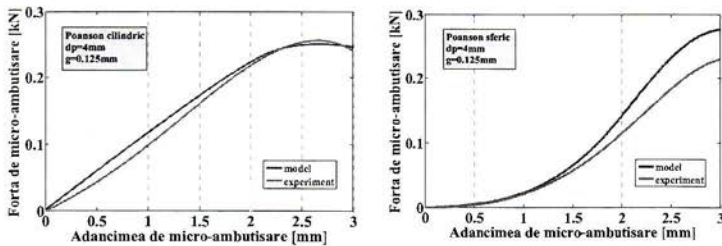


Figura 7.12 Rezultatele modelării procesului de micro-ambutisare sferică și cilindrică.

În ceea ce privește evoluția forței de microambutisare se observă faptul că valoarea forței în cazul poansonului cu cap cilindric este mai mare datorită zonei mari de contact dintre poanson și semifabricat. În cazul poansonelor sferice contactul dintre poanson și semifabricat este redus doar la o suprafață punctiformă, care face ca valoarea forței să se micșoreze.

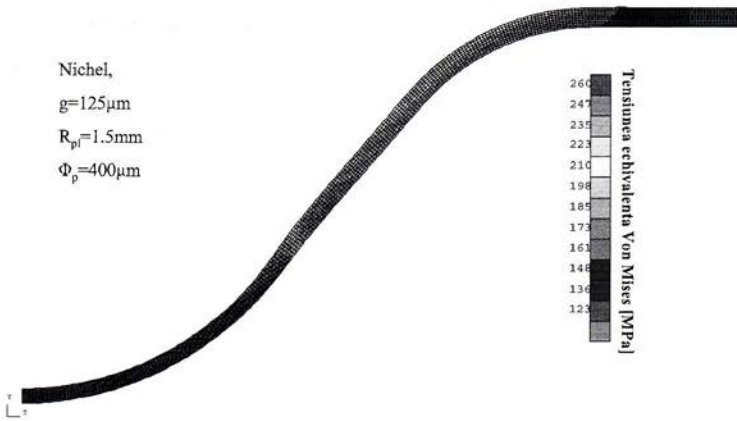


Figura 7.13. Distribuția tensiunii echivalente Von Mises în secțiunea micro-piesei modelate utilizând poansonul cu geometrie sferică.

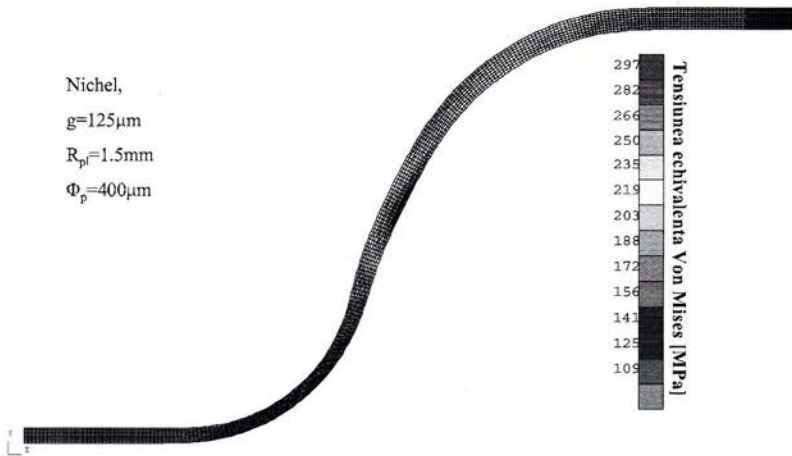


Figura 7.14. Distribuția tensiunii echivalente Von Mises în secțiunea micro-piesei modelate utilizând poansonul cu geometrie cilindrică.

7.4. Validarea modelului „compozit” pe baza rezultatelor experimentale

7.4.1. Validarea modelului „compozit” pentru procesele de ambutisare convențională a tablelor din nichel

Abordarea compozită a materialelor metalice pure apare în tendințele actuale în ceea ce privește modelarea comportării mecanice a acestor materiale. Datorită comportării diferite a grăunților cristalini din componentă micro-structurală a materialului respectiv au fost propuse diverse modele de comportare, modele bazate pe studiul influenței diferiților parametrii micro-structurali asupra comportării mecanice a materialelor metalice.

Modelul compozit propus de către [Keller, 2010] este un model redus cu ajutorul căruia pot fi modelate efectele diferitelor stări de tensiune aplicate asupra metalelor astfel încât efectul acestor stări de tensiune să poate fi discretizat în mod diferit pentru straturile de material.

Modelul compozit propus și utilizat în cadrul acestei lucrări ia în considerare faptul că straturile de grăunți aflați pe suprafața exterioară a materialului au o comportare diferită față de straturile interioare fapt evidențiat de figurile care prezintă evoluția tensiunii echivalente Von Mises în secțiunile pieselor modelate.

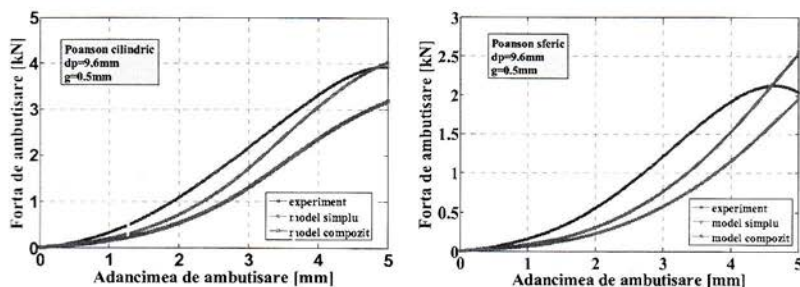


Figura 7.15. Validarea modelului compozit pe baza rezultatelor experimentale

Analiza rezultatelor obținute în ceea ce privește evoluția și distribuția tensiunilor echivalente în straturile materialului supus deformării conduce la concluzia conform căreia straturile exterioare prezintă tensiuni echivalente mai reduse comparativ cu straturile din interiorul materialului. Acest lucru poate fi explicat cu teoria deplasării dislocațiilor, astfel deplasarea dislocațiilor în straturile interioare ale materialului este împiedicată de grăunții existenți în straturile vecine fapt care conduce la o creștere a valorii tensiunii în straturile interioare. În straturile exterioare ale materialului dislocațiile pot ieși la suprafața liberă a materialului fapt care produce o relaxare a tensiunilor deci o reducere a valorii tensiunii echivalente din aceste straturi.



Figura 7.16. Distribuția tensiunii echivalente Von Mises în secțiunea micro-pieseii modelate utilizând poansonul cu geometrie cilindrică



Figura 7.17. Distribuția tensiunii echivalente Von Mises în secțiunea micropieseii modelate utilizând poansonul cu geometrie sferică

Datorită dificultății de măsurare a valorii coeficientului de frecare real existent între semifabricatul din nichel și elementele active în cazul deformării plastice prin ambutisare respectiv microambutisare s-a efectuat un studiu numeric privind influența valorii coeficientului de frecare asupra forței de deformare.

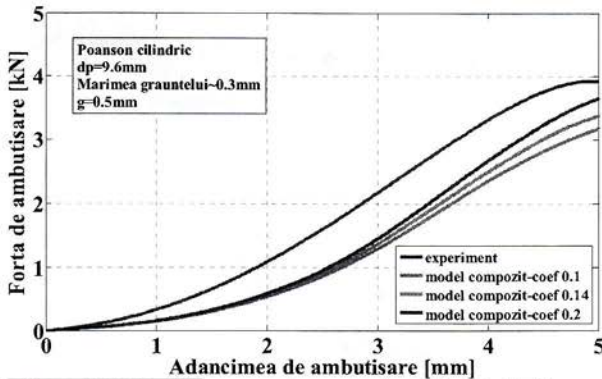


Figura 7.18. Identificarea numerică a valorii coeficientului de frecare

Rezultatele numerice au evidențiat faptul că valoarea coeficientului de frecare are influența asupra valorii prezise pentru forța de ambutisare. Se poate observa faptul că diferența dintre valoarea maximă a forței de ambutisare obținută în urma testelor experimentale de ambutisare a pieselor cilindrice cu flanșă și valoarea numerică obținută pentru același parametru se reduce odată cu creșterea valorii coeficientului de frecare dintre tabla de nichel supusă deformării și elementele active.

7.5. Concluzii privind modelarea comportamentului mecanic al tablelor subțiri din nichel supuse proceselor de ambutisare

Datorită faptului că materialele metalice sunt materiale policristaline în cadrul acestui capitol s-a încercat evaluarea efectului straturilor de grăunți asupra comportării mecanice a materialelor metalice supuse proceselor de îndoire și ambutisare a foilor subțiri din nichel.

În cazul procesului de ambutisare a fost considerat atât un poanson cu cap sferic cât și un poanson cu cap cilindric.

Modelul de tip „compozit” a fost utilizat pentru a caracteriza comportarea diferită a grăunților aflați în interiorul materialului.

Comparând rezultatele se poate observa faptul că elementele de tip BLZ2D sunt elementele care din punct de vedere al timpului de calcul oferă un avantaj.

Unul dintre principalele fenomene implicate de micro-deformarea plastică a materialelor metalice este „efectul reducerii dimensionale”.

Efectul reducerii dimensionale apare odată cu reducerea dimensională și este evident atât pentru materialul deformat cât și pentru sculele utilizate.

Efectul reducerii dimensionale poate fi împartit în efect al reducerii dimensionale a semifabricatului utilizat și efect datorat caracteristicilor microstructurale ale materialului deformat.

Capitolul 8. Concluzii și contribuții aduse în domeniu

Concluzii

Directiile de cercetare desprinse din stadiul actual au fost dezvoltate, obținându-se o cuplură a comportării atomice la nivel nano a materialelor cu structura cristalină cubică cu fețe centrate (CFC) cu analiza multiscalară utilizând variabile de stare. Aceste variabile intră în descrierea legii de comportare la scară microscopică, permițând astfel analiza multiscalară prin modelare numerică cu element finit a microdeformării plastice, respectiv a microambitusării tablelor subțiri de Ni 99,999%. Aceste variabile de stare exprimă relații între entropia elastică, densitatea dislocațiilor, nivelul forțelor inter-atomice și forțele generate între dipolii unui lanț de dislocații din cadrul unui tub de vacanțe.

Modelul de plasticitate cristalină dezvoltat, bazat pe modelul Evers 2003, a fost implementat în programul FEAP, iar identificarea variabilelor de stare a permis îndeplinirea acestuia cu legea de comportare a materialelor Swift, și astfel, să se poată realiza simularea numerică a unui proces industrial și anume microambitusarea.

În urma cercetărilor realizate, au rezultat *contribuții* ce deschid noi direcții de cercetare. Acestea sunt următoarele:

- ◆ A fost elaborat modelul de răspuns mecanic al monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [001].

- ◆ Prin experimente numerice, a fost determinat planul optim și numărul maxim al sistemelor de alunecare din monocristalul de nichel 99,999%, material care are structura cubică cu fețe centrate. Astfel, modelarea răspunsului mecanic al monocristalului de nichel orientat după direcția cristalografică [001] a permis reprezentarea, cu ajutorul unui program conceput în Matlab, a evoluției densităților de dislocații în interiorul monocristalului.

- ◆ A fost stabilită o corelație între orientarea cristalografică a fiecărui grăunte cristalin în parte și comportamentul întregii structuri policristaline asupra căreia acționează sollicitări în diferite direcții. Modelul redus de plasticitate cristalină, validat pentru monocristale, a fost aplicat și în cazul modelării testelor de tracțiune biaxială a policristalelor de nichel.

- ◆ A fost identificat setul de coeficienți pentru monocristalul de Ni corespunzător modelului de plasticitate cristalină, pe bază pe modelul [Evers, 2003], dezvoltat și implementat în programul de element finit Lagamine.

- ◆ Modelul redus de plasticitate cristalină astfel obținut a fost implementat în soft-ul de modelare cu element finit FEAP și aplicat pentru cazul modelării mono-cristalelor de nichel. Validarea modelului respectiv s-a realizat pe baza datelor experimentale obținute în cadrul Laboratorului Crismath, Universitatea din Caen. Câteva elemente teoretice despre mecanismele ce stau la baza plasticității cristaline sunt prezentate precum și ecuațiile matematice pentru caracterizarea interacțiunii dintre aceste mecanisme. Utilizarea soft-ului de modelare cu element finit FEAP face posibilă o analiză numerică bazată pe datele experimentale privind orientările mono-cristalelor în interiorul unui

policristal. Măsurarea unghiurilor lui Euler care determină orientările mono-granulare au fost efectuate utilizând tehnica EBSD în cadrul Universității din Caen.

◆ Prin modelare numerică și analize microscopice TEM, EBSD ca și analiza texturii, prin evoluția indusă a dislocațiilor și facilitarea activării planelor de alunecare, s-a determinat un set de coeficienți ce corespund policristalului de Ni de puritate 99,999% care este referința în utilizarea modelelor de plasticitate cristalină. Din categoria metalelor cubice cu fețe centrate există astfel de baze de date pentru Cu și Al. Prin cercetările efectuate în cadrul acestei teze s-a determinat pentru prima dată această bază de date pentru Ni.

◆ A fost realizată modelarea multiscalară a procesului de ambutisare convențională și microambutisare ținând seama de modificarea intimă a microstructurii deformate și transferând aceste informații într-o lege de comportare a materialului deformat prin definirea unor variabile interne ce caracterizează evoluția dislocațiilor din material. Astfel, se realizează modelarea procesului de ambutisare la scară macro, ținând seama de o caracterizare la nivel nano a fenomenelor responsabile pentru capacitatea de deformare a materialului.

◆ A fost proiectat și realizat un echipament de ambutisare modulată destinat atât ambutisării convenționale (diametrul poansonului 9,6 mm) cât și microambutisării (diametrul poansonului 4mm), dotat cu plăci active interschimbabile, ce permite variația razelor de racordare a pieselor ambutisate.

◆ S-au determinat curbele forta-deplasare la ambutisarea și microambutisarea pieselor din Ni99,999%, cu raportul $t/d=1$, ceea ce permite utilizarea acestora date experimentale ca referințe în validarea modelelor de plasticitate cristalină. Prin publicarea acestor rezultate experimentale, se vor atrage citări ale acestui studiu experimental.

◆ S-a realizat un studiu experimental al diferențelor care există la ambutisarea și microambutisarea tablelor de nichel și de oțel carbon de calitate, făcându-se o analiză a efectului diminuării scării de ambutisare asupra aspectului general al evoluției dependentei forta-deplasare.

◆ A fost validat experimental modelul de tip "compozit" utilizat în cazul simulărilor numerice a proceselor de ambutisare, care ține seama de interfața dintre graunte și suprafața liberă a tablei supusă deformării, ce determină o anumită cinetică a evoluției dislocațiilor. A fost aplicat modelul de tip "compozit" pentru caracterizarea răspunsului mecanic al materialelor metalice pure (Ni99,999%) și s-a creat o legătură spre aliajele cu concentrații mai mici de Ni, utilizate în construcția MEMS-urilor.

Bibliografie selectivă:

1. Adamus J., *Forming of the titanium implants and medical tools by metal working*, Archives of Materials Science and Engineering, Volume 28, Issue 5, 313-316, 2007.
2. **Afteni M.**, Banu M., Habraken A. M., Keller C., Duchene L., *Influence of grain position on the mechanical response of nickel thin sheets undergo to large deformations*, 1st International Conference: Research Quality in Doctoral School, Increased Industrial and International Visibility, Galati, 2010.
3. **Afteni M.**, Banu M., Paunoiu V., Keller C., Patriche S., *The influence of die radius on the material flow and deep drawing force in case of micro-deep drawing of nickel and steel*, 2th International Conference: Research Quality in Doctoral School, Increased Industrial and International Visibility, Galati, 2011.
4. **Afteni M.**, Banu M., Paunoiu V., Constantin I., *Influence of the tools geometries on the deep-drawing force*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, ISSN 1221-4566, Volume II, 2011 (publicare februarie 2012).
5. **Afteni M.**, Banu M., Paunoiu V., Constantin I., *Influence of the dislocation distribution in micro-deep-drawing of the thin Ni 99.999% sheets*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, ISSN 1221-4566, Volume II, 2011 (publicare februarie 2012).
6. Fung-Huei Yeh, Ching-Lun Li, Yuung-Hwa Lu, *Study of thickness and grain size effects on material behavior in micro-forming*, Journal of Materials Processing Technology, 201, 237-241, 2008.
7. Gong, F., Guo, B., Wang, C., Shan D., *Micro deep drawing of micro cups by using DLC film coated blank holders and dies*, Diamond & Related Materials, 20, 196-200, 2011.
8. Haasen P., Max-Planck, *Plastic deformation of Nickel single crystals at low temperatures*, Institut for the study of metal, University of Chicago, U. S. A., and Institut fuer Metallforschung, Stuttgart, Germany, January 1958.
9. Habraken A.M., Duchene L., *Anisotropic elasto-plastic finite element analysis using a stress-strain interpolation method based on a polycrystalline model*, International Journal of Plasticity, 8-9, 1525-1560, 2004.
10. Hu Z., Vollertsen F., *Modelling of friction with respect to size effects*, Int. J. Mater. Form., ESAFORM 2008.
11. Keller C., Hug E., Chateigner D., *On the origin of the stress decrease for nickel polycrystals with few grains across the thickness*, Materials Science and Engineering A 500, 207-215, 2009.
12. Keller, C., **Afteni, M.**, Banu, M., Habraken, A. M., Hug, E., Castagne, S., Duchene, L., *Influence of Surface Effect on Nickel Micro Deep Drawing Process*, NUMIFORM 2010, Vols. 1 and 2, Vol. 1252, pp 1025-1030, Published: 2010.
13. Lam Y. C., Tran N. K., Yue C.Y., Tan M. J., *New deformation phenomenon for micro-formability of polycrystalline materials*, Materials Science and Engineering A 528, 1906-1909, 2011.
14. Lai X., Peng L., Hu P., Lan S., Ni J., *Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects*, Computational Materials Science 43, 1003-1009, 2008.
15. Liu R., Wang H., Li X., Ding G., Yang C., *A micro-tensile method for measuring mechanical properties of MEMS materials*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 18, doi: 10.1088/0960-1317/18/6/065002, 2008.

16. Li L., Zhou Q., Zhou Y.Y., Cao J.G., *Numerical study on the size effect in the ultra-thin sheet's micro-bending forming process*, Materials Science and Engineering, A 499, 32–35, 2009.
17. Ma A., Roters F., Raabe D., *Experiments and simulations on the micromechanics of single- and polycrystalline materials*, Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications, 78-83, 2004.
18. Messner A., Engel U., Kals R., Vollertsen F., "Size effect in the FE-simulation of micro-forming processes", Journal of Materials Processing Technology, 45, 371-376, 1994.
19. Qin Y., *Micro-forming and miniature manufacturing systems—development needs and perspectives*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 177, pp 8–18, 2006.
20. Raulea L. V., Goijaerts A. M., Govaert L.E., Baaijens F. P. T., *Size effects in the processing of thin metal sheets*, Journal of Materials Processing Technology, 115, pp 44-48, 2001.
21. Rosochowski, A., Presz, W., Olejnik, L., Richert, M. *Micro-extrusion of ultra-fine grain aluminium*, Int J Adv Manuf Technol DOI 10.1007/s00170-007-0955-6.
22. Saotome, Y., Yasuda, K., Kaga, H., *Microdeep drawability of very thin sheet steels*. J. Mater. Process. Technol., 113, 641–647, 2001.
23. Shan De-bin, Wang Chun-ju, Guo Bin, Wang Xin-wei, *Effect of thickness and grain size on material behavior in micro-bending*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19, 507-510, 2009.
24. Vliet V. M. R. A., Mier V. J. G. M., *Effect of strain gradients on the size effect of concrete in uniaxial tension*, International Journal of Fracture, 95, 195–219, 1999.
25. Vollertsen F., Hu Z., Niehoff H.S., Theiler C., *State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing*. J. Mater. Process. Technol., 155, 70–79, 2004.
26. Vollertsen, F., Niehoff, S. H., Hu, Z., *State of the art in micro forming*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, 1172–1179, 2006.
27. Wang S., Zhuang W., Balint D., Lin J., *A virtual crystal plasticity simulation tool for micro-forming*, Procedia Engineering 1, 75–78, 2009.
28. Wang C., Shan D., , Guo B.) Zhou J., Sun L., *Key Problems in Microforming Processes of Microparts*, J. Mater. Sci. Technol., Vol.23 No.2, 283-288, 2007.
29. Wang W., Huang Y., Hsia K.J., Hu K.X., Chandra A., *A microbend test method for measuring the plasticity length-scale*, International Journal of Plasticity, 19, 365–382, 2003.
30. Wielage H., *Forming Behaviour in Laser Shock Drawing*, International Conference on High Speed Forming, 213-222, 2008.

