



UNIVERSITATEA "LUCIAN BLAGA" DIN SIBIU

FACULTATEA DE INGINERIE

Ing. Dipl. Adrian BLAGA

TEZĂ DE DOCTORAT - *rezumat*

***Contribuții la deformarea incrementală a
tablelor metalice subțiri***

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. Octavian Bologa

**Sibiu
- 2011 -**



Investește în oameni!

PROIECT FINANȚAT DIN FONDUL SOCIAL EUROPEAN

ID proiect: 7706

Titlul proiectului: „Creșterea rolului studiilor doctorale și a competitivității doctoranzilor într-o Europă unită”

Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu

B-dul Victoriei, nr. 10. Sibiu

Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu

Facultatea de Inginerie

Teză de doctorat

***Contribuții la deformarea incrementală a tablelor
metalice subțiri***

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Octavian Bologna

Doctorand:

Ing. Dipl. Adrian BLAGA

Sibiu, 2011

	nr. pag. rezumat	nr. pag. teză
CUPRINS		
CUPRINS	1-	1
1 INTRODUCERE	3-	3
1.1 MOTIVAREA CERCETĂRIILOR EFECTUATE ÎN CONTEXTUL TEMEI ABORDATE ...	3-	3
1.2 EVOLUȚIA ȘI STRUCTURA TEZEI	4-	4
2 STADIUL ACTUAL PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ A		
TABLELOR METALICE	6-	6
2.1 DEFINIREA PROCEDEULUI.....	6-	6
2.2 CLASIFICAREA PROCEDEELOR DE DEFORMARE INCREMENTALĂ.....	7-	7
2.3 PRINCIPALELE PROCEDEE DE DEFORMARE INCREMENTALĂ.....	10-	10
2.3.1 <i>Deformarea incrementală cu role</i>	10-	10
2.3.2 <i>Deformarea incrementală cu poanson</i>	10-	19
2.3.3 <i>Deformarea incrementală cu jet de apă</i>	13-	31
2.3.4 <i>Deformarea incrementală cu laser</i>	13-	35
2.3.5 <i>Deformarea incrementală cu jet de bile</i>	14-	36
2.4 CERCETĂRI PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ.....	15-	38
2.4.1 <i>Cercetări analitice</i>	15-	38
2.4.2 <i>Cercetări prin metoda elementului finit</i>	16-	40
2.4.3 <i>Cercetări experimentale</i>	16-	42
2.5 CONCLUZII.....	17-	46
3 CERCETĂRI TEORETICE PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ A		
TABELOR METALICE SUBȚIRI	19-	48
3.1 INTRODUCERE.....	19-	48
3.2 DETERMINAREA RELAȚIILOR DE CALCUL ALE DEFORMAȚIILOR ȘI FORȚELOR LA		
DEFORMAREA INCREMENTALĂ CU POANSON	19-	48
3.2.1 <i>Determinarea relațiilor de calcul ale deformațiilor</i>	19-	48
3.2.1.1 <i>Determinarea unghiului de contact θ_i</i>	22-	51
3.2.1.2 <i>Determinarea unghiului de contact δ_i</i>	23-	53
3.2.1.3 <i>Calculul lungimii segmentelor l_i</i>	24-	57
3.2.1.4 <i>Stabilirea relației de calcul a gradului de deformare logaritmic pe</i>		
<i>direcția x</i>	26-	62
3.2.2 <i>Determinarea relațiilor de calcul ale forțelor de deformare</i>	27-	63
3.3 STUDIUL TEORETIC AL VARIAȚIEI DEFORMAȚIILOR ȘI FORȚELOR	28-	64
3.4 CONCLUZII.....	30-	68
4 SIMULAREA NUMERICĂ A PROCEDEULUI DE DEFORMARE		
INCREMENTALĂ „ÎNTR-UN SINGUR PUNCT” PRIN METODA		
ELEMENTULUI FINIT	31-	70
4. 1 METODA DE ANALIZĂ FOLOSITĂ PENTRU MODELARE	31-	73

4.2 MODELELE CU ELEMENT FINIT UTILIZATE ÎN STUDIUL PROCEDEULUI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ	32- 83
4.3 DETERMINAREA INFLUENȚEI PARAMETRILOR GEOMETRICI ASUPRA DEFORMAȚIILOR PRINCIPALE ÎN PROCEDEUL DE DEFORMARE INCREMENTALĂ ÎNTR-UN SINGUR PUNCT.....	33- 87
4.4 DISTRIBUȚIA DEFORMAȚIILOR PE PIESĂ LA DEFORMAREA INCREMENTALĂ ÎNTR-UN SINGUR PUNCT.....	35- 90
4.5 DETERMINAREA FORȚELOR LA DEFORMAREA INCREMENTALĂ	38- 98
4.6 DETERMINAREA REVENIRII ELASTICE	40-102
4.7 CONCLUZII.....	41-105
5 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ A TABELOR METALICE SUBȚIRI.....	42-106
5.1 INSTALAȚIILE EXPERIMENTALE	42-106
5.2 DETERMINAREA CARACTERISTICELOR MECANICE ALE MATERIALELOR PRIN ÎNCERCAREA LA TRACȚIUNE.....	44-114
5.3 DETERMINAREA CURBELOR LIMITĂ DE DEFORMARE (CLD)	45-118
5.4 DETERMINAREA DEFORMAȚIILOR LA DEFORMAREA INCREMENTALĂ ”ÎNTR-UN SINGUR PUNCT”	45-120
5.4.1 <i>Influența parametrilor geometrici asupra distribuției deformațiilor ...</i>	<i>46-121</i>
5.4.2 <i>Influența modului de deformare asupra distribuției deformațiilor</i>	<i>52-139</i>
5.5 DETERMINAREA FORȚELOR LA DEFORMAREA INCREMENTALĂ „ÎNTR-UN SINGUR PUNCT”	59-158
5.5.1 <i>Influența parametrilor geometrici asupra forțelor</i>	<i>59-159</i>
5.5.2 <i>Influenta modului de deformare asupra forțelor</i>	<i>61-167</i>
5.6 DETERMINAREA PRECIZIEI GEOMETRICE.....	65-176
5.7 CONCLUZII.....	68-178
6 CONCLUZII. PRINCIPALELE CONTRIBUȚII ALE LUCRĂRII.....	69-180
6.1 CONCLUZII FINALE	69-180
6.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI POSIBILE DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE	71-182
BIBLIOGRAFIE	74-185

1 INTRODUCERE

În ultimul timp în cadrul industriei producătoare de piese prin deformare plastică a apărut fabricația flexibilă, adaptarea producției la cerințele tot mai diversificate ale consumatorilor. Procedeele prin care se realizează piese prin deformare plastică sunt, în general, procedeele de ambutisare, ambutisare adâncă, tragere pe calapod sau hidroformare, procedee pentru realizarea de piese în serii mari și de masă. Aceste procedee sunt însă costisitoare, deoarece este necesară fabricarea de scule având forma piesei care se dorește să se realizeze, iar pentru fabricarea unui nou produs este necesară realizarea unui set nou de scule active.

Mai recent, au apărut noi procedee de deformare plastică, cum ar fi procedeele de deformare incrementală care înlătură acest neajuns. Pentru realizarea de piese prin acest procedeu nu sunt necesare scule active costisitoare, iar pentru realizarea unui nou produs este necesară doar schimbarea programului CNC al utilajului, în cazul deformării incrementale a tablelor metalice realizate pe mașini de frezat, fiind un procedeu de deformare foarte flexibil. În același timp, datorită faptului că scula de deformat se deplasează după un contur prestabilit, timpul de deformare este cu mult mai îndelungat decât în cazul procedeelelor de deformare clasice. Datorită timpului îndelungat de deformare, dar având, în același timp, un grad mare de flexibilitate, acest procedeu de deformare se pretează pentru serii mici de fabricație a pieselor și producția de piese unicat sau prototiparea rapidă.

1.1 Motivarea cercetărilor efectuate în contextul temei abordate

Procedeul de deformare incrementală a tablelor metalice reprezintă o metodă modernă de deformare plastică, cu un potențial enorm în ceea ce privește gradul de flexibilitate și personalizare a pieselor obținute prin acest procedeu.

În cadrul procedeuului analizat, deformarea se realizează prin intermediul unui poanson controlat numeric. Acesta parcurge o traiectorie definită de programul CNC al mașinii cu comandă numerică, pe care se realizează deformarea. Materialul este deformat parțial doar în zona care intră în contact cu poansonul, de aici și denumirea de deformare plastică incrementală, materialul deformându-se treptat.

Deși cercetările în domeniu au început să fie din ce în ce mai numeroase, încă nu s-a studiat distribuția deformațiilor în piesă, modul cum acestea variază în funcție de geometria piesei deformate, modul în care influențează strategia de deformare distribuția acestora, dar și cum influențează diverși parametri mărimile lor.

Cercetările efectuate în cadrul tezei își propun determinarea deformațiilor pe piesele obținute în urma derulării procedurii de deformare incrementală „într-un singur punct”. Pe parcursul cercetărilor, s-au determinat influența parametrilor geometrici (diametrul poansonului, mărimea pasului vertical, unghiul de înclinare al pereților piesei etc.) asupra valorilor deformațiilor, influența modului de deformare asupra deformațiilor suferite de către semifabricat, în cazul obținerii aceleiași piese. Cercetările au fost efectuate cu diferite tipuri de traiectorii: traiectorie în vederea obținerii unui canal rectiliniu, unui trunchi de con, unui trunchi de piramidă sau a unei calote. În paralel cu determinarea deformațiilor, s-au determinat și forțele din cadrul procedurii de deformare plastică cercetată.

1.2 Evoluția și structura tezei

Tema tezei de doctorat se înscrie în preocupările colectivului Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice din cadrul Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, și a fost abordată în vederea cercetării unor aspecte legate de deformarea plastică incrementală a tablelor metalice.

În formularea obiectivelor lucrării de față au stat la bază concluziile desprinse din analiza și sinteza stadiului actual al cercetărilor în domeniul deformării incrementale a tablelor metalice.

Lucrarea cuprinde șase capitole în care sunt prezentate aspecte privind: stadiul actual al cercetărilor în domeniul deformării incrementale a tablelor metalice, determinări teoretice ale influenței unor parametri ai procesului asupra deformațiilor și forțelor la deformarea incrementală, simularea prin metoda elementului finit a comportării tablelor metalice la deformare, standurile experimentale utilizate pentru realizarea experimentelor, cercetări experimentale pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor analizate, determinarea distribuției deformațiilor pentru diverse traiectorii ale sculei și influența parametrilor geometrici asupra lor, determinarea forțelor și influența unor parametri asupra acestora, determinarea influenței unor parametri asupra preciziei geometrice.

În finalul tezei sunt prezentate sintetic concluziile și contribuțiile proprii în ceea ce privește abordarea cercetărilor și se face o evaluare globală a subiectului dezvoltat pe parcursul tezei, subliniindu-se posibilitățile lui de dezvoltare ulterioară.

Pentru îndrumarea competentă, încrederea și sprijinul primit pe toată durata pregătirii doctoratului, autorul își exprimă sincerele mulțumiri și deplina recunoștință față de îndrumătorul său științific, prof.univ.dr.ing. Octavian Bologa.

În această perioadă, autorul a beneficiat de sprijinul, îndrumarea sau înțelegerea unor oameni ale căror acțiuni au făcut posibilă desfășurarea și finalizarea cercetărilor sale. Se aduc astfel, și pe această cale, cele mai sincere mulțumiri și se exprimă sincera recunoștință în special față de colegii din cadrul colectivului MU, colegii din cadrul colectivului BPM, colegii din cadrul colectivului TCM, precum și față de numeroși alți colegi din cadrul Facultății de Inginerie care l-au ajutat pe autorul prezentei teze pe parcursul elaborării tezei cu sfaturi pertinente, analize critice ale etapelor parcurse, softuri și echipamente specifice de cercetare.

De asemenea, pentru facilitarea desfășurării stagiului de practică la Institut für Umformtechnik (IFU) - Universitatea din Stuttgart – Germania, precum și pentru tot sprijinul și bunăvoința arătate pe parcursul desfășurării acestui stagiu, autorul dorește să mulțumească prof.dr.ing. Matthias Liewald și dr.ing. Stefan Wagner de la IFU.

De asemenea, autorul mulțumește membrilor Comisiei de Doctorat pentru contribuția acestora în etapa de finalizare a lucrării și evaluarea acesteia.

Sunt dincolo de cuvinte, aprecierea și recunoștința pe care autorul le exprimă față de familia sa, pentru înțelegerea și susținerea morală pe care i le-au acordat în toți acești ani, în care considerentele de ordin profesional au fost puse pe primul plan

2 STADIUL ACTUAL PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ A TABLELOR METALICE

2.1 Definirea procedeului

Numele de deformare incrementală descrie o familie largă de procedee de deformare, toate caracterizate prin faptul că în orice moment doar o mică parte a semifabricatului este deformat, iar zona deformată se deplasează de-a lungul unei traiectorii prestabilite a sculei de deformare. Semifabricatul este prins într-un dispozitiv numit în lucrarea de față „sistem de fixare a semifabricatului”. Deformarea se poate realiza cu unul sau două elemente active. Elementul activ care produce în mod direct deformarea a fost denumit „element activ de deformare”. Elementul activ care contribuie la realizarea formei piesei parțial sau total a fost denumit „element activ de sprijin”.

În această categorie pot fi cuprinse atât o parte din procedeele clasice de deformare cât și alte procedee apărute relativ recent.

Principalele caracteristici ale procedeului de deformare incrementală sunt:

- procedeul nu necesită o matriță în accepțiunea clasică, ci doar un sistem de fixare a semifabricatului și elemente active de deformare care pot fi, de la caz la caz poansoane de dimensiuni reduse, role de deformare, dornuri, plăci active etc;
- procedeul este utilizat ca o alternativă a procedeelelor clasice în cazul fabricării unor piese de serie mică sau a prototipurilor;
- procedeul de deformare incrementală este lent în comparație cu procedeele convenționale de presare, dar nu necesită echipamente de prelucrare scumpe;
- timpul de fabricație a pieselor depinde de lungimea traiectoriei de deformare necesară pentru realizarea profilului dorit, de viteza elementului activ cu care se realizează deformarea și de puterea disponibilă a utilajului folosit;
- metoda de deformare prezintă o flexibilitate ridicată, cu același echipament putând fi fabricate diverse configurații și mărimi de piese;

- deformarea fiind localizată, rezultă că rămân zone netede nedeformate, iar în zonele deformate se produce o subțiere considerabilă a grosimii materialului;
- gradele de deformare obținute prin acest procedeu sunt mult mai mari decât cele obținute prin procedeele de presare convenționale, acest lucru făcând procedeu potrivit pentru prelucrarea materialelor greu deformabile;
- deformarea fiind asimetrică, stările de tensiuni și deformații din material sunt neuniforme fapt ce conduce la reveniri elastice considerabile în material, drept consecință precizia dimensională este mai scăzută decât în cazul unui procedeu de presare convențional, iar metodele de înlăturare a acestui inconvenient se află în stadiul de studiu.

2.2 Clasificarea procedeelelor de deformare incrementală

Cercetarea bibliografică realizată a relevat existența unei mari diversități de metode de prelucrare, dar nu s-a identificat o clasificare care să cuprindă toate aceste procedee.

Clasificarea procedeelelor poate fi făcută luând în considerare mai multe criterii.

O primă clasificare poate fi făcută în funcție de tipul semifabricatului utilizat. Astfel, procedeele pot fi defalcate în două mari grupe:

- deformarea incrementală a semifabricatelor volumice (masive);
- deformarea incrementală a semifabricatelor din tablă.

Din prima categorie fac parte forjarea orbitală, deformarea volumică radial rotativă, deformarea incrementală cu role în mișcare planetară etc.

Având în vedere tematica lucrării de față clasificarea procedeelelor de deformare incrementală va fi detaliată, în cele ce urmează, doar pentru cazul prelucrării semifabricatelor din tablă.

În funcție de elementul activ de deformare, procedeele pot fi:

- cu poanson;
- cu rolă/role;
- cu jet de apă;

- cu laser;
- cu jet de bile.

În funcție de tipul deformării, prelucrarea se poate realiza:

- liber (fără element activ de sprijin);
- cu element activ de sprijin de tipul:
 - contrapoanson;
 - rolă;
 - dorn;
 - placă activă cu suprafață parțială sau completă.

Modul de aplicare a forței poate fi:

- continuu;
- intermitent.

Procedeul poate utiliza sistem de fixare a semifabricatului:

- fix;
- mobil.

În funcție de temperatura de prelucrare, deformarea se poate face:

- la cald;
- la rece.

O clasificare sintetică a acestor procedee este prezentată în figura 2. 1.

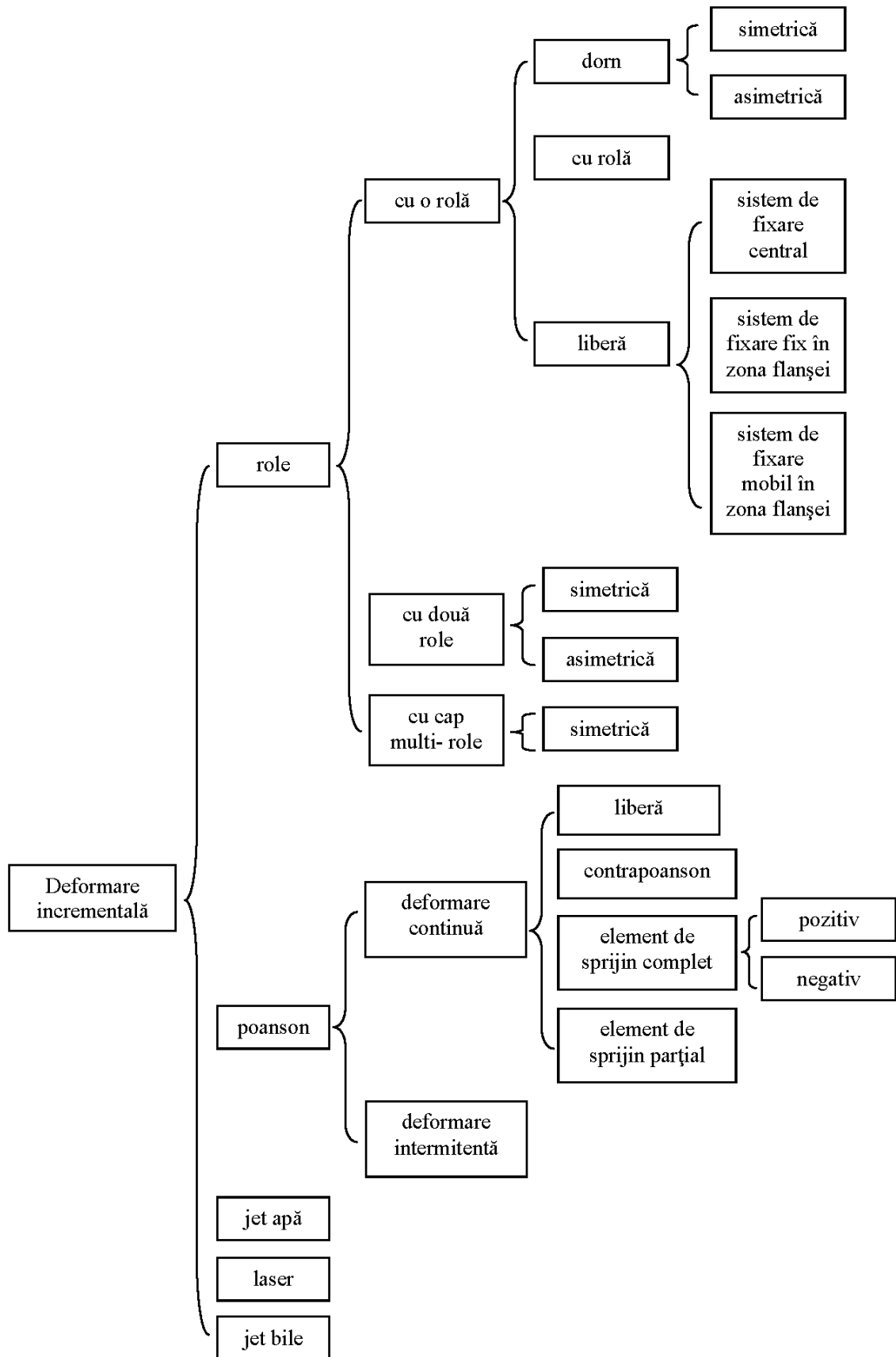


Fig. 2. 1 Clasificarea procedeeleor de deformare incrementală

2.3 Principalele procedee de deformare incrementală

2.3.1 Deformarea incrementală cu role

Deformarea incrementală cu role se realizează pe mașini speciale și elementul activ este constituit din una, două sau mai multe role de deformare. Materialul semifabricatului este deformat în general pe un element activ de sprijin sub forma unui dorn. Modul de aplicare a forței este continuu, contactul dintre scula de deformare și material este permanent, iar focarul de deformare se deplasează ca urmare a cinematicii procedeului. Pot fi prelucrate prin această metodă majoritatea materialelor metalice utilizate la operațiile de presare la rece. În anumite situații (materiale mai groase sau mai greu prelucrabile), deformarea poate fi făcută, la cald, cu încălzirea materialului semifabricatului.

Cel mai uzual procedeu de acest tip este deformarea incrementală cu o rolă și dorn de sprijin. Semifabricatul sub forma unui disc de tablă (fig. 2.2, a) este fixat ferm de dornul de sprijin 1 cu elementul de apăsare 2 și întreg subansamblul execută o mișcare de rotație. Rola de deformare 3 se deplasează pe o traiectorie plană materializând generatoarea piesei.

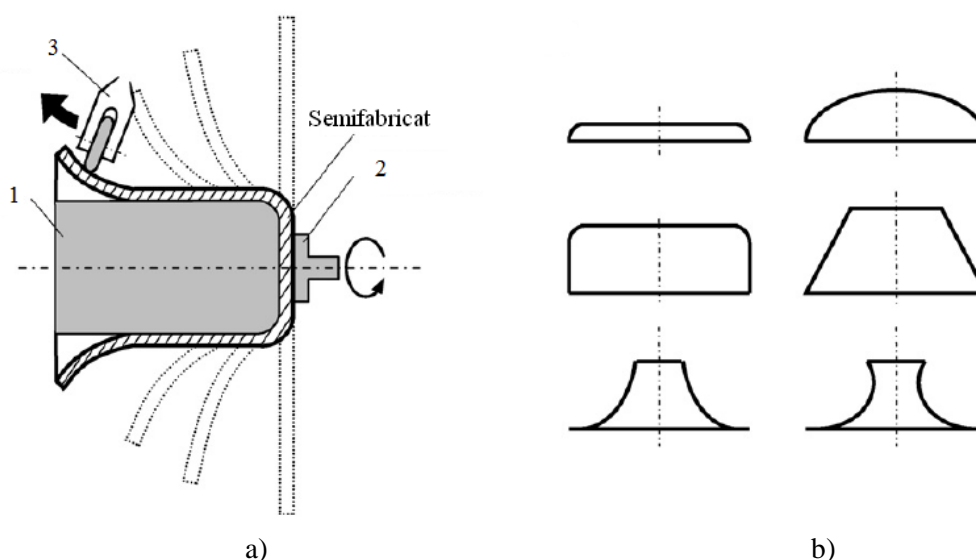


Fig. 2.2 Deformarea incrementală cu role fără subțierea voită a materialului

2.3.2 Deformarea incrementală cu poanson

La această variantă de deformare incrementală, scula activă este constituită dintr-un poanson de dimensiuni reduse. Contactul dintre scula de deformare și

semifabricat este continuu, iar procedeul se realizează în general la rece. O schemă simplificată a procesului de deformare este prezentată în figura 2.18.

Semifabricatul (fig. 2.18) este blocat pe contur în sistemul de fixare constituit din placa suport 1 și inelul de blocare 2. Poansonul 3 realizează deformarea incrementală a semifabricatului urmărind succesiv traiectorii cu perimetre diferite. După parcurgerea completă a fiecărei traiectorii poansonul coboară cu un pas.

Procedeul este întâlnit în literatura de specialitate sub denumirea de deformare incrementală „într-un singur punct”

deși în realitate contactul dintre poanson și semifabricat se realizează pe o zonă de dimensiuni reduse.

Procedeul prezintă mai multe variante în funcție de elementul activ de sprijin utilizat și de tipul sistemului de fixare a semifabricatului, variante care sunt prezentate în figura 2.19. Variantele a, b și c au sistemul de prindere a semifabricatului fix, pe când variantele d și e au sistemul de fixare a semifabricatului mobil care se deplasează de-a lungul axei verticale în timp ce scula deformează materialul. Primele trei configurații mai poartă numele și de deformare incrementală negativă, iar ultimele două de deformare incrementală pozitivă. De asemenea, variantele b, c, d și e utilizează element activ de sprijin, motiv pentru care sunt cunoscute și sub denumirea de deformare incrementală „în două puncte”.

Elementul activ de sprijin poate fi sub formă de contrapoanson (b) sau placă activă (c). La deformarea incrementală pozitivă elementul activ de sprijin este plasat în interiorul piesei, deformarea realizându-se pe exterior. Sprijinul poate fi total (d) sau parțial (e).

Procedeul de deformare incrementală cu poanson de dimensiuni reduse s-a dezvoltat drept urmare a perfecționării mașinilor de frezat CNC și a dezvoltării programelor CAD/CAM pentru generarea traiectoriilor sculei. Ideea de deformare incrementală cu poanson de dimensiuni reduse a fost introdusă pentru prima dată într-un patent de către Leszac în 1967 [127].

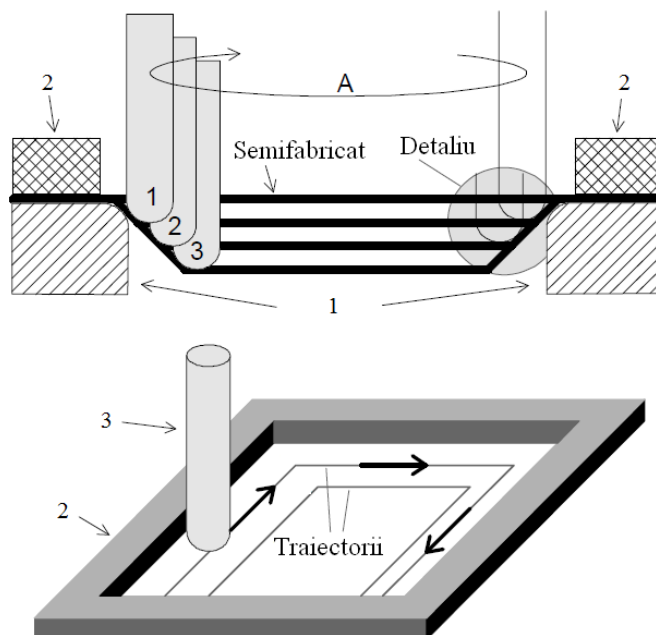


Fig. 2.18 Deformare incrementală cu poanson

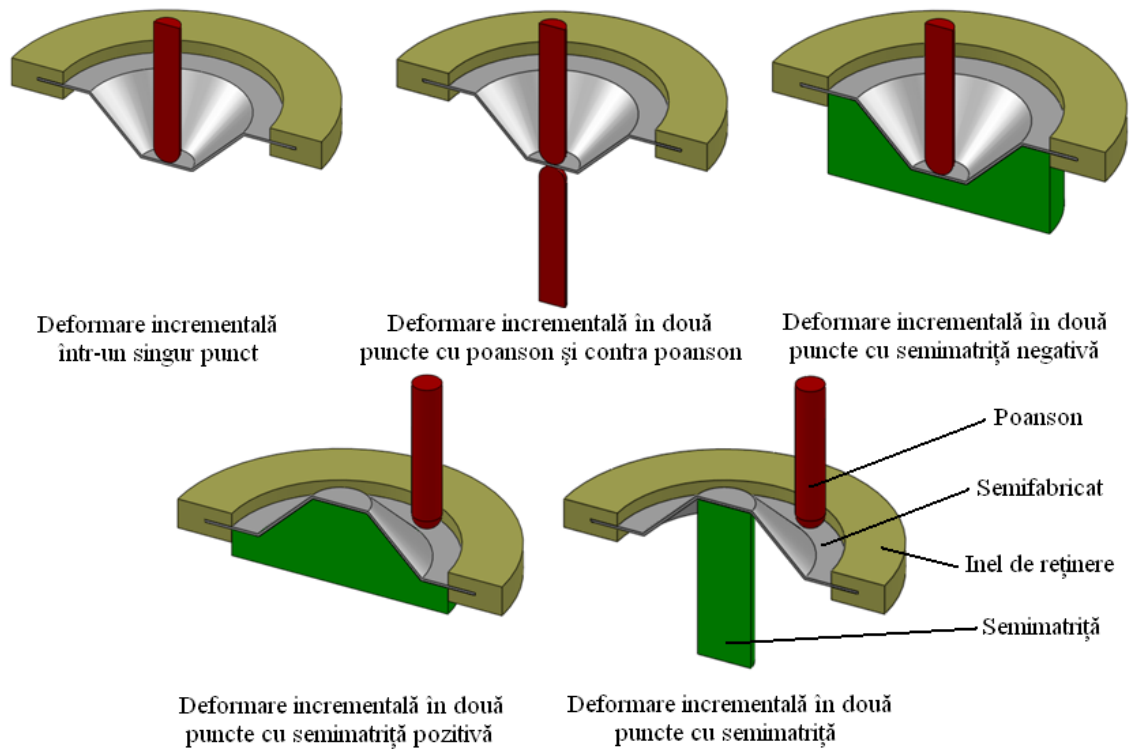


Fig. 2.19 Variante ale procedurii de deformare incrementală cu poanson

Cronologic, a fost studiată pentru prima dată deformarea incrementală „în două puncte” de către Powell și Andrew [166] și folosită apoi de Matsubara [135] pentru a realiza piese asimetrice în loturi mici și cu costuri scăzute.

Ulterior, deformarea incrementală „într-un singur punct” a fost cercetată de către Jeswiet [89], Leach [126] și Fratini [55]. Aceștia au arătat că deformarea poate fi efectuată pe o mașină de frezat cu trei axe comandate numeric. Cu ajutorul programelor CAD/CAM se pot genera traiectoriile sculei și se pot fabrica, astfel, piese complexe. Între dispozitivul prezentat în figura 2.20 și cel folosit de către Jeswiet și Leach există o diferență majoră: lipsa tijei suport sau a plăcii active. Acest mod de deformare creează stări de tensiuni și deformații în semifabricat diferite față de cele întâlnite la deformarea incrementală „în două puncte”.

La ambele tipuri de deformare incrementală cu poanson, echipamentul de deformare este compus, în principal, din:

- elementul activ de deformare (poansonul);
- sistemul de fixare a semifabricatului;
- elementul activ de sprijin (dacă este cazul);
- mașina care generează deplasările necesare deformării.

2.3.3 Deformarea incrementală cu jet de apă

Tehnologia de prelucrare bazată pe jetul de apă este aplicată în multe procese industriale. În general acestea sunt procese abrazive de tăiere a semifabricatelor greu de prelucrat prin procedee de aşchiere. Prin acest procedeu se poate tăia practic aproape orice material fără a afecta zonal piesa.

Au fost investigate şi alte posibilităţi de utilizare a tehnologiei bazate pe jetul de apă. Una dintre aceste posibilităţi este de a utiliza jetul de apă ca şi element activ la deformarea incrementală.

Prima încercare de acest gen a fost efectuată de către Iseki [84]. Bazându-se pe rezultatele sale, investigaţii similare s-au efectuat şi la Universitatea din Ljubljana, Slovenia, în colaborare cu Universitatea de ştiinţe aplicate Argau, din Suedia, unde a fost folosit un sistem de tăiere cu jet de apă, modificat pentru a putea fi efectuată deformarea incrementală a unor table din aluminiu cu o grosime de 0,5 mm [96, 97].

Principiul de lucru şi cei mai importanţi parametri ai procesului de deformare incrementală cu jet de apă sunt prezentaţi în figura 2.37.

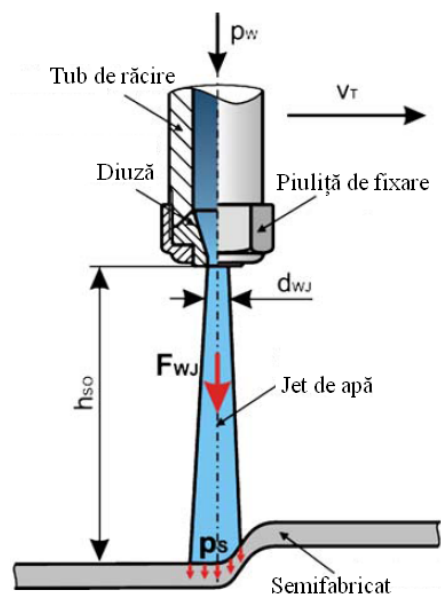


Fig. 2.37 Parametrii importanţi ai procedurii

2.3.4 Deformarea incrementală cu laser

Deformarea incrementală cu ajutorul laserului este un nou procedeu de deformare a tablelor metalice din oţel inoxidabil, aliaje uşoare de aluminiu, magneziu şi titan, care au coeficienţi de dilatare termică mari. În timpul procesului de deformare cu ajutorul laserului deformaţiile sunt induse într-o manieră controlată în semifabricat prin deplasarea razei laser pe o parte a materialului. Procedeu (fig. 2.41) se

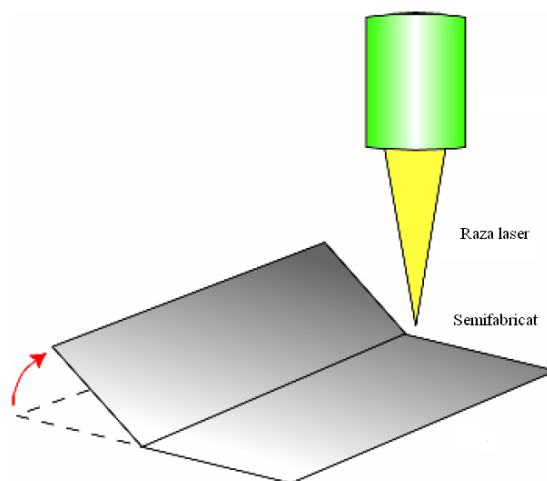


Fig. 2.41 Îndoirea cu laser

utilizează pentru realizarea unor operații de îndoire și are multe avantaje față de alte procedee tradiționale, deoarece deformarea materialului nu necesită forțe exterioare, aceasta realizându-se doar cu raza laser.

2.3.5 Deformarea incrementală cu jet de bile

Elementul activ de deformare poate fi și sub forma unui jet de bile dirijat cu o anumită viteză spre semifabricat. Deformarea cu jet de bile se aplică industrial la realizarea de componente pentru avioane. Aplicațiile cunoscute sunt, mai ales, piese ușor curbate [119]. Ca principiu de lucru, deformarea cu jet de bile este însă potrivită și pentru curburi mari.

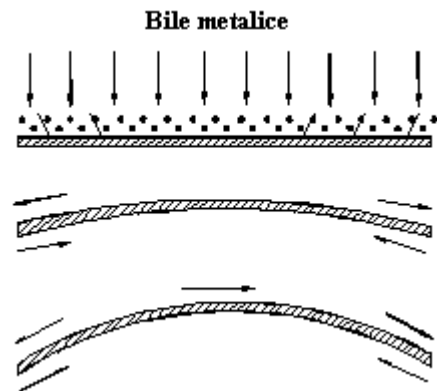


Fig. 2.43 Schema procedurii de deformare cu jet de bile

Semifabricatul, în acest caz, este liber nefiind fixat într-un dispozitiv special pe contur. Acesta este bombardat cu bile astfel încât, funcție de energia cinetică a bilelor, să fie indusă în material o stare de tensiuni de întindere sau de compresiune (fig. 2.43) care poate conduce la formarea unei suprafețe concave sau convexe. Datorită faptului că semifabricatul nu este fixat cu acest procedeu este posibil ca acesta să se deformeze integral. La piese lungi, instalația de „bombardare” se deplasează în lungul semifabricatului [63].

Principalele domenii de aplicare ale procedurii de deformare incrementală sunt:

- industria auto;
- arhitectură: panouri decorative;
- produse personalizate;
- medicină: proteze, coroane dentare;
- industria aeronautică;
- industria constructoare de vapoare.

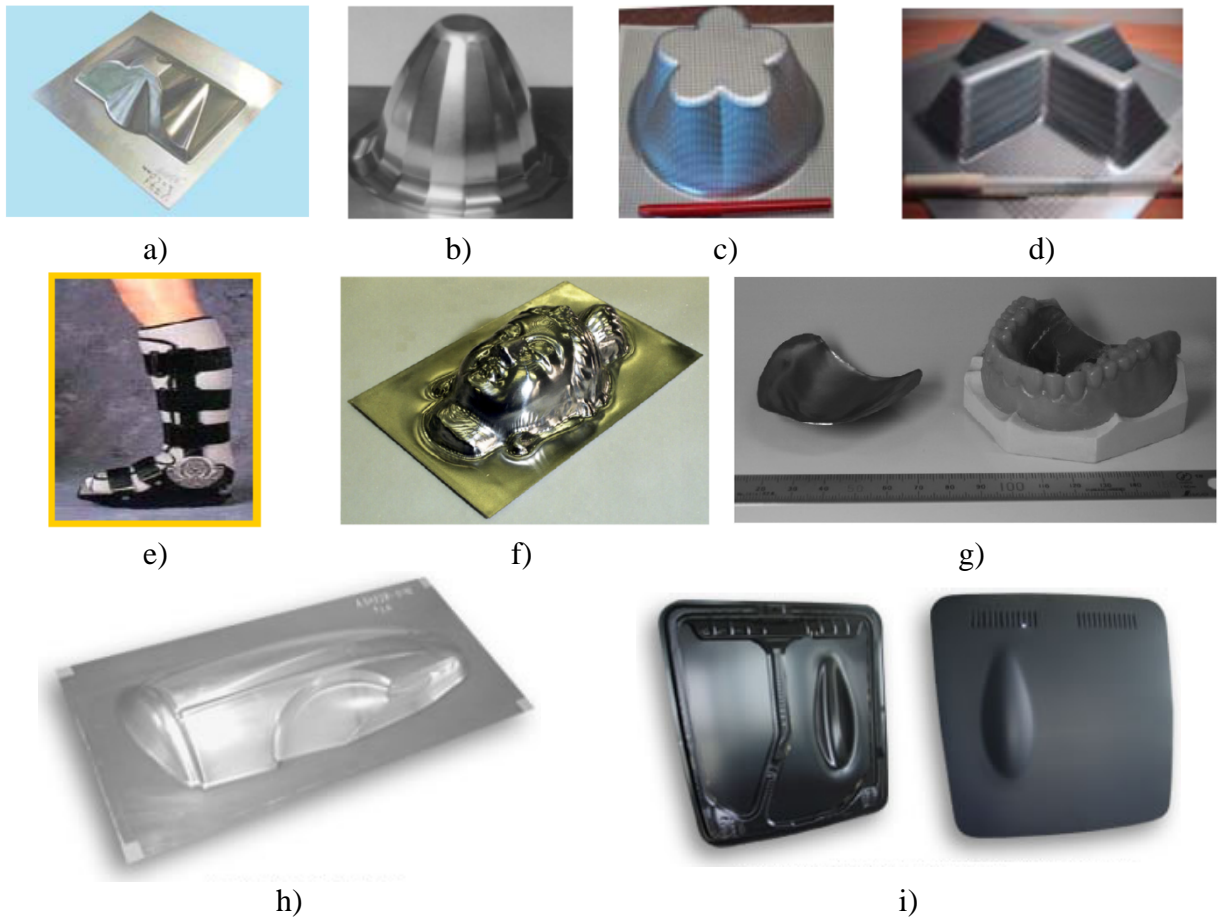


Fig. 2.44 Piese obținute prin deformarea incrementală

2.4 Cercetări privind deformarea incrementală

În cadrul procedeeilor de deformare incrementală s-a identificat un număr foarte mare de lucrări care abordează această temă. Au fost efectuate cercetări analitice, cercetări prin metoda elementului finit precum și cercetări experimentale. În cele ce urmează se vor prezenta pe scurt principalele contribuții în domeniu, grupate în funcție de tipul de cercetare (analitic, MEF, experimental) dar și din punct de vedere al sculei utilizate.

2.4.1 Cercetări analitice

Cercetările analitice s-au axat în general pe determinarea forțelor din proces. Activi în acest domeniu au fost Dröge [49], Avitzur și Yang [18], Kalpakcioglu [102-103], Kobayashi [118], Sortais [180], Hayama și Murota [66], Wang [188], Hayama [67-68], Kim și alții [111].

În cazul deformării incrementale cu poanson în literatura de specialitate s-au identificat abordări teoretice privind determinarea gradului de deformare în material și a forțelor de deformare în lucrările realizate de Iseki [84, 85], Oleksik [155] și Pohlak [165].

O altă abordare a procesului a fost identificată în studiile analitice realizate de Martins [132] și Silva [178] care consideră comportarea materialului la deformare similară cu a unei membrane pentru a explica fenomenul apariției ruperilor în piesă.

2.4.2 Cercetări prin metoda elementului finit

Modelele analitice se limitează în general la determinarea deformațiilor și forțelor. Pentru un studiu mai amplu se utilizează metodele numerice în special metoda elementului finit. Prin intermediul acestor metode se poate determina influența tuturor parametrilor din cadrul procesului de deformare.

Deformarea incrementală are caracteristic faptul că zona de deformare este mică și își modifică continuu poziția, ca urmare analiza cu element finit impune utilizarea unui mesh fin și a unui număr mare de incremenți de timp. Din această cauză, timpul de rulare al analizei este destul de îndelungat. Ca urmare, una dintre direcțiile de cercetare a fost axată pe identificarea unor ipoteze simplificatoare care să permită reducerea timpului necesar unei astfel de analize.

Activi în simularea numerică a procedurii de deformare incrementală cu rolă au fost Alberti [3], Liu [128], Mori și Nonaka [149], Quigley și Monaghan [168-169], Klocke și Wehrmeister [117], Lu [130], Kleiner [114] și Klimmek [116].

Yamashita [188] a realizat simularea numerică a deformării incrementale cu poanson „într-un singur punct” pentru analiza influenței tipului de traiectorie asupra forțelor și preciziei pieselor.

Micari [141], Hirt [78], Bambach [21], Ambrogio [9], He [71, 72] și Henrard [74] au avut o contribuție susținută la dezvoltarea de modele cu element finit ale procedurii de deformare incrementală cu poanson.

2.4.3 Cercetări experimentale

În studiul deformării incrementale cu rolă/role, metodele de cercetare experimentală au fost folosite pentru a evidenția: mecanismul deformării și evoluția deformațiilor, mecanismul ruperii și evidențierea acesteia, forțele necesare deformării, calitatea sprafetei, optimizarea geometriei produsului etc.

Pentru investigarea mecanismului deformării și evoluția deformațiilor la deformarea incrementală cu rolă/role au fost utilizate două metode de evindțiere a deformațiilor: metoda găurilor pătrunse [18] și metoda rețelelor (rețea pătrată [101-102] sau rețea sub formă de cercuri [167]).

În studiul deformării incrementale cu poanson, metodele de cercetare experimentală au fost folosite pentru a evidenția: mecanica procesului de deformare [87], forțele necesare deformării [50, 53, 143], precizia suprafeței obținute [12], deformabilitatea diverselor materiale [81, 174, 94], traiectoria optimă a poansonului [15, 16] etc.

2.5 Concluzii

Procesul de deformare incrementală a tablelor metalice reprezintă o metodă modernă de deformare plastică la rece. A apărut ca o consecință a cerințelor tot mai diversificate ale clienților. Fiind un procedeu de deformare flexibil, pentru fabricarea de piese prin acest procedeu sunt necesare scule simple ca și construcție, realizate la costuri reduse, de multe ori reutilizabile pentru diferite tipuri de piese. Există în stadiul de dezvoltare mai multe procedee de deformare incrementală, prezentate în acest capitol, cum ar fi: deformarea cu role, cu jet de apă, cu laser sau cu un poanson de dimensiuni reduse.

Defomarea incrementală cu un poanson de dimensiuni reduse este cea mai dezvoltată, datorită faptului că permite fabricarea facilă atât a pieselor industriale în serie mică cât și a prototipurilor. Sunt necesare doar o mașină de frezat în coordonate, pentru realizarea mișcării spațiale a sculei de deformat, un poanson de dimensiuni reduse și un suport pentru fixarea materialului.

Cu toate că deformarea incrementală cu poanson este un proces viabil, au rămas multe provocări. O provocare rămâne diminuarea revenirii elastice a materialului care menține, la ora actuală, precizia procedeeului la 1,5 mm. Se impune dezvoltarea de metode de compensare a revenirii elastice care să permită inginerilor proiectanți atingerea preciziilor ridicate impuse produselor.

O altă necesitate este stabilirea metodelor de obținere a "Diagramelor Limită de Deformare" pentru diferite combinații de materiale și grosimi.

O altă direcție de cercetare este determinarea stării de deformații și a subțierii relative a materialului în funcție de tipul de material, grosimea acestuia, diametrul poansonului, geometria piesei.

Procedeele clasice de presare se vor folosi în continuare, din motive economice. O provocare este însă adaptarea procedurii de deformare incrementală pentru producția de masă. La viteze mari și cu îmbunătățirea calității produselor ar putea fi o variantă la procesele de deformare clasice mai ales prin flexibilitatea sa.

Direcțiile de cercetare abordate în cadrul tezei de doctorat, desprinse în urma analizei și sintezei stadiului actual sunt axate pe:

- determinarea distribuției deformațiilor în piesele deformate incremental;
- studiul influenței parametrilor geometrici (diametrul poansonului, mărimea pasului vertical, unghiul de înclinare al peretelui piesei etc.) asupra valorilor maxime ale deformațiilor principale și subțierii relative;
- studiul influenței modului de deformare asupra distribuției deformațiilor în piesă și valorilor maxime ale acestora;
- determinarea forțelor de deformare rezultate din proces și a factorilor de influență.

3 CERCETĂRI TEORETICE PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ A TABELOR METALICE SUBȚIRI

3.1 Introducere

În literatura de specialitate analizată cercetările teoretice privind deformarea incrementală s-au axat pe determinarea forțelor de deformare luându-se în considerare starea plană de deformare a materialului, anizotropia acestuia și diferiți parametri legați de procedeu [84, 85, 155, 165]. Pornind de la aceste constatări, cercetările teoretice din lucrarea de față au avut următoarele obiective:

- determinarea unor relații matematice prin intermediul cărora să se determine valoarea deformației pe două direcții, una verticală și una din planul tablei în momentul când poansonul execută o indexare a pasului pe direcție verticală;
- determinarea unor relații matematice prin intermediul cărora să se calculeze valorile forțelor pe două direcții, una verticală și una din planul tablei în momentul când poansonul execută o indexare a pasului pe direcție verticală;
- studiul variației deformațiilor și forțelor în funcție de parametrii care intervin în calcul.

3.2 Determinarea relațiilor de calcul ale deformațiilor și forțelor la deformarea incrementală cu poanson

3.2.1 Determinarea relațiilor de calcul ale deformațiilor

Pentru calculul deformațiilor din procedeul de deformare incrementală se va lua în considerare o placă activă cu contur pătrat.

În figura 3.1 este prezentat modelul geometric al schemei de lucru propusă pentru deformarea cu placă activă de deformare cu contur pătrat.

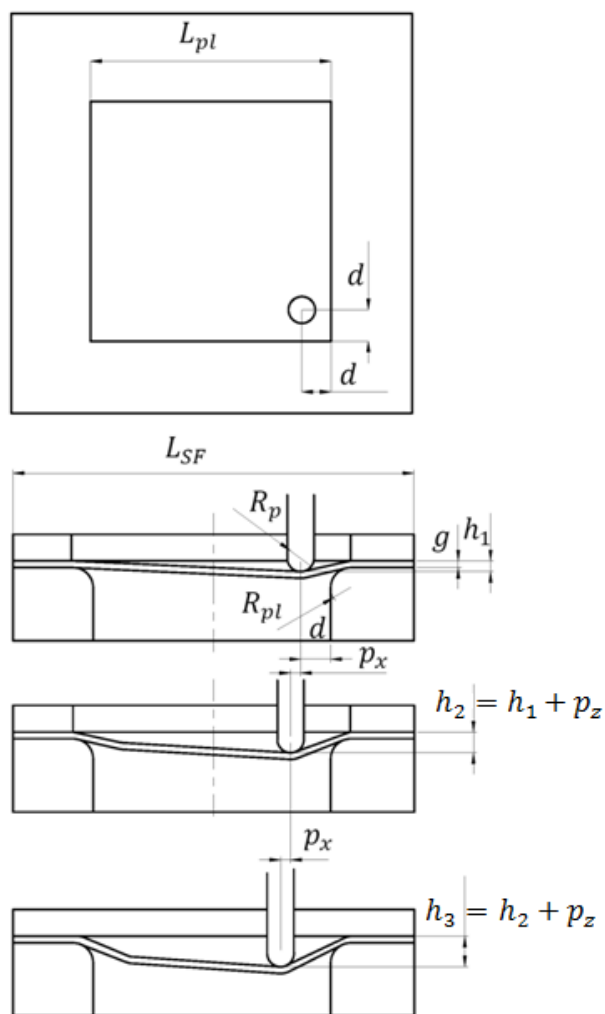


Fig. 3.1 Modelul geometric pentru placa activă cu contur pătrat

Prin acest model matematic se dorește a se determina deformațiile și forțele de deformare la începutul fiecărei penetrări a poansonului pe direcție verticală în material. Mărimile geometrice care intervin în calcul sunt: raza poansonului sferic R_p , raza de racordare a plăcii active R_{pl} , lungimea laturii deschiderii părții inferioare a sistemului de fixare L_{pl} , distanța dintre marginea plăcii active și poanson d , grosimea materialului g , adâncimea de pătrundere a poansonului în material h , diametrul semifabricatului D_{sf} și pasul pe cele două direcții, p_x și p_z . În funcție de aceste mărimi sunt calculate: mărimile unghiurilor de contact θ_i și δ_i , segmentele $l_{1i}, l_{2i}, l_{3i}, l_{4i}, l_{5i}, l_{6i}, l_{7i}, l_{8i}$ (fig. 3.2-3.4). Folosind acești parametri geometrici și considerându-se că deformația maximă este localizată la nivelul arcelor de contact l_{3i} și l_{4i} pentru direcția x și că celelalte segmente suferă deformații mici care pot fi neglijate, se vor calcula gradele de deformare logaritmice pe direcția x . Pe baza primei legi a deformării plastice (legea volumului constant), se

La elaborarea acestei metode s-a plecat de la metoda de calcul fundamentată de profesorul Hideo Iseki [84-85] care a apelat la o ipoteză simplificatoare și anume aceea că semifabricatul este sollicitat în cadrul unei stări plane de deformații și dezvoltată ulterior de către Oleksik [155] care ține cont și de prezența unghiului δ . Introducerea acestui unghi contribuie la creșterea preciziei metodei dar și la complicarea algoritmilor matematici de rezolvare. În cadrul acestui model matematic se vor introduce doi parametri: pasul pe

va determina într-o primă fază deformația pe direcția grosimii materialului semifabricatului.

Pentru început, se vor introduce următoarele notații pentru a simplifica formulele de calcul care urmează:

$$\rho_p = R_p + \frac{g}{2}; \quad (3.1)$$

$$\rho_{pl} = R_{pl} + \frac{g}{2}; \quad (3.2)$$

$$L = L_{pl} + 2 \cdot R_{pl}. \quad (3.3)$$

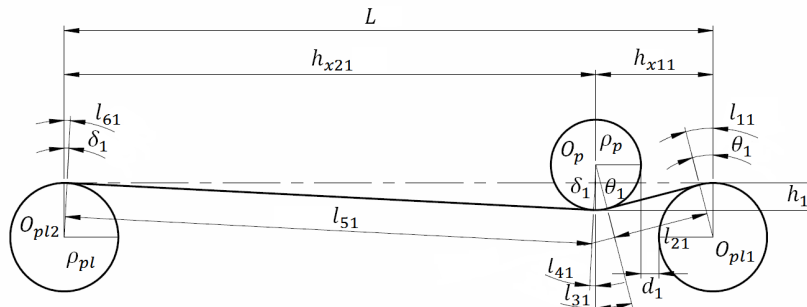


Fig. 3.2 Elementele care definesc geometria schemei de lucru pentru primul pas

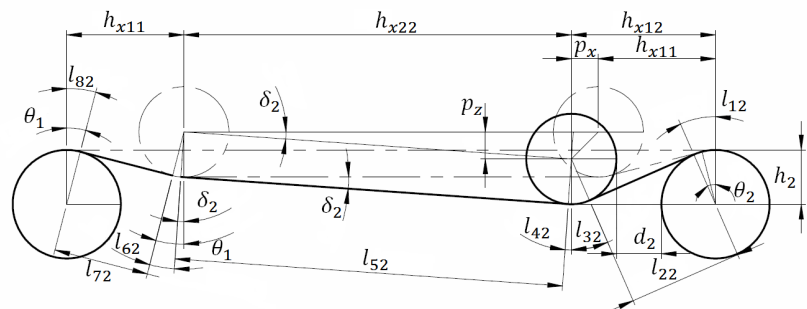


Fig. 3.3 Elementele care definesc geometria schemei de lucru pentru al doilea pas

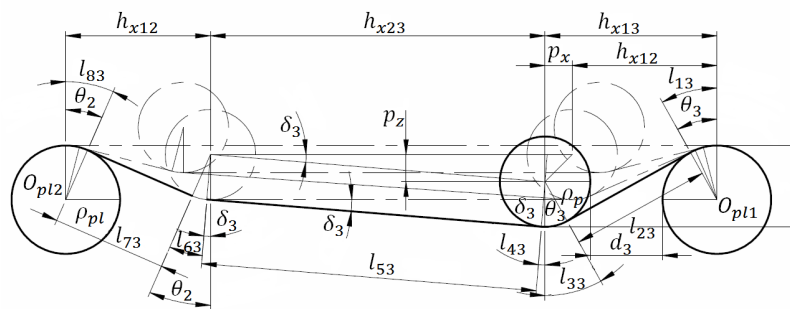
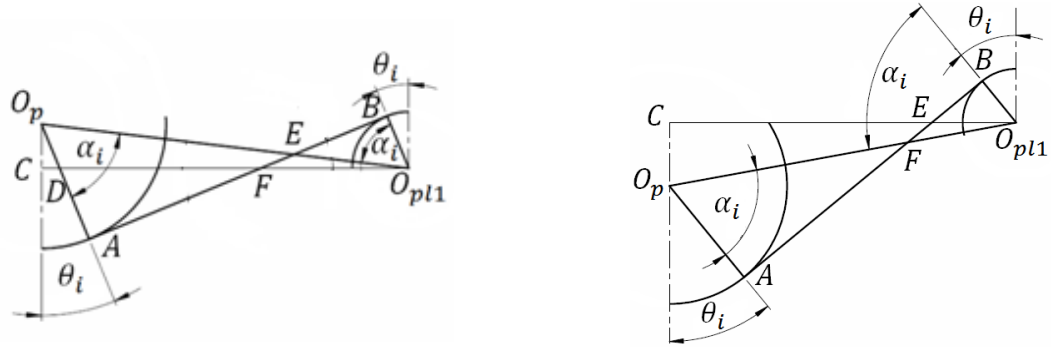


Fig. 3.4 Elementele care definesc geometria schemei de lucru pentru al treilea pas

3.2.1.1 Determinarea unghiului de contact θ_i

Se deosebesc două cazuri: centrul cercului care definește poansonul se găsește situat deasupra centrului arcului de cerc care definește raza de racordare a plăcii active (fig. 3.5, a) și cazul în care centrul cercului se găsește sub centrul arcului de cerc amintit (fig. 3.5, b).



a) Cazul în care centrul arcului de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește deasupra centrului plăcii active

b) Cazul în care centrul arcului de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește sub centrul plăcii active

Fig. 3.5 Determinarea unghiului θ_i

În urma calculelor se ajunge la următoarele relații ale unghiului θ_i :

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{\rho + d_i}{\rho - h_i}\right) - \arccos\left(\frac{\rho}{\sqrt{(\rho + d_i)^2 + (\rho - h_i)^2}}\right), \quad (3.15)$$

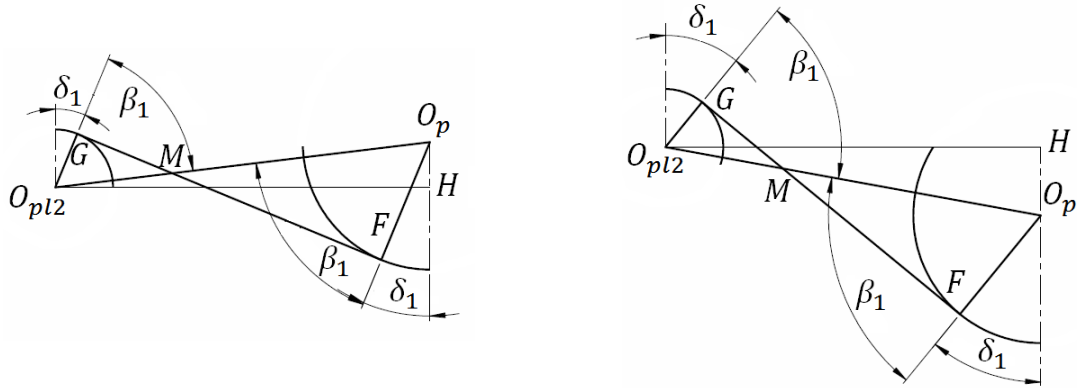
pentru cazul în care centrul arcului de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește deasupra centrului plăcii active și

$$\theta_i = -\arctan\left(\frac{\rho + d_i}{h_i - \rho}\right) + \arccos\left(\frac{\rho}{\sqrt{(\rho + d_i)^2 + (h_i - \rho)^2}}\right), \quad (3.20)$$

pentru cazul în care centrul de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește sub centrul plăcii active.

3.2.1.2 Determinarea unghiului de contact δ_i

Calculul unghiului pentru primul pas



a) Cazul în care centrul arcului de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește deasupra centrului plăcii active

b) Cazul în care centrul arcului de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește sub centrul plăcii active

Fig. 3.6 Determinarea unghiului δ_1

În urma calculelor se ajunge la următoarele relații ale unghiului δ_1 :

$$\delta_1 = \arctan\left(\frac{L - \rho - d_1}{\rho - h_1}\right) - \arccos\left(\frac{\rho}{\sqrt{(L - \rho - d_1)^2 + (\rho - h_1)^2}}\right), \quad (3.32)$$

pentru cazul în care centrul arcului de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește deasupra centrului plăcii active și

$$\delta_1 = -\arctan\left(\frac{L - \rho - d_1}{h_1 - \rho}\right) + \arccos\left(\frac{\rho}{\sqrt{(L - \rho - d_1)^2 + (h_1 - \rho)^2}}\right), \quad (3.35)$$

pentru cazul în care centrul de cerc care definește raza de curbură a poansonului se găsește sub centrul plăcii active.

Calculul unghiului pentru al doilea pas

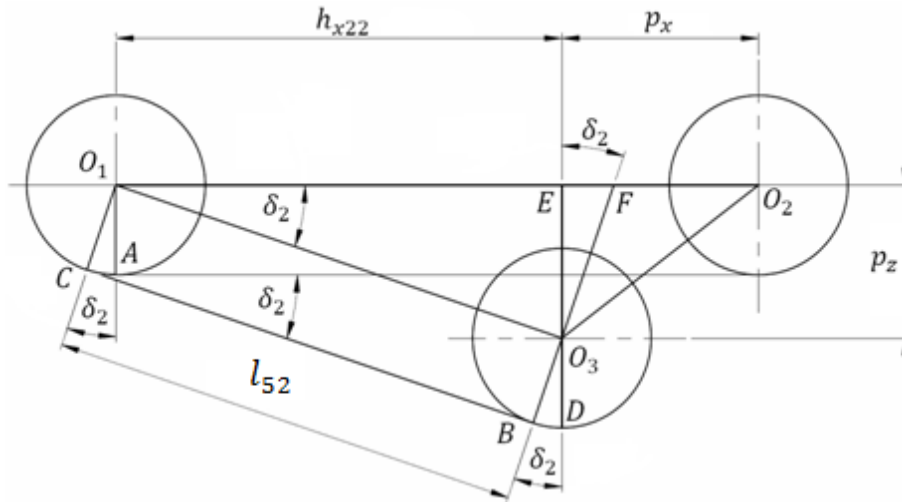


Fig. 3.7 Determinarea unghiului δ_2

În urma calculelor se ajunge la următoarea relație pentru unghiul δ_2 :

$$\delta_2 = \arctan\left(\frac{p_z}{L - p_x - 2 \cdot (\rho + d_1)}\right). \quad (3.39)$$

Calculul unghiului pentru al treilea pas

Folosind același raționament ca la pasul al doilea, se obține relația:

$$\delta_3 = \arctan\left(\frac{p_z}{L - p_x - 2 \cdot (\rho + d_2)}\right). \quad (3.40)$$

3.2.1.3 Calculul lungimii segmentelor l_i

Cunoscând valorile celor două unghiuri de contact s-au calculat lungimile segmentelor l_i pentru fiecare pas.

Calculul lungimii segmentelor l_i pentru primul pas

$$L_1 = L = L_{pl} + 2 \cdot R_{pl}; \quad (3.41)$$

$$l_{11} = \frac{\pi \cdot \rho_{pl} \cdot \theta_1}{180^\circ}; \quad (3.42)$$

$$l_{21} = (\rho + d_1) \cdot \cos \theta_1 - (\rho - h_1) \cdot \sin \theta_1. \quad (3.51)$$

$$l_{31} = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot \theta_1}{180^\circ}; \quad (3.52)$$

$$l_{41} = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot \delta_1}{180^\circ}. \quad (3.53)$$

$$l_{61} = \frac{\pi \cdot \rho_{pl} \cdot \delta_1}{180^\circ}; \quad (3.55)$$

$$l_{71} = 0; \quad (3.56)$$

$$l_{81} = 0. \quad (3.57)$$

Calculul lungimii segmentelor l_i pentru al doilea pas

$$L_2 = 2(l_{11} + l_{21} + l_{31}) + (L_1 - 2h_{x11}). \quad (3.58)$$

$$l_{12} = \frac{\pi \cdot \rho_{pl} \cdot \theta_2}{180^\circ}; \quad (3.59)$$

$$l_{22} = (\rho + d_2) \cdot \cos \theta_2 - (\rho - h_2) \cdot \sin \theta_2; \quad (3.60)$$

$$l_{32} = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot \theta_2}{180^\circ}; \quad (3.61)$$

$$l_{42} = \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot \delta_2}{180^\circ}. \quad (3.62)$$

$$l_{52} = \sqrt{h_{x22}^2 + p_z^2}. \quad (3.64)$$

$$l_{62} = \frac{\pi \cdot \rho_{pl} \cdot (\theta_1 - \delta_2)}{180^\circ}. \quad (3.65)$$

$$l_{72} = l_{21}; \quad (3.66)$$

$$l_{82} = l_{11}. \quad (3.67)$$

Calculul lungimii segmentelor l_i pentru al treilea pas și următorii pași

Folosind același raționament ca și la pasul al doilea, se obțin relațiile atât pentru lungimea inițială a semifabricatului cât și pentru lungimile segmentelor l_i .

După cum se poate observa din relațiile de mai sus de la pasul al doilea și în continuare lungimile segmentelor l_i și ale lungimii inițiale a semifabricatului se calculează pe baza acelorași relații, singura diferență fiind indicele care reprezintă numărul pasului pentru care s-au calculat respectivele lungimi.

3.2.1.4 Stabilirea relației de calcul a gradului de deformare logaritmice pe direcția x

Pentru a determina gradul de deformare logaritmice pe direcția x se va aprecia mărimea segmentului care suferă cea mai importantă deformare pe baza celor calculate mai sus. Considerându-se că segmentele care suferă deformația maximă sunt cele care vin în contact direct cu poansonul (l_{3i} și l_{4i}), gradul de deformare logaritmice se determină ca logaritmul raportului dintre mărimea acestor segmente după deformare și mărimea lor înainte de deformare. Astfel:

$$\varepsilon_{xi} = \ln \left(\frac{l_{3i} + l_{4i}}{L_i - l_{1i} - l_{2i} - l_{5i} - l_{6i} - l_{7i} - l_{8i}} \right). \quad (3.77)$$

După efectuarea substituțiilor, adică înlocuind lungimile segmentelor cu formulele prezentate anterior, rezultă mărimea gradului de deformare logaritmice pe direcția x .

Primul pas

$$\varepsilon_{x1} = \ln \left(\frac{\frac{\pi \cdot \rho_p}{180} \cdot (\theta_1 + \delta_1)}{L_1 - \left(\frac{\pi \cdot \rho_{pl}}{180} \cdot (\theta_1 + \delta_1) + L_1 \cdot \cos \delta_1 + (\rho + d_1) \cdot (\cos \theta_1 - \cos \delta_1) \right)} \right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot \rho_p}{180} \cdot (\theta_1 + \delta_1) \right) \quad (3.78)$$

Pasul al doilea

$$\varepsilon_{x2} = \ln \left(\frac{\frac{\pi \cdot \rho_p}{180} \cdot (\theta_2 + \delta_2)}{L_2 - \left(\frac{\pi \cdot \rho_{pl}}{180} \cdot (\theta_2 + 2 \cdot \theta_1 - \delta_2) + \sqrt{h_{x22}^2 + p_z^2} + (\rho + d_2) \cdot \cos \theta_2 \right)} \right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot \rho_p}{180} \cdot (\theta_2 + \delta_2) \right) \quad (3.79)$$

Pentru restul pașilor lungimile segmentelor se calculează la fel ca pentru pasul al doilea ca urmare și deformațiile se vor calcula tot cu relația (3.79).

3.2.2 Determinarea relațiilor de calcul ale forțelor de deformare

Forțele din procedeu de deformare plastică incrementală s-au calculat pornind de la relațiile dezvoltate de către Oleksik în teza sa de doctorat [155], dar relațiile utilizate permit determinarea forței la fiecare pas de deformare și țin cont de modificarea parametrilor geometrici (δ_i , θ_i) odată cu indexarea pasului. Relațiile pe baza cărora s-au calculat forțele sunt următoarele:

$$F_{xi} = \frac{2}{\sqrt{3}} B_i \cdot g_0 \cdot e^{(-\varepsilon_{xi})} \cdot K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_{xi})^n \cdot \left(\frac{1}{e^{\mu \cdot (\theta_i + \delta_i)}} \cdot \cos \delta_i - \cos \theta_i \right); \quad (3.83)$$

$$F_{zi} = \frac{2}{\sqrt{3}} B_i \cdot g_0 \cdot e^{(-\varepsilon_{xi})} \cdot k \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon_{xi})^n \cdot \left(\frac{1}{e^{\mu \cdot (\theta_i + \delta_i)}} \cdot \sin \delta_i + \sin \theta_i \right); \quad (3.84)$$

unde:

B_i este perimetrul de contact dintre material și poanson;

g_0 – grosimea inițială a semifabricatului;

K – coeficientul de rezistență;

n – coeficientul de ecruisare;

ε_0 – deformația remanentă;

ε_x – deformația pe direcția x ;

δ_i, θ_i – unghiurile de contact;

μ – coeficientul de frecare.

3.3 Studiul teoretic al variației deformațiilor și forțelor

Conform relațiilor de calcul (3.78), (3.79), (3.83), (3.84), deformațiile și forțele de deformare depind de mai mulți parametri. Se consideră că principalii parametri sunt cei prezentați în tabelul 3.1, tabel care evidențiază și domeniul de variație al acestora luat în considerare în cadrul cercetărilor teoretice.

Tabelul 3.1

Parametrul	Valori		
Diametrul poansonului sferic D_p [mm]	7	8	9
Latura deschiderii părții inferioare a sistemului de fixare L_{pl} [mm]	55	60	65
Grosimea materialului g [mm]	0,5	0,7	1
Pasul pe direcție verticală p_z [mm]	1	1,25	1,5
Unghiul de înclinare al peretelui piesei θ [°]	33,7	45	63,43

Relațiile au fost soluționate prin metode grafo-analitice cu ajutorul programului Mathcad 14.

Din aceste grafice se observă:

- scăderea gradului de deformare logaritmic o dată cu creșterea diametrului poansonului și creșterea lungimii plăcii active;
- creșterea acestuia o dată cu creșterea pasului vertical, creșterea grosimii materialului și creșterea unghiului de înclinare al peretelui piesei.

Spre exemplificare, se prezintă în figura 3.8 variația gradului de deformare logaritmic în funcție de pasul vertical adoptat.

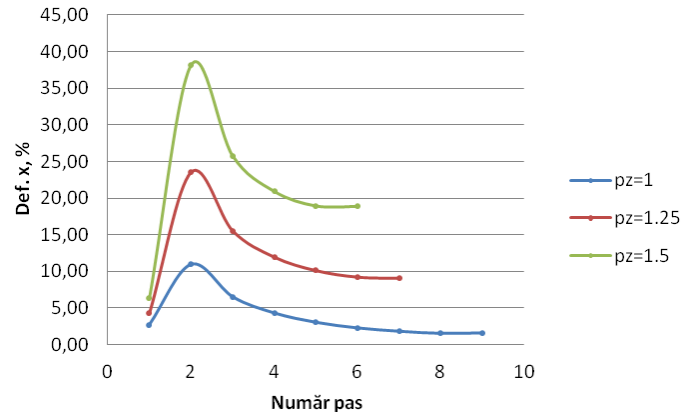
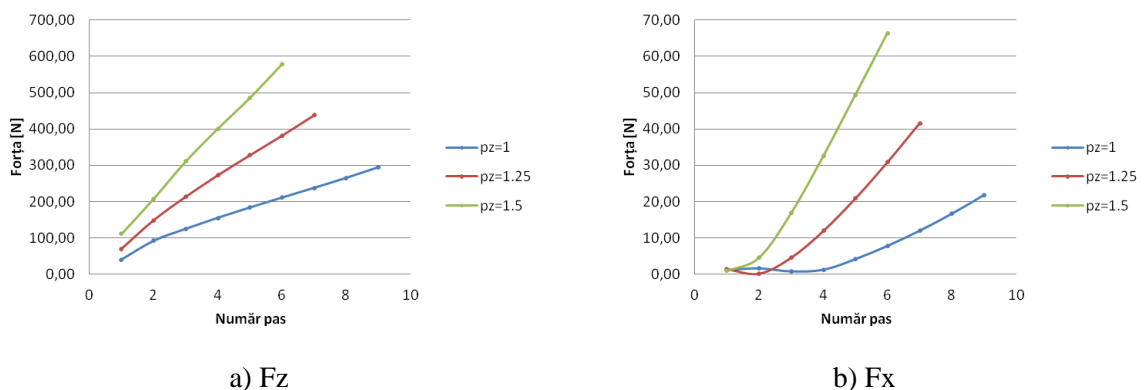


Fig. 3.8 Variația gradului de deformare logaritmic în funcție de pas

Graficele evidențiază faptul că:

- forțele de deformare F_x
 - ◆ scad o dată cu creșterea diametrului poansonului și a lungimii plăcii active;
 - ◆ cresc o dată cu creșterea pasului vertical, a grosimii materialului și a unghiului de înclinare al peretelui piesei;
- forțele de deformare F_z
 - ◆ scad o dată cu creșterea lungimii plăcii active;
 - ◆ cresc o dată cu creșterea pasului vertical, a diametrului poansonului, a grosimii materialului semifabricatului și a unghiului de înclinare al peretelui piesei.

Spre exemplificare, se prezintă în figura 3.13 variația forțelor de deformare în funcție de pasul vertical adoptat.



a) F_z

b) F_x

Fig. 3.13 Variația forțelor de deformare în funcție de pas

3.4 Concluzii

Concluziile rezultate sunt valabile pentru o stare plană de tensiuni în material și doar în zona de pătrundere pe direcție verticală a poansonului, zona unde, în cazul real, se întâlnesc maximele deformațiilor și forțelor. Se pot aprecia astfel, pe baza studiului teoretic, tendințele de variație ale gradului de deformare logaritm și ale forțelor pe cele două direcții în funcție de parametrii geometrici semnificativi, dar nu se pot determina cu certitudine mărimile cantitative ale acestor parametri.

O influență semnificativă asupra deformațiilor o au pasul vertical p_z , unghiul peretelui piesei θ și raza poansonului R_p .

În cazul forțelor, parametrii care au o influență semnificativă sunt pasul vertical p_z , grosimea materialului semifabricatului g și lungimea laturii deschiderii părții inferioare a sistemului de fixare L_{pl} .

În realitate, în cazul deformării incrementale a tablelor metalice, starea de deformare este spațială, complexă iar comportarea reală a materialului la o astfel de solicitare este dificil de determinat analitic. Pentru o apreciere mai bună și completă a comportării materialului sunt necesare simulări numerice ale procesului de deformare incrementală prin metoda elementului finit, metodă care dă rezultate mult mai apropiate de realitate.

4 SIMULAREA NUMERICĂ A PROCEDUREI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ „ÎNTR-UN SINGUR PUNCT” PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT

4.1 Metoda de analiză folosită pentru modelare

O privire de ansamblu asupra metodei de analiză folosite în lucrarea de față este dată de diagrama din figura 4.4. În diagramă se prezintă faza de preprocesare a datelor corespunzătoare modelului fizic al procesului de prelucrare. La început se definesc corpurile deformabile și cele rigide pe baza geometriei semifabricatului și a sculelor. Geometria este cea specifică momentului de început al prelucrării. Pe baza geometriei corpului deformabil, acesta este discretizat în elemente finite. Setului de elemente astfel definit i se asociază:

- date de material, în speță curba de curgere;
- date geometrice, respectiv faptul că elementele sunt de tip solid și satisfac condiția de incompresibilitate;

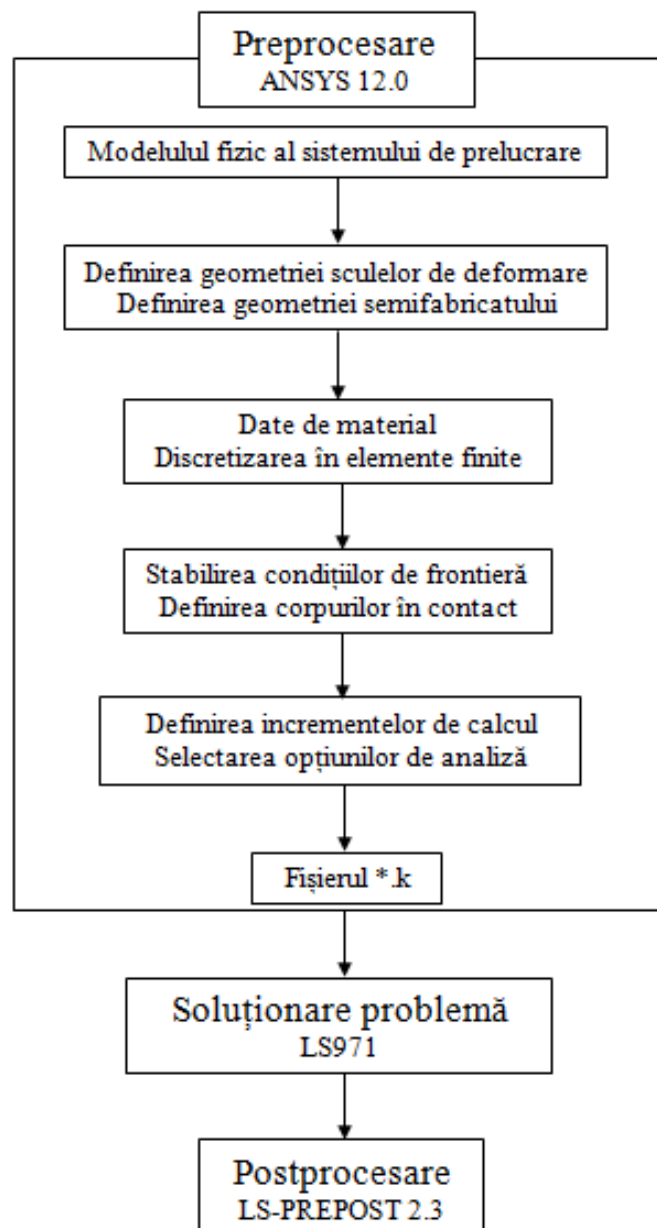


Fig. 4.4 Algoritm de simulare prin MEF

- tipul de element; pe baza recomandărilor din literatura de specialitate.

4.2 Modelele cu element finit utilizate în studiul procedurii de deformare incrementală

Obiectivele cercetărilor prin metoda elementului finit au avut ca scop:

1. determinarea influenței parametrilor geometrici asupra deformațiilor principale și subțierii relative;
2. distribuția deformațiilor pe piesă și evoluția acestora în timpul deformării;
3. determinarea forțelor și a energiei consumate în proces;
4. determinarea revenirii elastice.

În tabelul 4.1 sunt prezentate tipurile de analize efectuate, parametrii luați în considerare și domeniul lor de variație. Numărul tipului de analiză din tabel corespunde cu numărul obiectivului urmărit.

Tabelul 4.1

Parametrul	Domeniul de variație	Tip analiză			
		1	2	3	4
Diametrul poansonului D_p [mm]	6	x	-	-	-
	10	x	x	x	x
Pasul vertical p_z [mm]	1	x	x	x	x
	0,25	x	-	-	-
Grosimea materialului g [mm]	0,8	x	x	x	x
	1,14	x	-	-	-
Numărul punctelor de integrare	7	x	x	x	-
	11	-	-	-	x
Tipul traiectoriei	canal rectiliniu	x	x	x	x
	trunchi de con	-	x	x	x
	trunchi de piramida	-	x	x	x

Pentru studiul distribuției deformațiilor și a variației forțelor în procedeul de deformare incrementală au fost utilizate două modele parametrice care au stat la baza analizelor cu element finit.

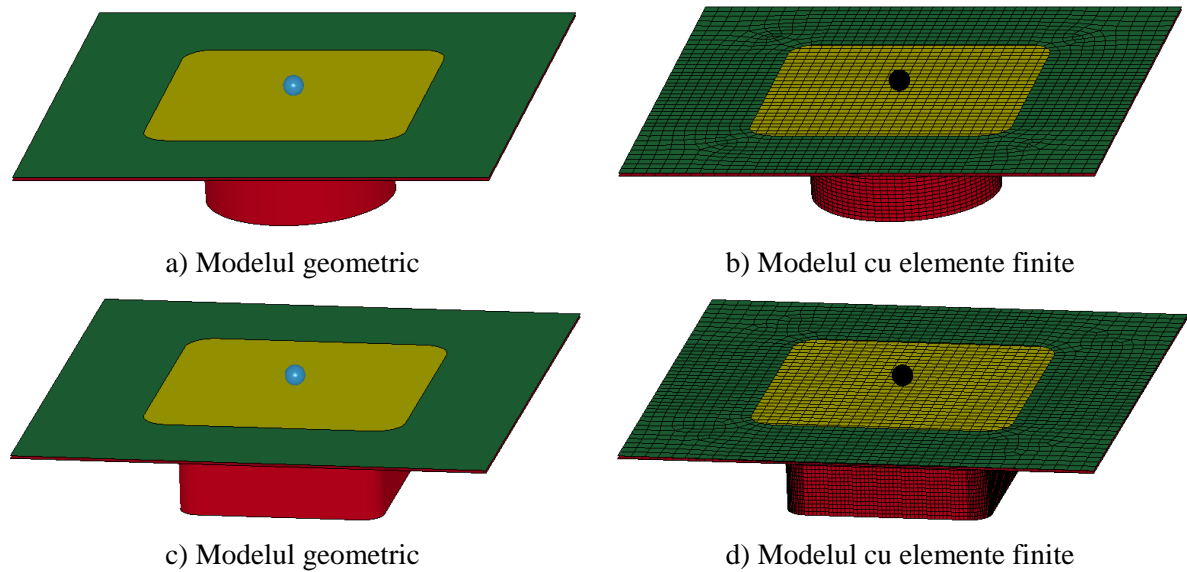


Fig. 4.5 Modele utilizate în analizele numerice

Toate modele au fost realizate utilizând ca și material aluminiul. În tabelul 4.2 sunt prezentate datele de material utilizate în simulările numerice.

Tabelul 4.2

Grosime [mm]	E [GPa]	ν [-]	σ_c [MPa]	K [MPa]	n [-]	ϵ_0 [mm/mm]	r_0 [-]	r_{45} [-]	r_{90} [-]
0,8	61	0,34	122,69	447	0,209	0,002	0,711	0,457	0,473
1,14	66	0,34	136,06	455	0,194	0,002	0,770	0,499	0,729

4.3 Determinarea influenței parametrilor geometrici asupra deformațiilor principale în procedeul de deformare incrementală într-un singur punct

Scopul acestei analize este de a evidenția distribuția deformațiilor principale, a subțierii relative, în procedeul de deformare incrementală într-un singur punct pentru piese de tip canal rectiliniu.

În continuare, se prezintă starea de deformații specifice precum și subțierea relativă pe direcția deplasării poansonului. Aceasta este reprezentată în succesiunea de figuri 4.13 - 4.18.

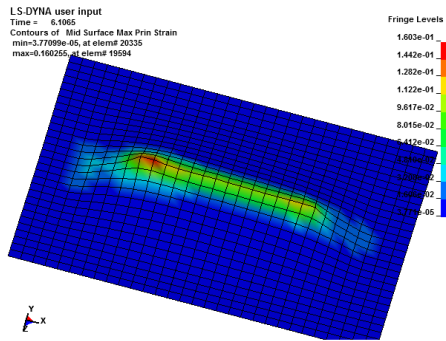


Fig. 4.13 Distribuția deformației principale, ε_1 [mm/mm] la deformarea unui canal rectiliniu

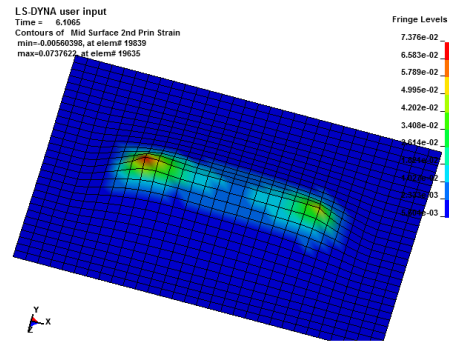


Fig. 4.14 Distribuția deformației secundare, ε_2 [mm/mm] la deformarea unui canal rectiliniu

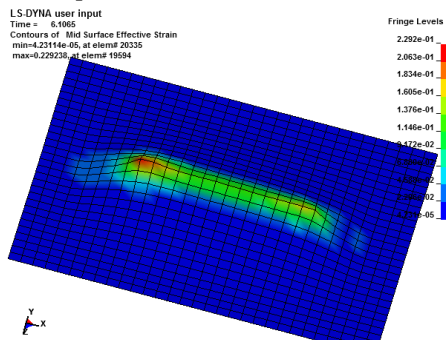


Fig. 4.15 Distribuția deformației echivalente, ε_{vM} [mm/mm] la deformarea unui canal rectiliniu

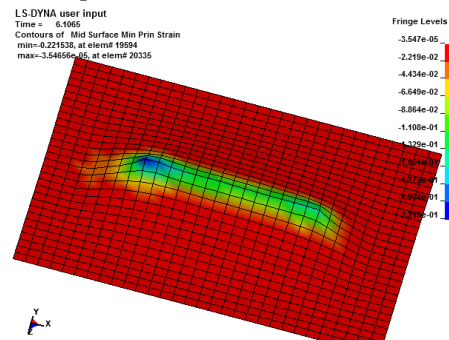


Fig. 4.16 Distribuția deformației pe grosime, ε_3 [mm/mm] la deformarea unui canal rectiliniu

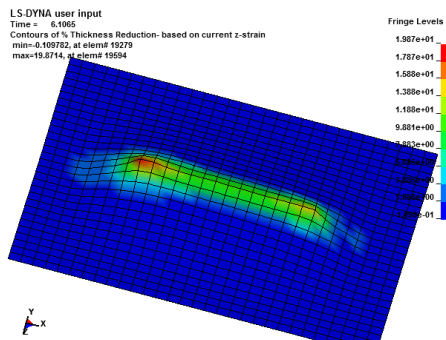


Fig. 4.17 Distribuția subțierii relative, s , % la deformarea unui canal rectiliniu

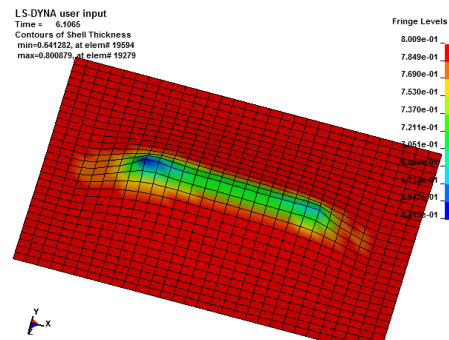


Fig. 4.18 Distribuția grosimii materialului, g [mm] la deformarea unui canal rectiliniu

Deformația principală are valori maxime de-a lungul deplasării poansonului pe direcția x , cu un maxim în zona de penetrare inițială pe direcția z . În figura 4.13 este prezentată deformația principală și modul de variație. Deformația secundară are un maxim în zonele de penetrare a poansonului, cu un maxim în zona de penetrare inițială a poansonului după cum se poate observa în figura 4.14. În figura 4.15 este prezentată deformația echivalentă von Mises, care atinge valori maxime în zonele de penetrare a poansonului și are o distribuție pe piesă la fel ca deformația principală.

Același fenomen, ca și în cazul deformațiilor, se poate observa din figurile 4.17 și 4.18 în cazul subțierii relative a materialului și a variației grosimii tablei.

Cazurile luate în considerare și valorile maxime ale rezultatelor analizei numerice pentru toți parametrii luați în considerare sunt prezentate în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3

Caz	d_p [mm]	p_z [mm]	g [mm]	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
C1	10	0,25	0,8	0,1865	0,1029	0,2802
C2	10	1	0,8	0,1955	0,0884	0,2767
C3	10	0,25	1,14	0,1986	0,1152	0,3161
C4	10	1	1,14	0,2179	0,1097	0,3046
C5	6	0,25	0,8	0,198	0,1211	0,3142
C6	6	1	0,8	0,2155	0,09209	0,3024
C7	6	0,25	1,14	0,2127	0,1354	0,34
C8	6	1	1,14	0,2359	0,1027	0,3336

După cum se poate observa din tabel, cu cât pasul vertical este mai mic avem deformații secundare și subțiere relativă mai mari. Cu creșterea diametrului poansonului cresc valorile pentru toate caracteristicile studiate, deformații principale și subțiere relativă.

4.4 Distribuția deformațiilor pe piesă la deformarea incrementală într-un singur punct

Pentru determinarea distribuției deformațiilor la deformarea incrementală s-a ales un model cu elemente finite în care s-a utilizat un semifabricat având un mesh ca în cazul analizelor pentru determinarea influenței parametrilor geometrici.

Pentru acest studiu au fost luate în considerare trei tipuri de traiectorii: traiectorie pentru descrierea unui canal rectiliniu cu indexare pe z la fiecare capăt, traiectorie pentru descrierea unui trunchi de con și traiectorie pentru descrierea unui trunchi de piramidă. În cadrul simulărilor s-a utilizat un poanson cu diametrul de 10 mm, pasul vertical al poansonului de 1 mm și ca material un aluminiu având grosimea de 0,8 mm. În continuare sunt prezentate rezultatele pentru toate cele trei tipuri de traiectorii. În continuare, în rezumat, sunt prezentate rezultatele obținute la realizarea unui trunchi de piramidă.

Trunchi de piramidă

Din analiza figurilor 4.35 - 4.40 se poate observa faptul că deformațiile principală și echivalentă au o distribuție neuniformă pe suprafața semifabricatului supus deformării remarcându-se localizarea pronunțată a deformațiilor maxime de-a

lungul traiectoriei pe care s-a deplasat poansonul. Acest fapt se poate explica prin reducerea treptată a secțiunii aflată în fața focarului de deformare în deplasarea acestuia.

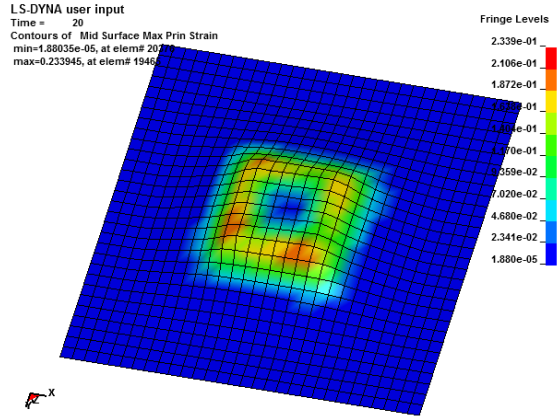


Fig. 4.35 Distribuția deformației principale, ε_1 [mm/mm] la deformarea unui trunchi de piramidă

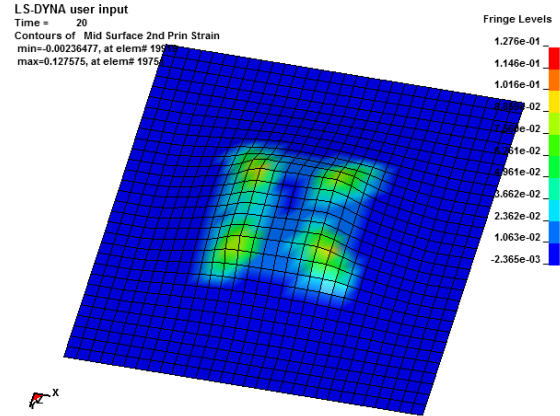


Fig. 4.36 Distribuția deformației secundare, ε_2 [mm/mm] la deformarea unui trunchi de piramidă

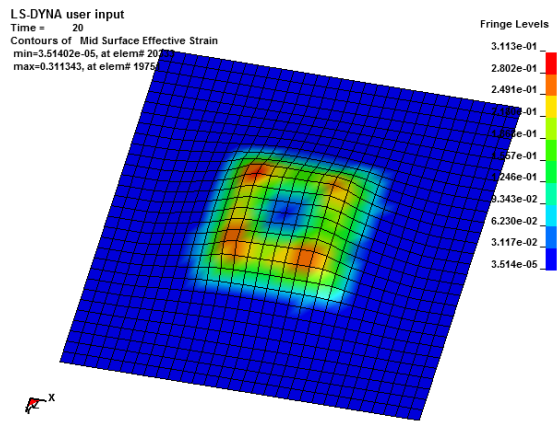


Fig. 4.37 Distribuția deformației echivalente, ε_{vM} [mm/mm] la deformarea unui trunchi de piramidă

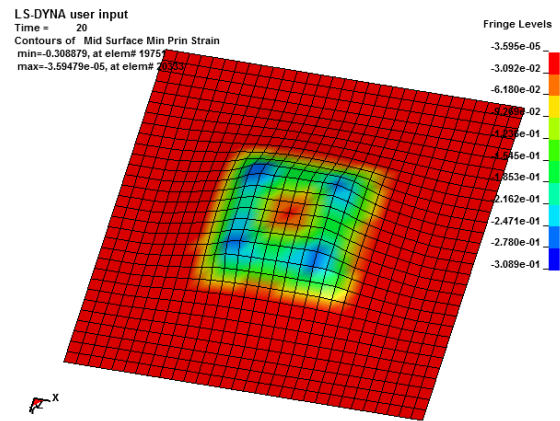


Fig. 4.38 Harta distribuției deformației pe grosime, ε_3 [mm/mm] la deformarea unui trunchi de piramidă

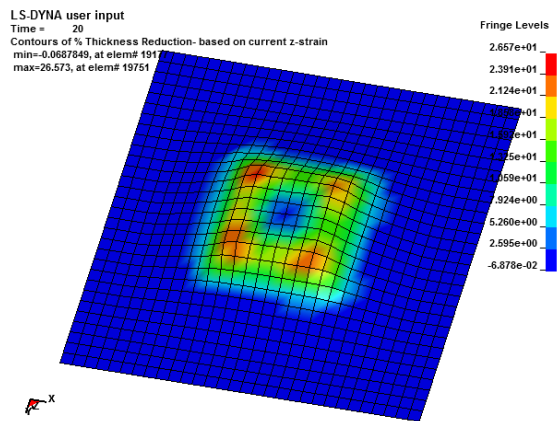


Fig. 4.39 Distribuția subțierii relative a materialului, s , % la deformarea unui trunchi de piramidă

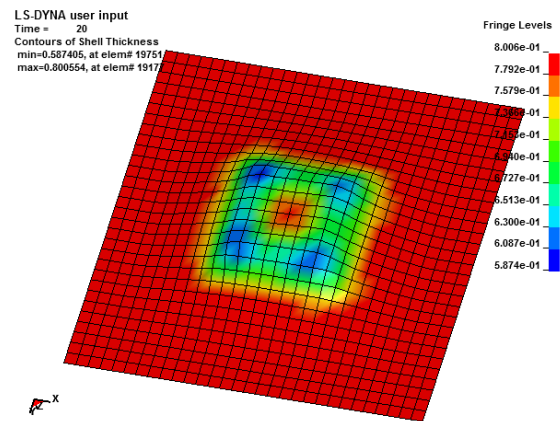


Fig. 4.40 Distribuția grosimii materialului, g [mm] la deformarea unui trunchi de piramidă

Deformația secundară are valori maxime în colțurile piesei, cu un maxim în colțul în care poansonul execută mișcarea de avans pe direcție verticală.

Observația referitoare la deformația principală se reconfirmă și la nivelul grosimii tablei și subțierii relative înregistrate la sfârșitul simulării (fig. 4.39 și 4.40).

Pentru evidențierea evoluției deformațiilor principale, a subțierii relative și deplasării pe direcția z pe piesa rezultată s-au ales cinci noduri, după cum urmează: un nod (56644) aflat chiar în marginea zonei de pătrundere a poansonului la primul pas, altul situat în zona de pătrundere a poansonului la primul pas (54475), altul aflat în zona de mijloc dintre primul și ultimul pas (52789), altul în zona de penetrare la ultimul pas (52063) și ultimul în zona de mijloc a piesei (48446). Poziția elementelor selectate pentru analiză este prezentată în figura 4.41.

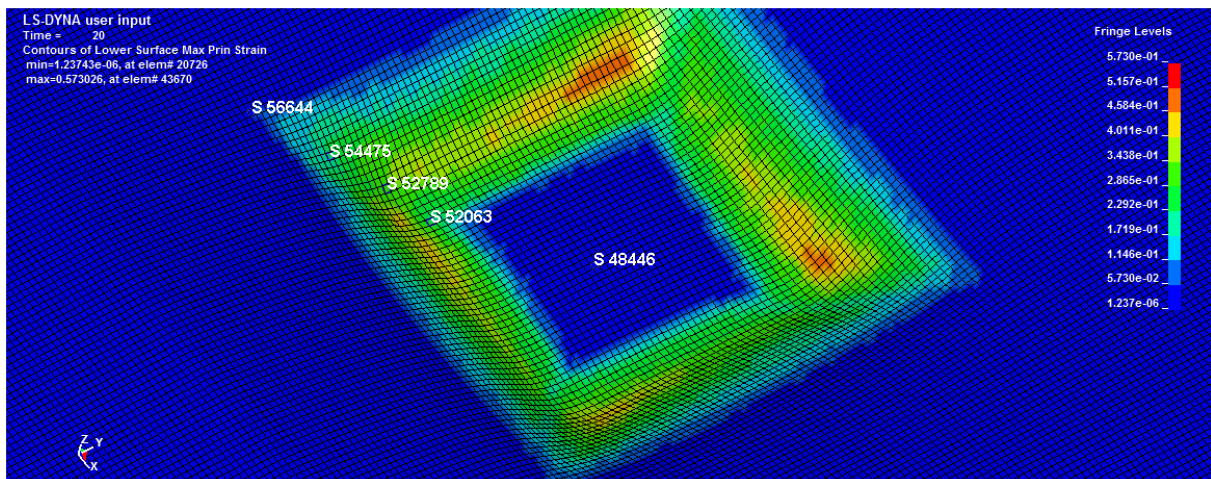


Fig. 4.41 Poziția elementelor pentru care au fost studiate variațiile parametrilor caracteristici în timpul deformării

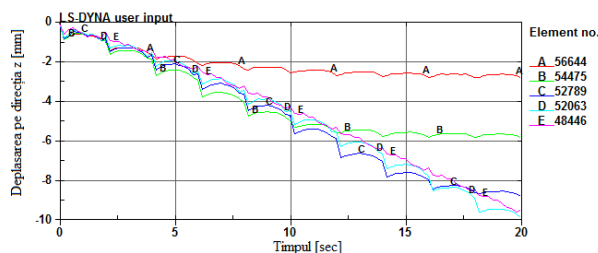


Fig. 4.42 Variația în timp a deplasării de direcția Z

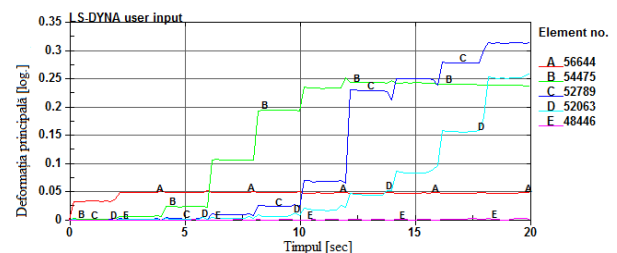


Fig. 4.43 Variația în timp a deformației principale

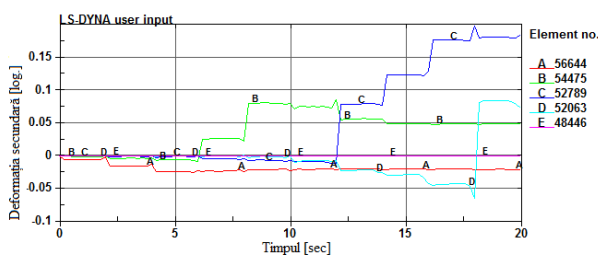


Fig. 4.44 Variația în timp a deformației secundare

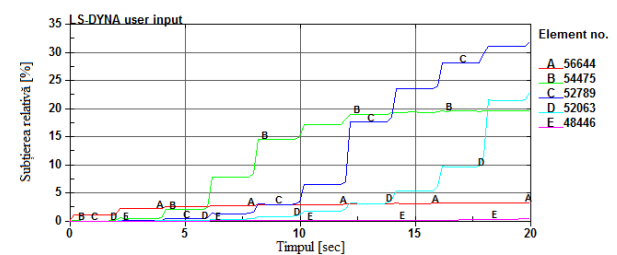


Fig. 4.45 Variația în timp a subțierii relative

În figura 4.42 este prezentată variația în timp a deplasării nodale pe cele cinci elemente. Se observă faptul că variația acestora este asemănătoare cu a nodurilor din cazul traiectoriei care descrie o piesă de tip trunchi de con. Valoarea maximă este prezentă la nivelul nodului din zona în care poansonul execută ultimul pas pe direcție verticală. Nodurile din centrul piesei, respectiv din zona învecinată zonei de pătrundere a poansonului au valori apropiate de valoarea maximă. În cazul nodurilor din apropierea zonei de penetrare a poansonului la primul pas, respectiv zona în care poansonul execută primul pas, se observă că la un moment dat au valori constante, aceste momente corespund pașilor în care poansonul nu mai vine în contact cu materialul din zonele respective.

În figura 4.43 este prezentată variația în timp a deformației principale. Din grafic se poate observa că nodul aflat în vecinătatea zonei de pătrundere și nodul din centrul piesei prezintă cele mai mici deformații. Deformațiile principale maxime sunt localizate la nivelul nodului din zona în care poansonul execută ultimul pas.

Variația în timp a deformației secundare este prezentată în figura 4.44. Din figură se observă că aceasta are valori maxime la fel ca și în cazul deformației principale, în nodul din zona unde poansonul execută ultimul pas. Deformațiile minime sunt localizate în aceleași noduri ca în cazul celor principale.

Din figurile 4.43 și 4.44 se observă că deformațiile, la fel ca în cazul trunchiului de con, rămân aproximativ constante în valoare (54475) după ce poansonul a deformat materialul din această zonă și deformează în continuare materialul din zonele inferioare (52789, 52063).

Evoluția valorilor subțierii relative a materialului este prezentată în figura 4.45. Aceasta are o evoluție asemănătoare cu a deformației principale, la fel ca și în cazul traiectoriei liniare.

4.5 Determinarea forțelor la deformarea incrementală

În cadrul acestor analize s-a urmărit determinarea forțelor (pe cele trei direcții x , y , z și a forței totale) și a energiei consumate în timpul procedurii de deformare incrementală (energia totală consumată și energia de tip Hourglass). Pentru acest studiu au fost luate în considerare trei tipuri de traiectorii: traiectorie pentru descrierea unui canal rectiliniu cu indexare pe z la fiecare capăt, traiectorie pentru descrierea unui trunchi de con, traiectorie pentru descrierea unui trunchi de piramidă. În cadrul simulărilor s-a utilizat un poanson cu diametrul de 10 mm, pasul vertical al poansonului de 1 mm și ca material un aluminiu având grosimea de 0,8 mm. Pentru

simulare s-a ales un model cu elemente finite în care s-a utilizat un semifabricat având un mesh foarte fin. În continuare, în rezumat, sunt prezentate rezultatele obținute la realizarea unui trunchi de con.

Trunchi de con

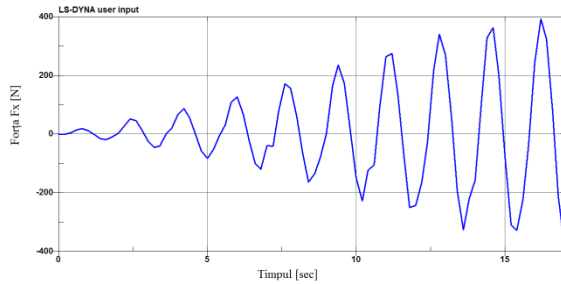


Fig. 4.52 Variatia componentei, F_x [N] a fortei din timpul procesului de deformare

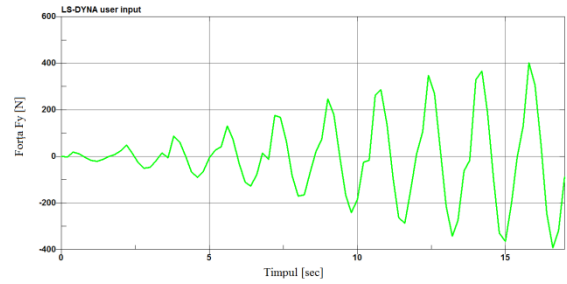


Fig. 4.53 Variatia componentei, F_y [N] a fortei din timpul procesului de deformare

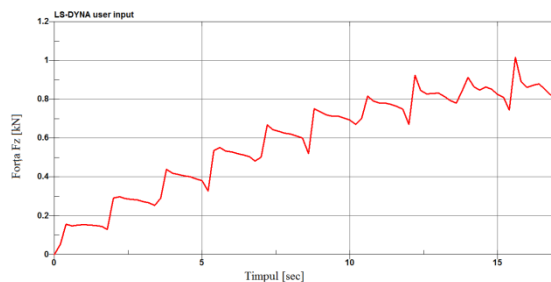


Fig. 4.54 Variatia componentei, F_z [kN] a fortei din timpul procesului de deformare

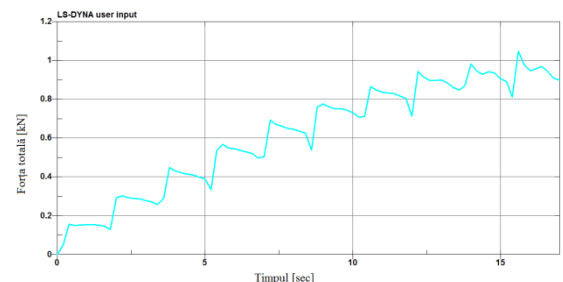


Fig. 4.55 Variatia rezultantei fortei, F_R [kN] din timpul procesului de deformare

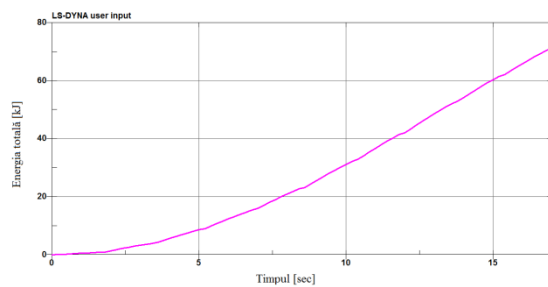


Fig. 4.56 Variatia energiei totale [kJ] în timpul procesului de deformare

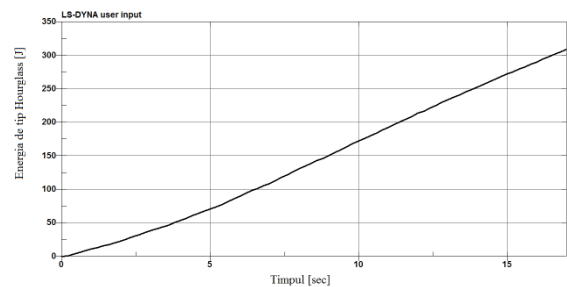


Fig. 4.57 Variatia energiei de tip Hourglass [J] în timpul procesului de deformare

În figurile 4.52 – 4.55 sunt prezentate forțele cele trei direcții z (verticală) și x și y (în planul tablei) și forța rezultantă din proces. Din grafice se poate observa că forțele, în timp ce poansonul execută deplasările circulare în planul tablei, au o formă sinusoidală de variație, fenomen mult mai pronunțat în cazul forțelor pe direcțiile x și y. La întoarcerea poansonului în punctul inițial, chiar înainte de a face o nouă pătrundere pe z, putem vedea o scădere bruscă a forței de deformare, urmată de o creștere bruscă atunci când poansonul pătrunde din nou în material. Acest fenomen se

datorează faptului că poansonul pe durata parcurgerii unei traiectorii circulare în planul tablei întâlnește material nedeformat, excepție făcând momentul când ajunge din nou în punctul de început al deplasării în planul tablei.

În figura 4.56 este prezentată energia totală consumată în timpul executării unei piese de tip trunchi de con. După cum se poate vedea din grafic, energia consumată crește la fiecare pas având o formă de variație exponențială, la început, pe urmă aproximativ liniară. În figura 4.57 este prezentată energia de tip Hourglass, care și în acest caz este mult mai mică decât energia totală consumată în timpul procesului de deformare, deci deformațiile de tip clepsidră nu influențează foarte mult rezultatele analizei.

4.6 Determinarea revenirii elastice

Analizele prezentate până în momentul de față în acest capitol au fost analize explicite. Spre deosebire de acestea, analizele care au fost rulate pentru determinarea revenirii elastice sunt analize implicite. O analiză implicită pentru determinarea arcuirii elastice în programul ANSYS este precedată întotdeauna de o analiză explicită care simulează procedeul de deformare analizat. Astfel, după efectuarea analizei explicite se elimină toate corpurile considerate rigide din analiza explicită (în cazul de față : placa activă, poansonul și inelul de reținere), se importă geometria finală a piesei din analiza explicită și se importă starea de tensiuni și deformații de la finalul analizei explicite. Datele care definesc plasticitatea materialului sunt eliminate, rămânând doar cele care definesc comportarea elastică a acestuia, adică modulul de elasticitate (E) și coeficientul lui Poisson (ν), după care urmează soluționarea problemei cu ajutorul solverilor implicați din programul ANSYS 12.0. În analizele de față s-a determinat arcuirea elastică pentru trei tipuri de traiectorii: traiectorie pentru descrierea unui canal rectiliniu cu indexare pe z la fiecare capăt, traiectorie pentru descrierea unui trunchi de con, traiectorie pentru descrierea unui trunchi de piramidă. În cadrul simulărilor s-a utilizat un poanson cu diametrul de 10 mm, pasul vertical al poansonului de 1 mm și ca material un aluminiu având grosimea de 0,8 mm.

În continuare, în rezumat, sunt prezentate rezultatele obținute la realizarea unui canal rectiliniu.

Din figura 4.64 se poate observa că revenirea maximă se produce în zona în care poansonul pătrunde pe direcție verticală. Pentru canalul rectiliniu revenirea minimă se produce în partea opusă zonei de penetrare a poansonului la primul pas.

În urma acestor analize se poate trage concluzia că deși în urma traiectoriilor ar trebui să rezulte piese simetrice, datorită modului de deformare asimetric și a deformațiilor elastice prezente în timpul deformării, piesele rezultate în urma acestui procedeu de deformare prezintă o ușoară asimetrie.

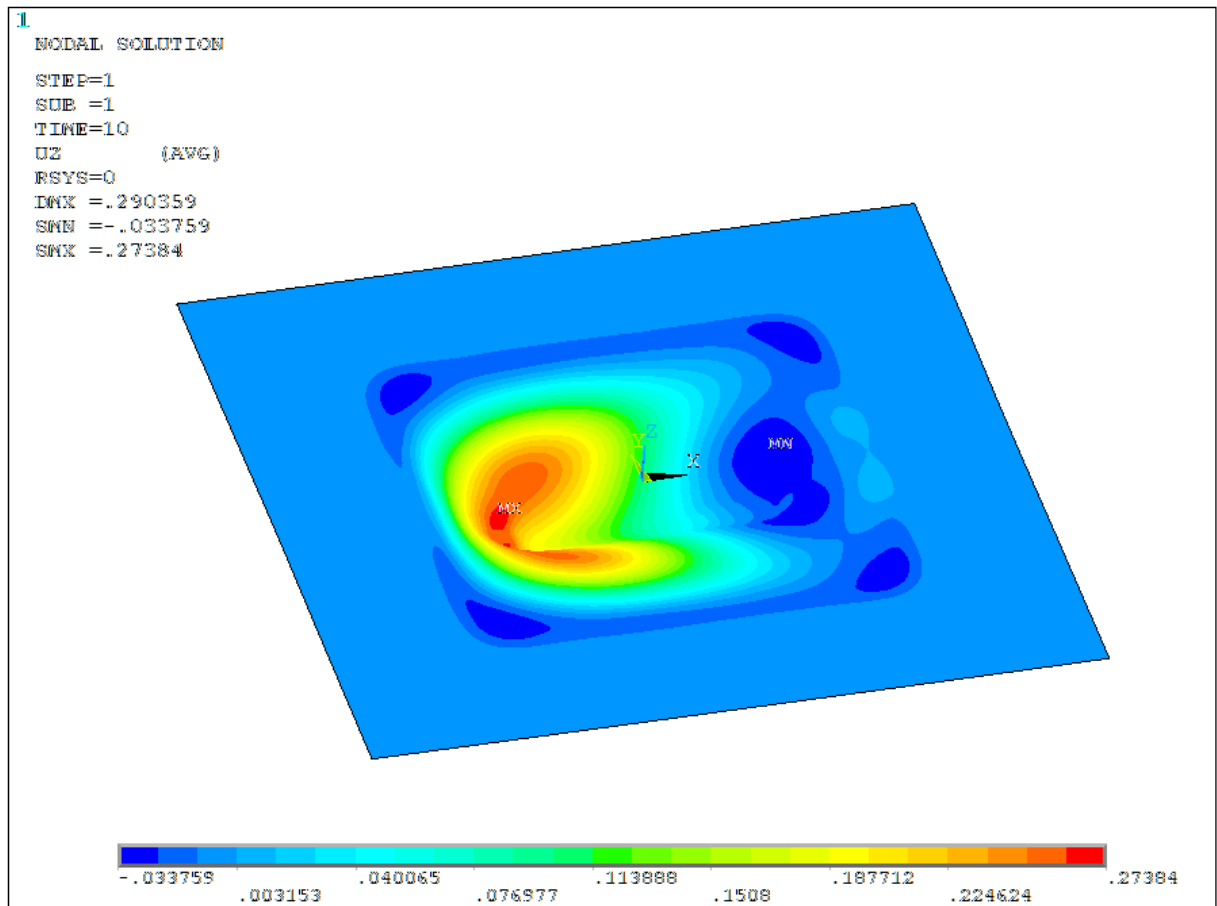


Fig. 4.64 Distribuția revenirii elastice pe direcția Oz pentru canalul rectiliniu

4.7 Concluzii

Pentru simularea numerică prin MEF a procedurii de deformare incrementală într-un singur punct s-au utilizat programele Ansys 12.0 și LS-DYNA. În acest scop au fost realizate două modele parametrice cu element finit.

Au fost realizate patru tipuri de analize prin metoda elementului finit: analize pentru determinarea influenței parametrilor geometrici asupra deformațiilor, analize pentru determinarea distribuției deformațiilor în piesă, analize pentru determinarea forțelor și analize pentru determinarea revenirii elastice. Pentru fiecare tip de analiză s-au utilizat trei tipuri de traiectorii: traiectorie pentru descrierea unui canal rectiliniu, traiectorie pentru descrierea unui trunchi de con și trunchi de piramidă.

5 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ A TABELOR METALICE SUBȚIRI

Cercetările experimentale au urmărit pe de o parte determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor, necesare simulărilor numerice și pe de altă parte validarea rezultatelor studiului teoretic referitor la deformațiile care apar în piese și forțele de deformare necesare. Ca urmare, au fost stabilite următoarele obiective:

- determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor prin încercarea la tracțiune;
- determinarea curbelor limită de deformare;
- determinarea deformațiilor pe piesele deformate incremental;
- determinarea forțelor pieselor deformate incremental;
- influența parametrilor geometrici asupra deformațiilor și forțelor;
- influența modului de deformare asupra deformațiilor și forțelor;
- influența parametrilor geometrici asupra preciziei piesei.

5.1 Instalațiile experimentale

În funcție de obiectivul urmărit au fost utilizate mai multe instalații și echipamente de cercetare prezentate în cele ce urmează.

Mașina de încercat la tracțiune

Pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor s-a utilizat o mașină de încercat la tracțiune, compresiune și flambaj Roell & Korthaus RKM 100/20 din dotarea Institutului pentru Deformări Plastice (Institut für Umformtechnik - IFU) Stuttgart.

Standul experimental pentru determinarea curbelor limită de deformare (CLD)

Pentru determinarea curbelor limită de deformare s-a utilizat standul de ambutisare aflat în dotarea Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice al Universității „Lucian Blaga” din Sibiu și sistemul optic de măsurare a deformațiilor în timp real Aramis.

Sistem optic de măsurat deformațiile tip Argus

Pentru a putea măsura deformațiile „off-line” a fost utilizat sistemul de măsurare optic Argus produs de către firma GOM. Epruvetele au fost marcate electrochimic sau cu laser înainte de deformare.

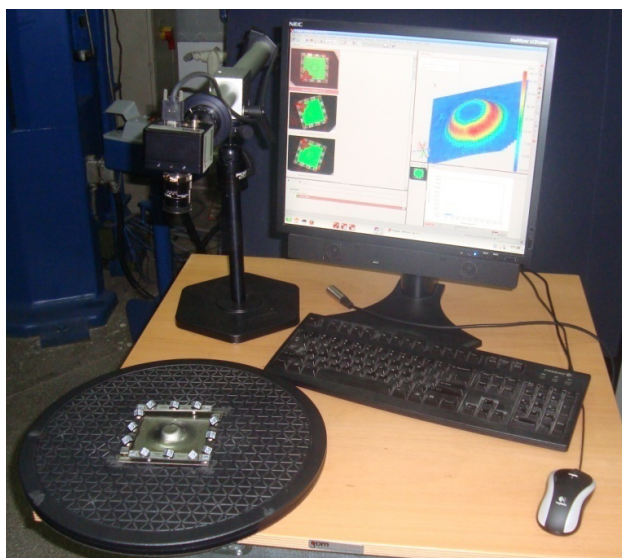


Fig. 5.3 Piesă în timpul măsurării deformațiilor

Instalația experimentală pentru studiul procesului de deformare incrementală

Deoarece laboratorul nu dispune de o mașină specializată de deformare incrementală, cercetările experimentale au fost efectuate pe o mașină de frezat cu comandă numerică în trei axe capabilă să descrie traiectoriile complexe pe care le parcurge poansonul în vederea obținerii unei piese de o anumită geometrie. S-au utilizat două tipuri de mașini de frezat, DMG Veco și Hass, în funcție de obiectivul urmărit și caracteristicile tehnico-funcționale ale mașinii.



a) Vedere de ansamblu



b) Detaliu cu matrița de deformare

Fig. 5.5 Instalația experimentală utilizând freza DMG

Mașina de măsurat în coordonate

Pentru determinarea preciziei pieselor obținute prin procedeul de deformare incrementală s-a utilizat o mașină de măsurat în coordonate Contourecord 1600D produsă de către firma Carl Zeiss aflată în dotarea firmei S.C. Compa S.A. din Sibiu.

5.2 Determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor prin încercarea la tracțiune

Programele de proiectare asistată moderne dau rezultate foarte bune cu condiția ca datele de intrare să fie cât mai precise. De asemenea, programele de simulare a proceselor de deformare plastică actuale permit introducerea datelor de material sub forma unei curbe definite prin perechile de puncte deformație – tensiune reală.

Intervalele între care variază datele specifice curbei de curgere plastică a materialului sunt $\sigma_{\max}=296,54-325,46$ MPa, $\varepsilon_{\max}=44,62-49,54$ %, $R_{p02}=163,32-204,59$ MPa, $n=0,2168-0,2412$ și $K=488,65-547,016$ MPa pentru oțel și $\sigma_{\max}=263,39-273,77$ MPa, $\varepsilon_{\max}=26,06-28,52$ %, $R_{p02}=149,03-166,66$ MPa, $n=0,2333-0,2584$ și $K=445,55-457,299$ MPa pentru aluminiu.

Coefficienții de anizotropie ai materialului au fost determinați pe mașina de încercat la tracțiune pe epruvete prelevate la 0, 45 și 90°.

5.3 Determinarea curbelor limită de deformare (CLD)

Curbele limită de deformare se determină pe cale experimentală prin puncte de coordonate $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, unde $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ sunt deformațiile limită, corespunzătoare unui anumit mod de încărcare a epruvetei (echibiaxială, biaxială, uniaxială etc.). Ca urmare, pentru a putea determina o curbă limită de deformare trebuie realizate diferite moduri de încărcare ale materialului cuprinse între întinderea echibiaxială ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) și forfecarea pură ($\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$) [24].

5.4 Determinarea deformațiilor la deformarea incrementală ”într-un singur punct”

Principalul obiectiv al acestor cercetări a constat în determinarea distribuției deformațiilor prin piesele deformat incrementale. Pentru realizarea pieselor s-au utilizat două tipuri de materiale, oțelul de ambutisare adâncă marca DC04 și aluminiul marca AA6016, ambele materiale având o comportare bună la deformare, după cum se poate observa din rezultatele obținute în urma efectuării testelor de încercare la tracțiune uniaxială și de determinare a curbelor limită la deformare (CLD).

S-a studiat:

- a) influența parametrilor geometrici asupra distribuției deformațiilor pentru:
 - calotă și canal rectiliniu având ca factori variabili:
 - ◆ pasul pe direcție verticală;
 - ◆ diametrul poansonului;
 - trunchi de piramidă având ca factori variabili:
 - ◆ pasul pe direcție verticală;
 - ◆ unghiul de înclinare al peretelui piesei;
- b) influența modului de deformare asupra deformațiilor pentru:
 - calotă;
 - trunchi de con;
 - trunchi de piramidă.

Epruvetele utilizate în cadrul cercetărilor au formă pătrată, având latura de 120 mm. Viteza de avans a poansonului este de 240 mm/min, iar turația acestuia de 180 rot/min.

Pentru realizarea pieselor prin procedeul de deformare incrementală „într-un singur punct” s-au utilizat mașinile de frezat, matrița de deformare și poansonul prezentate în capitolul 5.1. În anexa III sunt prezentate câteva tipuri de programe utilizate pentru descrierea mișcării după trei axe a poansonului în vederea obținerii unei anumite piese. Piese deformate au fost măsurate cu ajutorul sistemului optic de măsurare a deformațiilor Argus, măsurarea deformațiilor principale realizându-se „off-line”, după terminarea procesului de deformare incrementală.

5.4.1 Influența parametrilor geometrici asupra distribuției deformațiilor

În continuare, în rezumat, sunt prezentate rezultatele obținute la realizarea unei calote.

Distribuția deformațiilor și a subțierii relative la obținerea unei calote

Încercările au fost realizate pe epruvete din oțel, luându-se în considerare două grosimi: 0,5 și 0,9 mm. Nu s-au putut realiza încercările pe aluminiu deoarece acesta având o deformabilitate mai scăzută, a cedat în timpul procedurii de deformare incrementală, materialul rupându-se în timpul deformării. În tabelul 5.6 sunt prezentați parametrii geometrici luați în considerare și domeniul lor de variație.

Tabelul 5.6

Parametrul	Valori	
Diametrul poansonului d_p [mm]	6	10
Pasul pe direcție verticală a poansonului p_z [mm]	0,25	1

Pentru determinarea distribuției deformațiilor a fost efectuat câte un set de patru încercări pentru fiecare grosime de material. Trajectoriile poansonului sunt prezentate în figura 5.17, a. Poansonul execută o deplasare pe direcție verticală (z), cu un anumit pas constant (p_z), și pe y o deplasare variabilă în funcție de raza (R_i). După fiecare deplasare în planul yOz , poansonul execută o mișcare circulară într-un plan paralel cu planul tablei (xOy) de rază R_i . Calota realizată în cadrul acestui test are raza interioară de 17 mm.

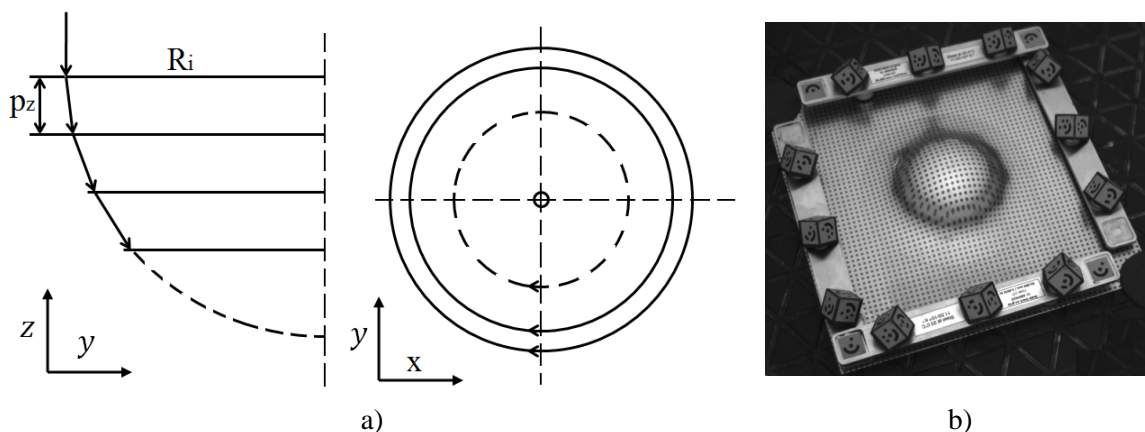


Fig. 5.17 a) Trajectoriile descrise de poanson b) Calotă

Rezultatele obținute în urma cercetărilor experimentale sunt prezentate în tabelul 5.7.

Valori maxime ale deformațiilor principale și subțierii relative, după cum reiese din tabel, se obțin în cazurile C1 (pentru materialul de 0,9 mm grosime) și C3 (pentru materialul de 0,5 mm grosime), cazuri în care se utilizează un poanson de 6 mm și un pas vertical de 0,25 mm, dar în același timp în aceste cazuri se obțin valori minime pentru deformațiile secundare.

Valorile maxime pentru deformațiile secundare se obțin pentru cazurile C6 (pentru materialul de 0,9 mm grosime) și C8 (pentru materialul de 0,5 mm grosime), cazuri în care se utilizează un diametru al poansonului de 10 mm și un pas vertical de 1 mm. În același timp, în aceste cazuri se obțin valori minime ale deformațiilor principale și subțierii relative pentru fiecare grosime de material.

Tabelul 5.7

Caz	d_p [mm]	g [mm]	p_z [mm]	$\varepsilon_{1 \max}$	$\varepsilon_{2 \max}$	subț
C1	6	0,9	0,25	0,774	0,0733	0,921
C2	6	0,9	1	0,753	0,152	0,872
C3	6	0,5	0,25	0,956	0,0831	0,972
C4	6	0,5	1	0,875	0,147	0,92
C5	10	0,9	0,25	0,712	0,091	0,794
C6	10	0,9	1	0,649	0,16	0,747
C7	10	0,5	0,25	0,916	0,0944	0,897
C8	10	0,5	1	0,765	0,1508	0,861

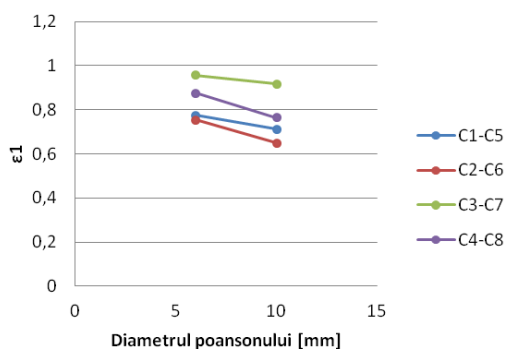


Fig. 5.18 Influența diametrului poansonului asupra deformațiilor principale, ϵ_1

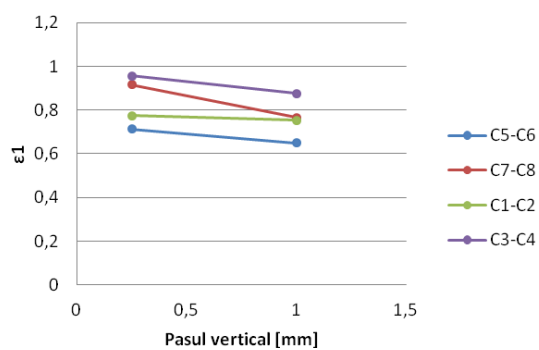


Fig. 5.19 Influența pasului pe direcție verticală asupra deformațiilor principale, ϵ_1

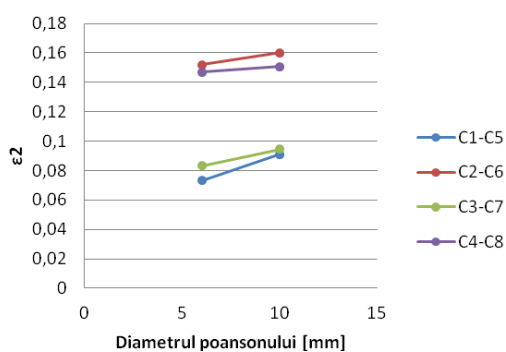


Fig. 5.20 Influența diametrului poansonului asupra deformațiilor secundare, ϵ_2

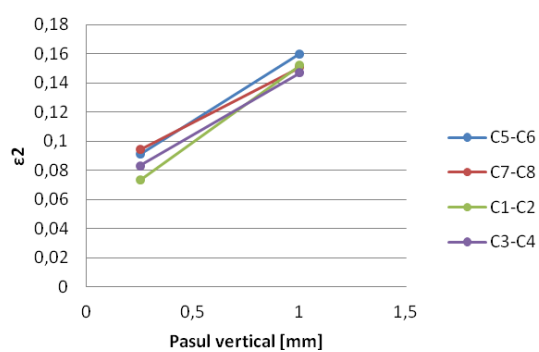


Fig. 5.21 Influența pasului pe direcție verticală asupra deformațiilor secundare, ϵ_2

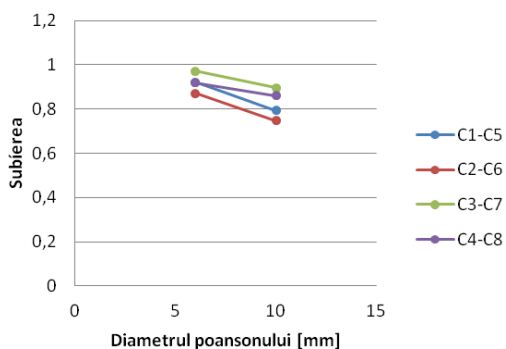


Fig. 5.22 Influența diametrului poansonului asupra subțierii relative

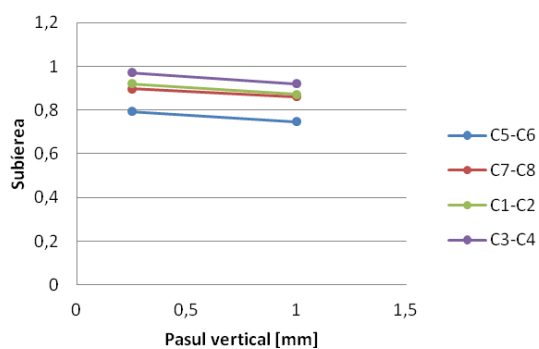


Fig. 5.23 Influența pasului pe direcție verticală asupra subțierii relative

Din analiza tabelului se evidențiază faptul că:

- scăderea valorilor diametrului poansonului duce la
 - ◆ scăderea valorilor deformației secundare (fig. 5.20)
 - ◆ creșterea deformației principale (fig. 5.18) și a subțierii relative (fig. 5.22);

- scăderea pasului pe direcție verticală duce la
 - ◆ scăderea valorilor deformației secundare (fig. 5.21);
 - ◆ creșterea valorilor deformației principale (fig. 5.19) și a subțierii relative (fig. 5.23).

Pentru a putea pune în evidență evoluția deformațiilor prin piesele deformate incremental, calota de la cazul C8 a fost secționată după două direcții (fig. 5.24): una perpendiculară (PP) pe planul xOy , care taie piesa în două prin mijlocul acesteia și una orizontală, PR (paralelă cu planul xOy) care se găsește la o distanță de 9,5 mm față de zona nedeformată a piesei. După direcția perpendiculară calota a fost secționată cu câte cinci plane unul fiind coincident cu aceasta iar celelalte plasate simetric de o parte și de alta la distanța de 2 mm (fig. 5.24, c) și după direcția orizontală calota a fost secționată cu un singur plan de secționare (fig. 5.24, b).

În figurile 5.25 - 5.27 sunt prezentate distribuțiile deformației principale, deformației secundare și ale subțierii relative pentru cazul C8. Modul de măsurare a fost prezentat în subcapitolul 5.1.

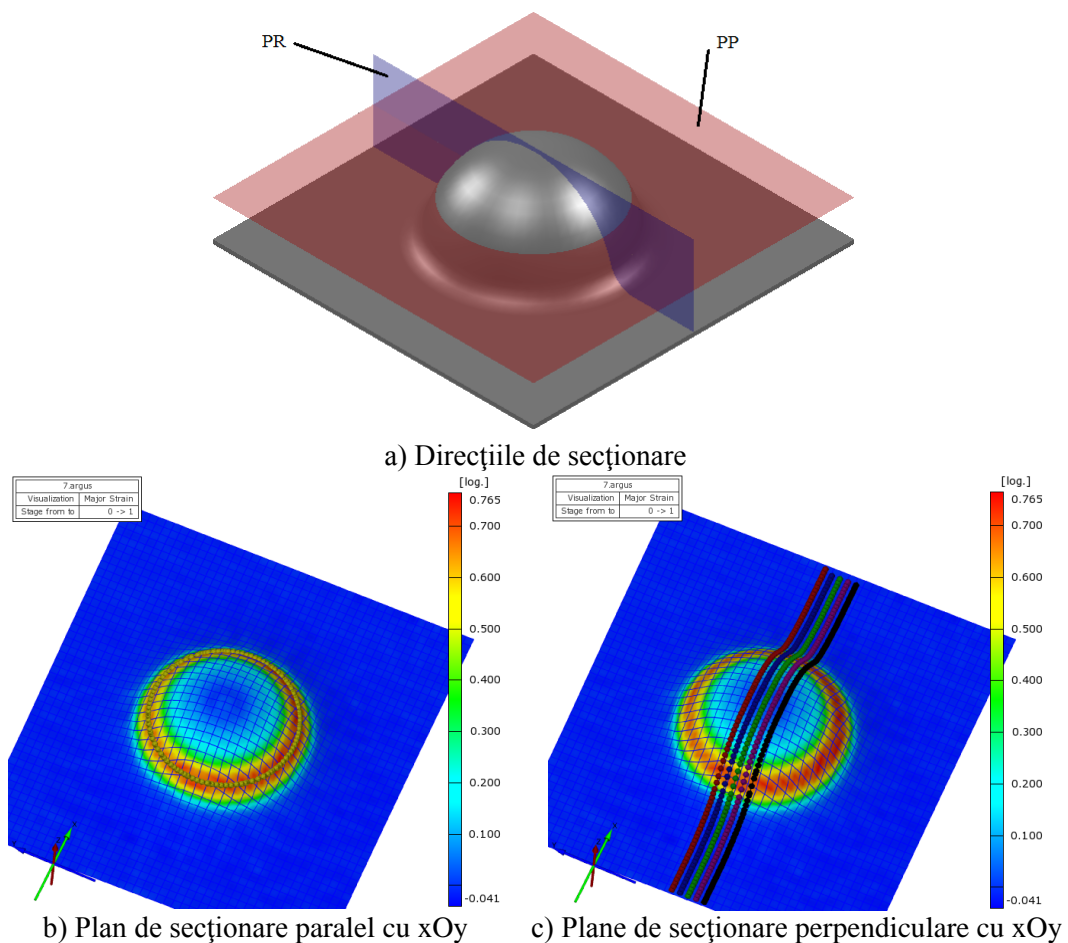


Fig. 5.24 Tipuri de secțiuni duse prin piesă

După cum se poate observa din figura 5.25, a, deformăția principală variază în plane paralele cu planul xOy , plane care coincid cu deplasările circulare ale poansonului. Aceste deformății au valori maxime în zona în care poansonul începe mișcarea circulară în planul tablei. Valorile lor scad pe măsură ce poansonul se deplasează în plan.

Dacă se analizează deformăția principală în planul perpendicular pe planul xOy (fig. 5.25, b), se observă că valoarea deformăției principale nu este uniformă și prezintă două maxime locale. Valorile deformăției principale scad spre vârful calotei, fapt specific deformării incrementale cu poanson.

Deformăția principală are valori maxime în zona de început a deformării, adică în zona în care poansonul execută primele pătrunderi verticale și avansuri circulare. Acest fenomen se datorează faptului că la executarea primilor pași, după cum se poate observa și din figura 5.17, a, poansonul are o deplasare mică pe direcția y fapt care conduce la pătrunderea acestuia în zona materialului deformat anterior, rezultând astfel deformății mai mari în zona respectivă. Pe măsură ce poansonul avansează, deplasarea pe direcția y crește ajungând să deformeze zone de material nedeformat, rezultând astfel deformății mai mici spre centrul calotei.

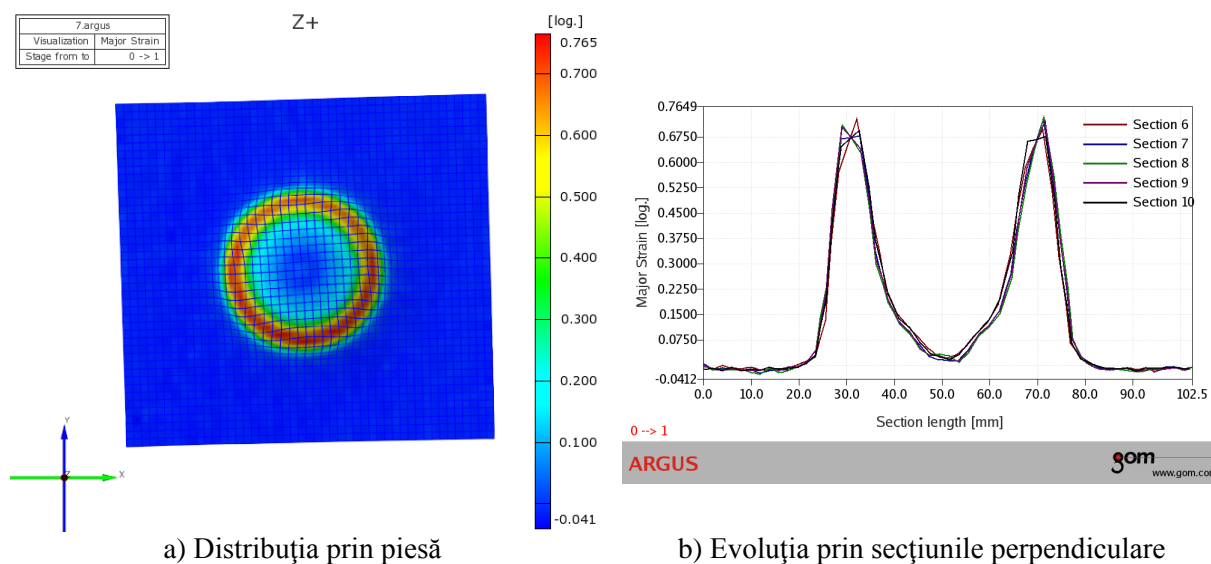
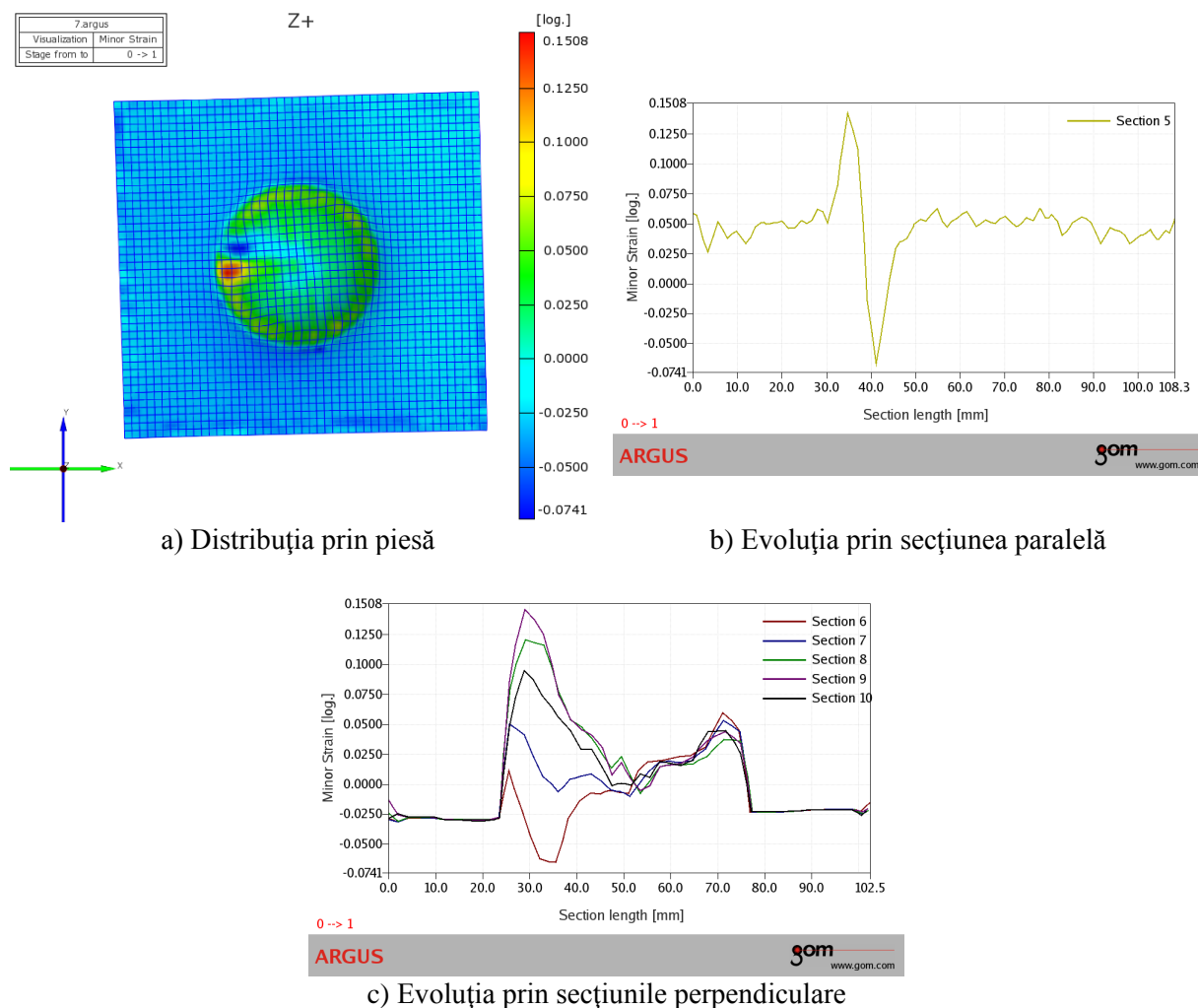


Fig. 5.25 Deformația principală

În figura 5.26 este prezentată variația deformăției secundare. Din figură se poate vedea că aceasta prezintă valori maxime în zona în care poansonul pătrunde vertical la fiecare pas. Deformația secundară are valori minime în momentul în care poansonul revine în poziția inițială, după parcurgerea traiectoriei circulare. În această zonă avem deformății secundare mai mici deoarece în timpul deplasării în planul xOy

În fața poansonului se acumulează material dar, spre finalul traiectoriei circulare, când poansonul se apropie de zona deformată inițial nu mai întâmpină rezistență la deformare. Acest fapt este pus în evidență și din figura 5.26, b unde se poate observa creșterea valorii deformației secundare în momentul executării pătrunderii verticale, dar și a momentului de sfârșit al mișcării circulare, când se observă scăderea bruscă a valorii. Fenomenul este surprins și în secțiunile perpendiculare, figura 5.26, c.



c) Evoluția prin secțiunile perpendiculare
Fig. 5.26 Defomația secundară

Variația subțierii relative pentru acest caz este prezentată în figura 5.27. Aceasta are același mod de variație cu deformația principală. Are valori maxime în zona de pătrundere și pe măsură ce poansonul execută traiectoriile circulare valorile acesteia scad.

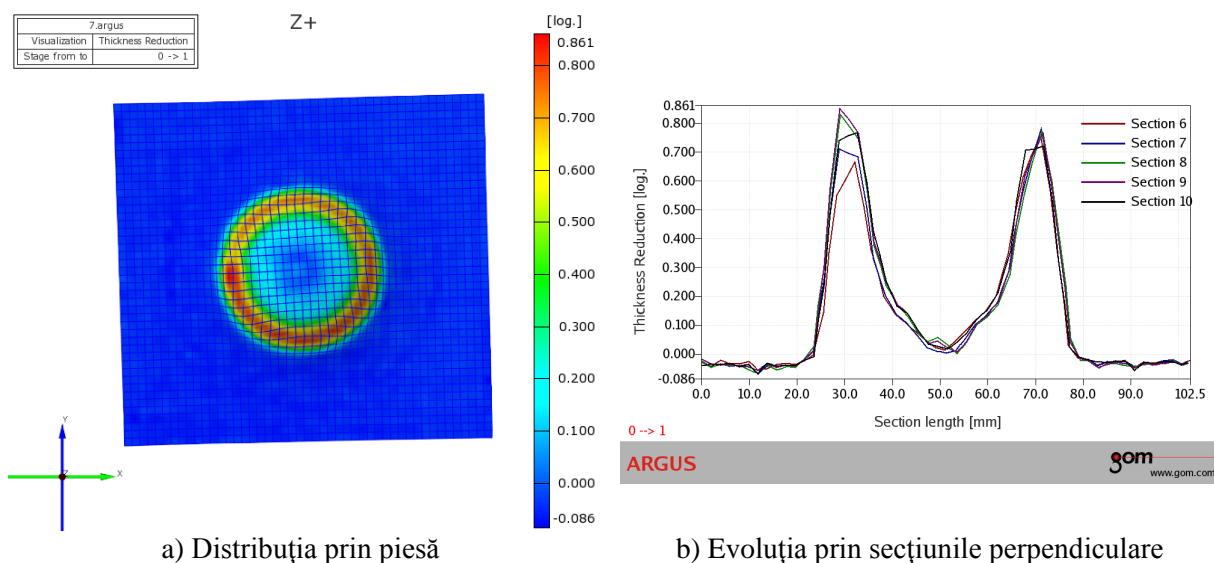


Fig. 5.27 Subțierea relativă

5.4.2 Influența modului de deformare asupra distribuției deformațiilor

În continuare, în rezumat, sunt prezentate rezultatele obținute la realizarea unei calote.

Distribuția deformațiilor și a subțierii relative la obținerea unei calote

Principalul obiectiv al acestor cercetări a constat în determinarea modului optim de deformare astfel încât calota obținută prin deformare incrementală „într-un singur punct”. să aibă o distribuție cât mai uniformă a deformațiilor iar subțierea relativă să fie minimă. Pentru realizarea pieselor s-au utilizat epruvete din oțel cu grosimea de 0,7 mm și un poanson având diametrul de 8 mm. Calotele obținute au raza interioară de 19 mm.

Traectoria sculei de deformare este foarte importantă în obținerea pieselor prin procedeul de deformare incrementală motiv pentru care am ales, pentru realizarea pieselor sub formă de cupolă, trei variante de traiectorii conform figurii 5.50.

Varianta V1: Această traiectorie este definită de faptul că pasul pe direcție verticală (direcția z), are o valoare constantă $p_z = 1\text{mm}$, pe toată durata procedurii de deformare. Punctul de pornire al poansonului se regăsește pe cercul de diametru maxim. După parcurgerea unui cerc complet (360°), poansonul pătrunde cu un pas care rămâne constant pe direcție verticală (p_z) rezultând un unghi în planul xOz a cărui valoare se modifică la fiecare pas (θ_i) așa cum se poate observa în figura 5.50, a. Acest

lucru conduce de fapt la deplasarea poansonului pe un cerc în plan orizontal a cărui rază se modifică cu fiecare pas realizat pe direcție verticală. Mișcarea poansonului se repetă până când întreaga geometrie a piesei este definită. Trebuie menționat că poansonul își păstrează poziția verticală pe tot parcursul procesului de deformare.

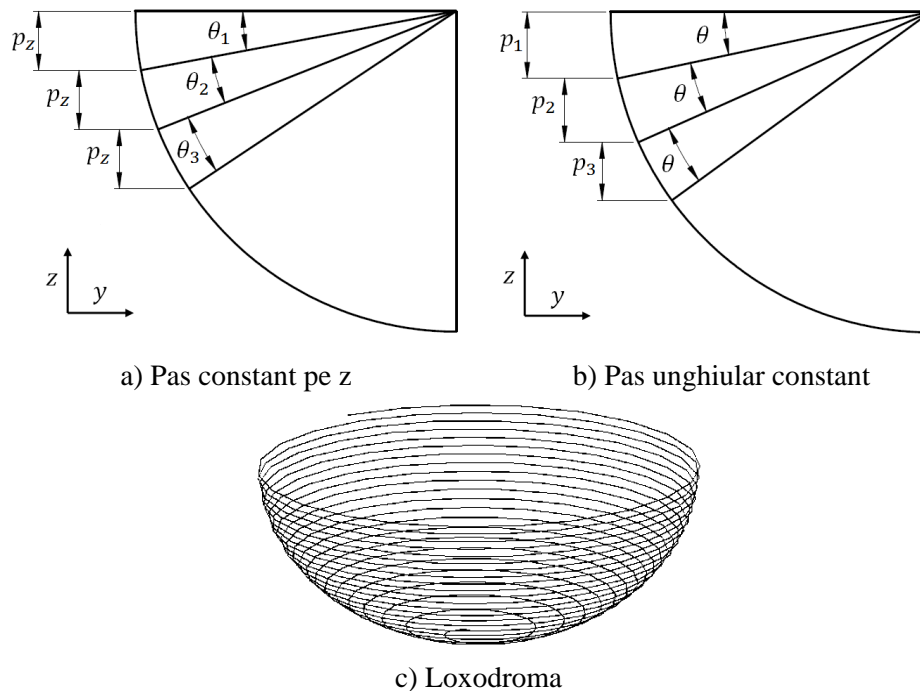


Fig. 5. 50 Traiectoriile poansonului pentru obținerea unei calote

Varianta V2: Această traiectorie este definită de faptul că unghiul de pătrundere al poansonului în planul yOz (θ), are o valoare constantă, pe toată durata procesului de deformare. Punctul de pornire al poansonului se regăsește și în acest caz pe cercul de diametru maxim. După parcurgerea unui cerc complet (360°), poansonul pătrunde cu un unghi $\theta = 6^\circ$ și cu un pas vertical care se modifică după parcurgerea fiecărei traiectorii circulare ($p_{z,i}$) așa cum se poate observa în figura 5.50, b. Acest lucru conduce și în acest caz la deplasarea poansonului pe un cerc în plan orizontal a cărui rază se modifică cu fiecare pas realizat pe direcție verticală.

Varianta V3: Această traiectorie este de fapt o traiectorie loxodromă (fig. 5.50, c). Poansonul are același punct de pornire ca și în cazul celorlalte două tipuri de traiectorii. Caracteristica traiectoriei loxodrome este aceea că aceasta taie toate meridianele unui corp sferic la același unghi. Pasul între două traiectorii succesive a fost în cazul de față $p_z = 1$ mm. Practic, poansonul execută o pătrundere continuă în material pe toate cele trei direcții. Și în cazul de față poansonul a avut tot timpul o poziție verticală față de planul inițial al tablei pe tot parcursul procesului de deformare.

La toate cele trei traiectorii mișcarea poansonului se realizează în sens orar.

În tabelul 5.11 sunt prezentate rezultatele obținute în urma măsurării deformațiilor principale și a subțierii relative pentru cele trei tipuri de traiectorii.

Tabelul 5.11

Varianta	$\varepsilon_1 \max$	$\varepsilon_2 \max$	subț
V1	0,78	0,234	1,001
V2	0,8	0,1698	0,953
V3	0,744	0,1067	0,806

Trebuie menționat faptul că spre deosebire de alte procedee de deformare, variația deformațiilor principale și a subțierii relative la deformarea incrementală „într-un singur punct” este direct legată de traiectoria pe care o urmărește poansonul pe parcursul procesării piesei. Pentru a putea pune în evidență acest aspect, piesa de tip calotă a fost secționată cu două plane: unul perpendicular (PP) pe planul xOy care taie piesa în două prin mijlocul acesteia și unul orizontal (PR), (un plan paralel cu planul xOy) care se găsește la o distanță de 9,5 mm față de zona nedeformată a piesei așa cum se poate observa în figura 5.51.

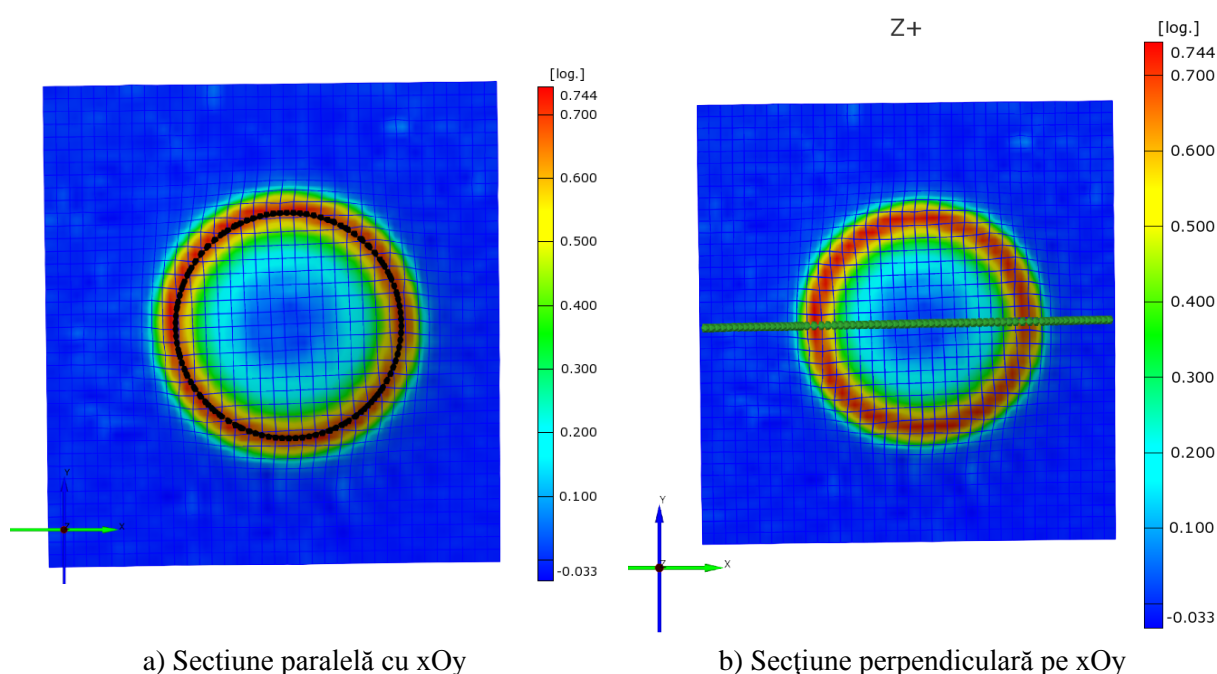


Fig. 5. 51 Tipuri de secțiuni duse prin piesă

Așa cum se poate observa, pentru toate cele trei tipuri de traiectorii deformația principală și subțierea relativă au valori maxime pe o curbă situată într-un plan paralel

cu planul xOy, similar cu deformațiile obținute la piesele testate prin metoda Erichsen. Această curbă corespunde unei traiectorii circulare a poansonului plasată spre jumătatea piesei (la aproximativ 9-10 mm adâncime). Valorile deformațiilor principale și a subțierii relative scad spre vârful calotei, fapt specific deformării incrementale cu poanson.

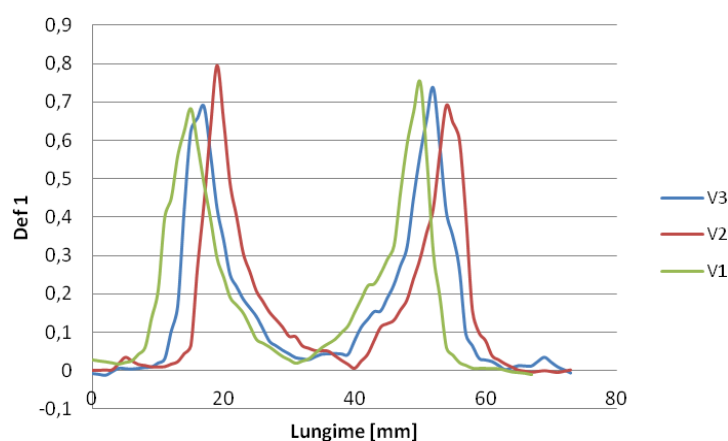


Fig. 5.52 Deformația principală - secțiuni perpendiculare

Dacă se analizează deformația într-un plan perpendicular pe planul xOy (fig. 5.52), se observă că valoarea deformației principale nu este uniformă în secțiunea PP și prezintă două maxime locale.

Chiar și așa, atât la traiectoria cu pas constant (V1) cât și la traiectoria cu unghi constant (V2) se observă faptul că valoarea deformației principale nu are o variație uniformă nici pe aceeași traiectorie circulară. Astfel, valoarea maximă a deformației principale se regăsește întotdeauna în punctul inițial de pătrundere a poansonului pe direcție verticală (primul pas vertical) după care această valoare scade progresiv până la finalul traiectoriei circulare situate în același plan (fig. 5.53, a și 5.53, b). Spre deosebire de primele două variante, în cazul traiectoriei loxodrome (V3) valorile deformației principale sunt relativ constante pe aceeași traiectorie circulară așa cum se poate observa atât din figura 5.53, c.

În ceea ce privește valorile deformațiilor principale valoarea maximă de 0,8 apare în cazul traiectoriei cu unghi constant (V2). În cazul traiectoriei cu pas constant (V1), valoarea maximă a deformației principale este de 0,78. Cea mai mică valoare dintre valorile maxime obținute se regăsește în cazul traiectoriei loxodrome (V3), valoarea deformației principale fiind de 0,744.

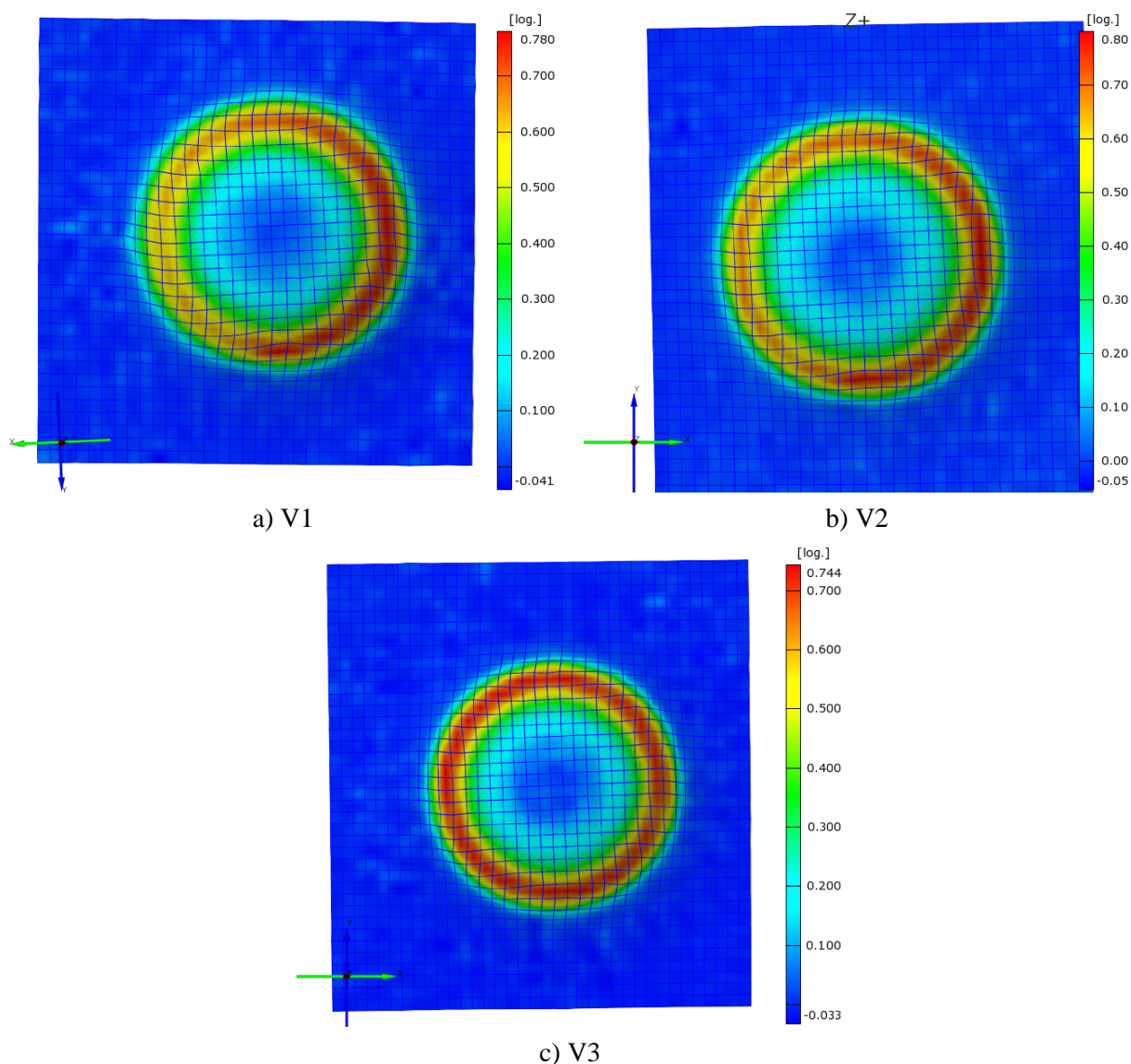


Fig. 5.53 Deformația principală – distribuția prin piesă

Deformația secundară prezintă un maxim tot în punctul inițial de pătrundere a poansonului pe direcție verticală la toate cele trei tipuri de traiectorii (fig. 5.54). Dacă în cazul traiectoriei loxodrome (V3), valoarea deformației secundare este relativ constantă pe restul suprafeței calotei, la celelalte două tipuri de traiectorii (V1 și V2) se observă și din figura 5.55 că spre finalul traiectoriei circulare deformația secundară scade brusc, obținându-se valori negative ale acesteia. Acest lucru se datorează unei cute de material care se ridică în fața poansonului la aceste două tipuri de traiectorii. Practic în zona respectivă se produce o solicitare de compresiune a materialului. În cazul traiectoriei loxodrome (V3), unde procesul se desfășoară continuu, fără pătrunderi repetate ale poansonului pe direcție verticală și circulară această cută de material nu apare. Cutarea materialului în zona din fața poansonului constituie un dezavantaj major al celor două tipuri de traiectorii (V1 și V2) conducând și la scăderea

preciziei pieselor obținute. Valorile maxime obținute pentru deformația secundară sunt de 0,234 pentru traiectoria cu pas constant (V1), 0,1698 pentru traiectoria cu unghi constant (V2) și respectiv 0,1067 pentru traiectoria loxodromă (V3).

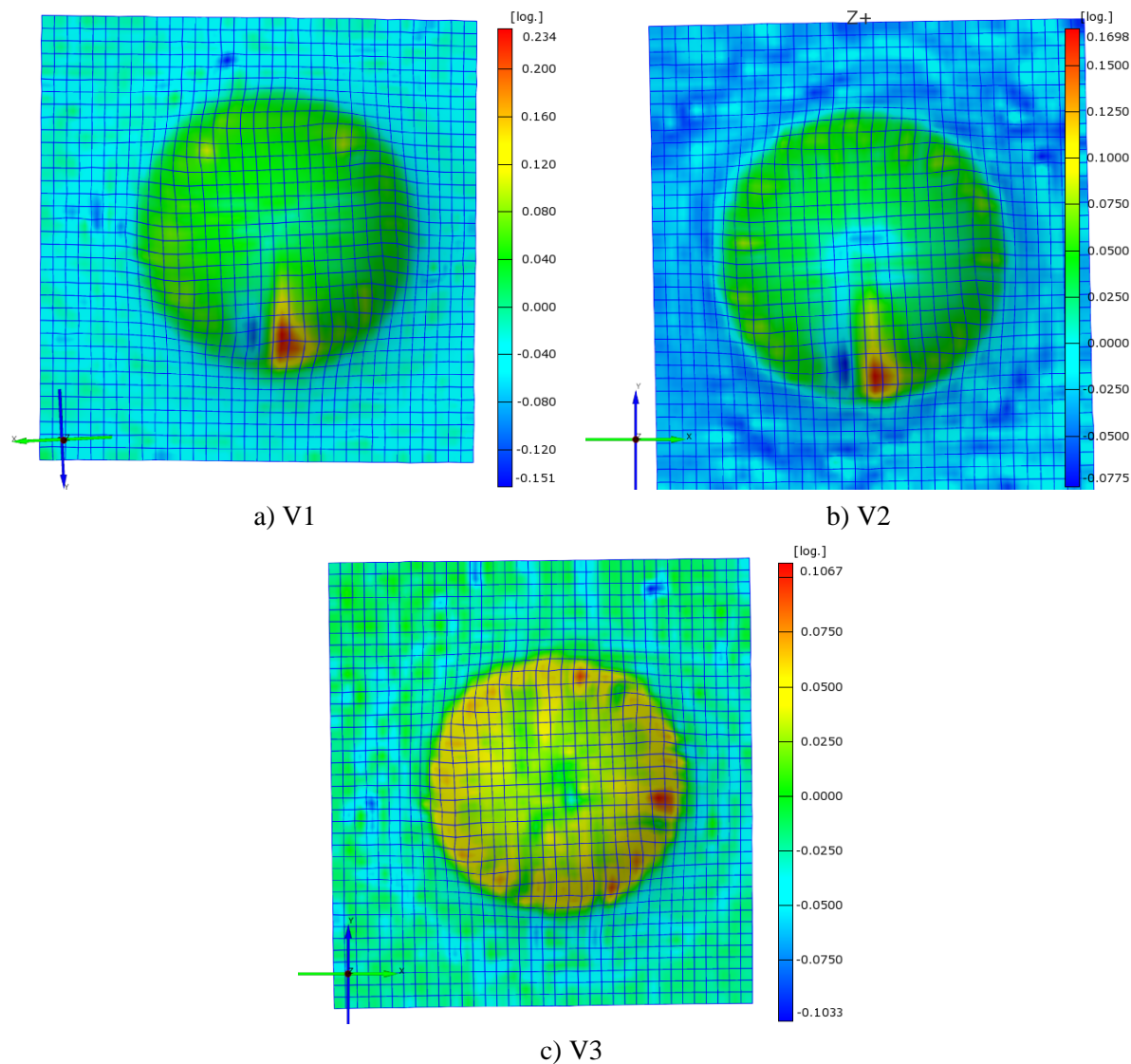


Fig. 5.54 Deformația secundară – distribuția prin piesă

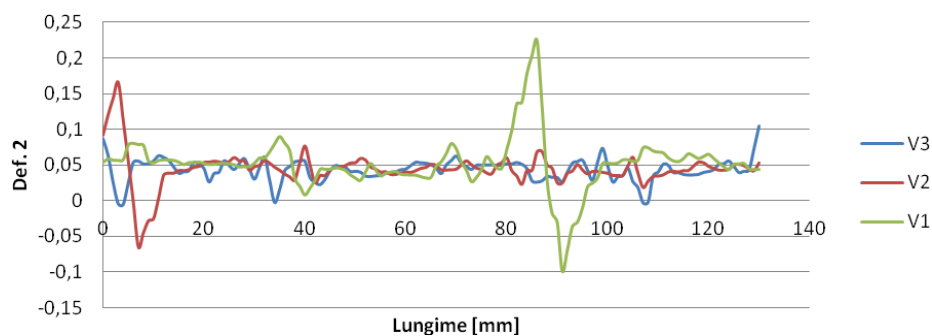


Fig. 5.55 Deformația secundară - secțiuni paralele

Subțierea relativă are o variație similară cu deformația principală pentru toate cele trei tipuri de traiectorii. Valoarea maximă se obține în punctele de pătrundere inițială a poansonului pe direcție verticală, valori mai mari apar plasate similar cu deformațiile principale și acestea scad odată cu micșorarea diametrului traiectoriei circulare (fig. 5.56). Valorile maxime obținute pentru subțierea relativă sunt de 1,001 pentru traiectoria cu pas constant (V1), 0,953 pentru traiectoria cu unghi constant (V2) și respectiv 0,806 pentru traiectoria loxodromă (V3).

În concluzie, din punct de vedere al deformațiilor principale și a subțierii relative se poate spune că varianta de traiectorie loxodromă este cea mai bună deoarece conduce la deformații și subțieri relative constante dar și la valori mai reduse ale acestora.

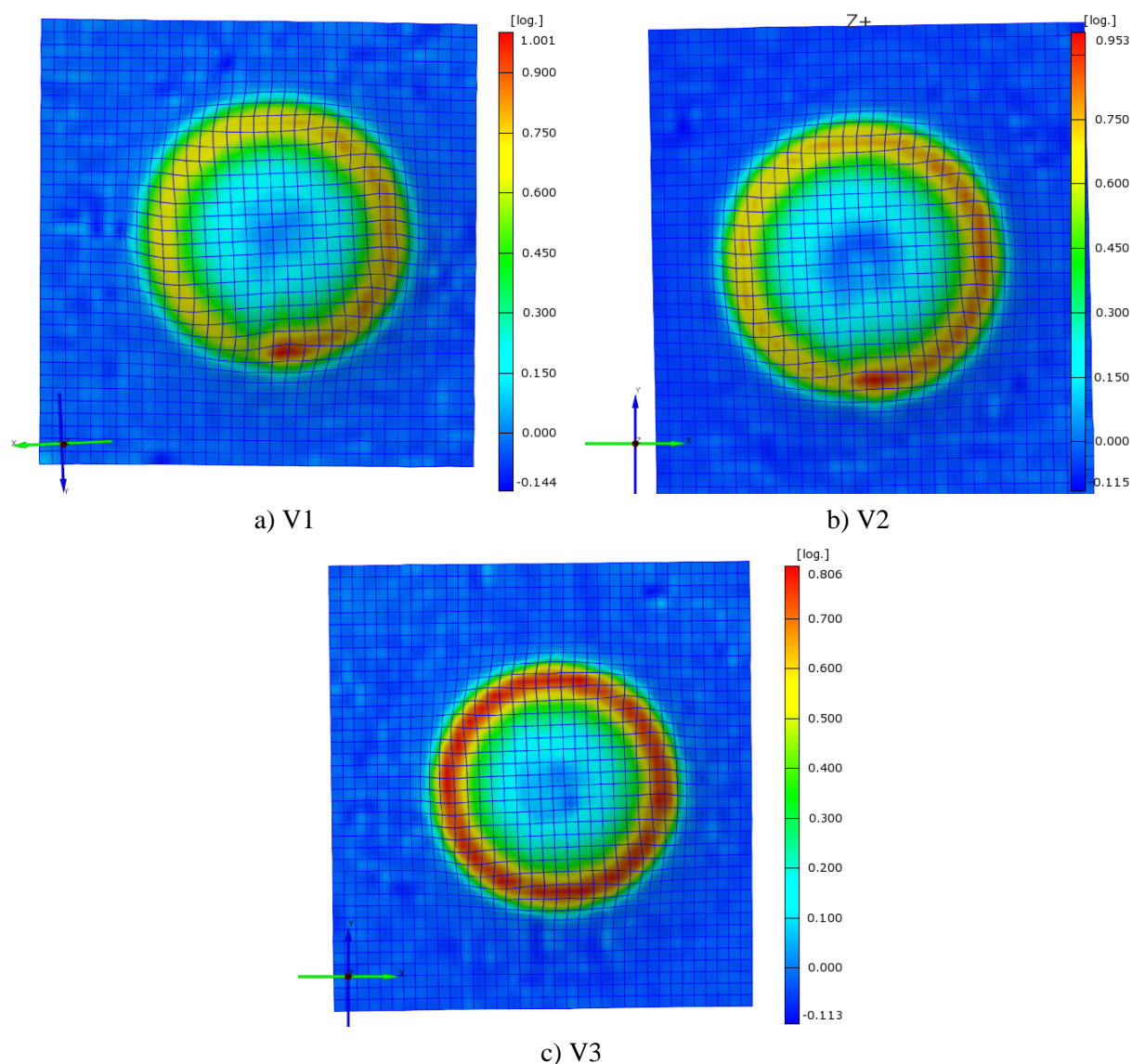


Fig. 5.56 Subțierea relativă – distribuția prin piesă

5.5 Determinarea forțelor la deformarea incrementală „într-un singur punct”

Principalul obiectiv al acestor cercetări a constat în determinarea forțelor rezultate în urma procedurii de deformare incrementală „într-un singur punct”, deoarece acest procedeu este unul complex, iar scula de deformare spre deosebire de alte procedee de deformare plastică, cum ar fi ambutisarea, execută o mișcare spațială, pe toate cele trei axe ale sistemului de coordonate, simultan sau succesiv, în funcție de tipul traiectoriei descrise de poanson.

S-a studiat modul de variație al forțelor în funcție de geometria piesei, influența parametrilor geometrici și a modului de deformare asupra formei de variație și valorii acestora. În acest scop, s-au măsurat forțele pe aceleași piese care au fost utilizate și la determinarea deformațiilor. În cazul determinării forțelor, valorile acestora au fost măsurate „on-line”, în timpul procesului de deformare incrementală „într-un singur punct”, prin intermediul captorilor tensometrici montați în punte pe inelele mesei dinamometrice.

S-a studiat:

- a) influența parametrilor geometrici asupra forțelor pentru:
 - calotă, canal rectiliniu și trunchi de con având ca factori variabili:
 - ◆ pasul pe direcție verticală;
 - ◆ diametrul poansonului;
 - trunchi de piramidă având ca factori variabili:
 - ◆ pasul pe direcție verticală;
 - ◆ unghiul de înclinare al peretelui piesei;
- b) influența modului de deformare asupra forțelor pentru:
 - calotă;
 - trunchi de con;
 - trunchi de piramidă.

5.5.1 Influența parametrilor geometrici asupra forțelor

În continuare, în rezumat, sunt prezentate rezultatele obținute la realizarea unei calote.

Variația forțelor la obținerea unei calote

Încercările au fost realizate pe table de oțel cu două grosimi: 0,5 și 0,9 mm. În tabelul 5.6 sunt prezentați parametrii geometrici luați în considerare și domeniul lor de variație.

Trajectoriile pentru obținerea pieselor de tip calotă sunt aceleași ca la măsurarea deformațiilor și sunt prezentate în subcapitolul 5.4, în figura 5.17, a. În tabelul 5.14 sunt prezentate rezultatele obținute în urma măsurării forțelor pe două direcții ale axelor de coordonate, x și z.

Din analiza tabelului 5.14 se observă că pentru ambele grosimi de material valorile maxime pentru forțe, pe ambele direcții, sunt obținute în cazurile C8 și C7, când s-a utilizat poansonul cu diametrul de 10 mm și un pas vertical de 1 mm, iar valorile minime pentru forțe pe ambele direcții sunt obținute în cazurile C2 și C1 pentru un poanson având diametrul de 6 mm și un pas vertical de 0,25 mm. Acest lucru evidențiază faptul că scăderea valorilor diametrului poansonului și scăderea pasului pe direcție verticală duc la scăderea valorilor forțelor pe ambele direcții. Modul de variație este prezentat în figurile 5.74 - 5.77.

Tabelul 5.14

Caz	d_p [mm]	p_z [mm]	g [mm]	F_{xmax} [N]	F_{zmax} [N]
C1	6	0,25	0,5	98,588	256,76
C2	6	0,25	0,9	252,84	1032,92
C3	6	1	0,5	224,28	425,18
C4	6	1	0,9	529,48	1446,9
C5	10	0,25	0,5	141,344	364
C6	10	0,25	0,9	375,06	1187,76
C7	10	1	0,5	306,18	841,26
C8	10	1	0,9	616,84	1726,2

În figura 5.78 sunt prezentate graficele de variație a forțelor pe cele două direcții. x și z pentru cazul C8. Din figura 5.78, b se poate observa că forțele pe direcția x, din planul tablei, au aceeași variație pentru fiecare mișcare circulară. La fiecare penetrare a poansonului avem un maxim local, iar la fiecare sfârșit de mișcare circulară în planul tablei avem o scădere bruscă. În figura 5.78, a este prezentat graficul de variație a forțelor pentru direcția verticală, adică z. La fel ca în cazul forțelor pe direcția x, din planul tablei, forța pe direcție verticală are o variație sinusoidală pentru fiecare deplasare în planul tablei, maxime locale în momentul

deplasării pe direcția z a poansonului și minime în momentul de final al fiecărei mișcări circulare plane.

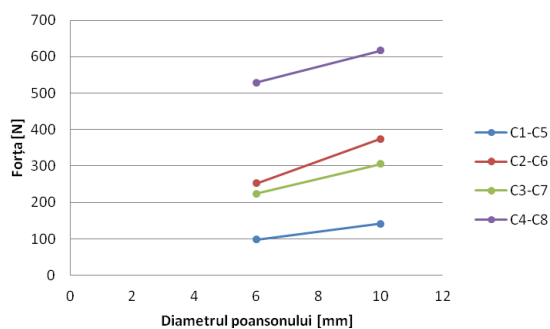


Fig. 5.74 Influența diametrului poansonului asupra forței F_x

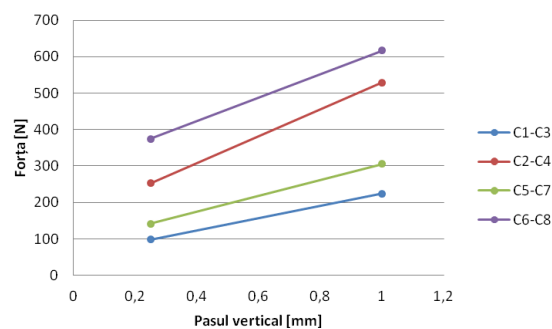


Fig. 5.75 Influența pasului pe direcție verticală asupra forței F_x

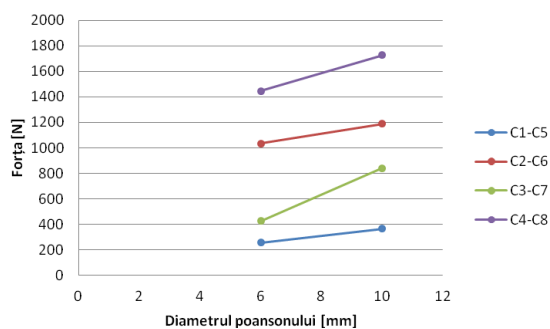


Fig. 5.76 Influența diametrului poansonului asupra forței F_z

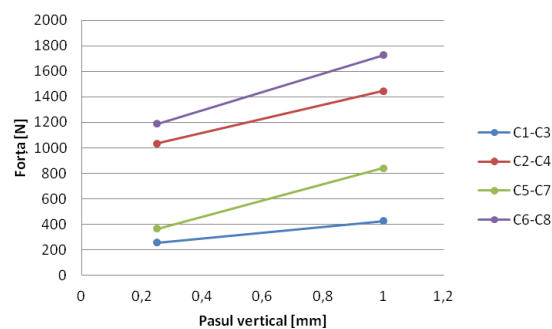
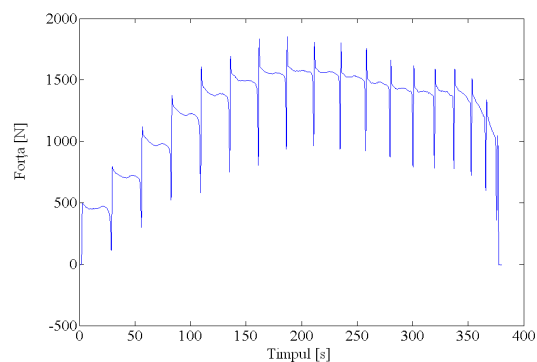
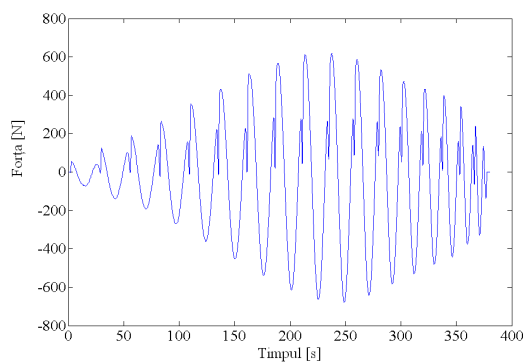


Fig. 5.77 Influența pasului pe direcție verticală asupra forței F_z



a) F_z



b) F_x

Fig. 5.78 Forțele pentru cazul C8

5.5.2 Influența modului de deformare asupra forțelor

Obiectivul principal al acestor cercetări a fost acela de a determina pe cale experimentală modul de variație a forțelor atunci când se definesc diverse traiectorii de

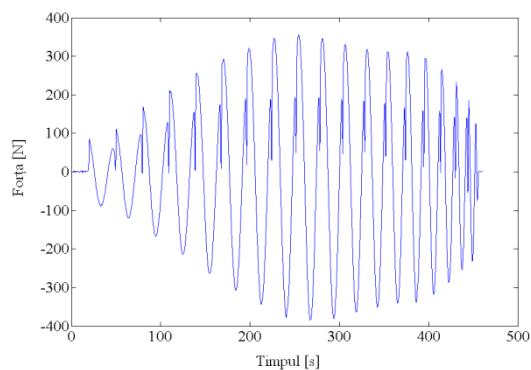
deplasare a poansonului pentru obținerea de piese cu forme diferite. Formele obținute și traiectoriile utilizate sunt identice cu cele folosite pentru analiza deformațiilor. Încercările au fost realizate pe un oțel de ambutisare DC04 având grosimea de 0,7 mm și utilizând ca sculă de deformare un poanson cu diametrul de 8 mm.

Variația forțelor la obținerea unei calote

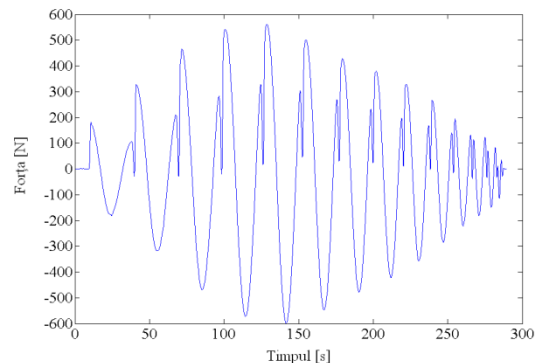
În tabelul 5.18 sunt prezentate rezultatele obținute în urma măsurării forțelor pe cele două direcții ale sistemului de coordonate, O_x și O_z .

Tabelul 5.18

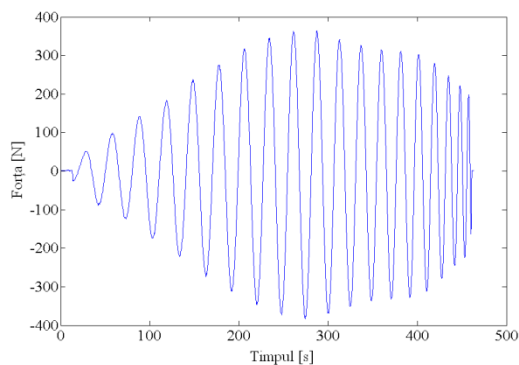
Varianta	$F_{x\max}$ [N]	$F_{z\max}$ [N]
V1	355,6	871
V2	562,5	1265
V3	364,2	768



a) V1



b) V2



c) V3

Fig. 5.97 Forțele după direcția x

În ceea ce privește variația forțelor, așa cum s-a arătat, componenta forței pe direcție verticală are o valoare mult mai mare decât componentele ei din planul tablei în toate cele trei variante de traiectorii. În lucrarea de față s-au prezentat variațiile componentei verticale și a unei componente orizontale (componenta pe direcția x), cealaltă componentă orizontală (componenta pe direcția y) având o variație similară. În ceea ce privește valorile forței pe direcția orizontală (F_x) se poate observa că valoarea maximă de 562,5 N apare în cazul traiectoriei cu unghi constant (V2). În cazul traiectoriei loxodrome (V3), valoarea maximă a forței pe direcția x este de 364,2 N. Cea mai mică valoare dintre valorile maxime obținute se regăsește în cazul traiectoriei cu pas constant (V1), valoarea ei fiind de 355,6 N. Valoarea obținută în cazul traiectoriei loxodrome este însă foarte apropiată de aceasta din urmă.

Atât în cazul traiectoriei cu pas constant (V1) cât și în cazul traiectoriei cu unghi constant (V2), variația componentei forței pe direcție orizontală este o variație armonică cu amplitudine variabilă. Se poate observa faptul că amplitudinea crește aproximativ linear până în momentul în care se obține maximum. Valoarea maximă a forței, la ambele tipuri de traiectorii se obține la momentul în care poansonul parcurge traiectoria circulară pe care se regăsesc valorile maxime ale deformației principale și subțierii relative, traiectorie care se regăsește la aproximativ jumătate din înălțimea totală a piesei. În cazul variantei cu pas constant, după atingerea maximumului, amplitudinea scade după o curbă care mai prezintă un punct de maxim local pe când în cazul traiectoriei cu unghi constant, amplitudinea scade linear până la realizarea întregii suprafețe. În ceea ce privește variația componentei F_x la primele două tipuri de traiectorii, se poate spune că la fiecare pătrundere a poansonului apare un maxim local, iar la fiecare sfârșit de traiectorie circulară se produce o scădere bruscă a acesteia.

În ceea ce privește traiectoria loxodromă, variația componentei F_x prezintă de asemenea o variație armonică continuă cu amplitudine variabilă dar fără scăderi și creșteri bruște ale valorii. Și în acest caz se observă creșterea amplitudinii până la atingerea valorii maxime a componentei orizontale (tot la momentul realizării traiectoriei cu deformații și subțieri relative maxime).

În concluzie, chiar dacă valoarea componentei forței pe direcție orizontală, F_x este cu puțin mai mică în cazul traiectoriei cu pas constant (V1) decât în cazul traiectoriei loxodrome (V3) din variația forței se poate observa că în cazul traiectoriei loxodrome aceasta este mult mai lină, fără șocuri fiind mai puțin solicitantă pentru cutia de avans a mașinii de frezat. În figura 5.97 sunt prezentate graficele obținute pentru componenta orizontală a forței (F_x) pentru toate cele trei tipuri de traiectorii.

În ceea ce privește valorile forței pe direcție verticală (F_z) se poate observa că valoarea maximă de 1265 N apare în cazul traiectoriei cu unghi constant (V2). În cazul traiectoriei cu pas constant (V1), valoarea maximă a forței pe direcția z este de 871 N. Cea mai mică valoare dintre valorile maxime obținute se regăsește în cazul traiectoriei loxodrome (V3), valoarea ei fiind de 768 N. Se poate observa că traiectoria loxodromă conduce la obținerea unor forțe a căror valoare maximă este sensibil redusă față de celelalte două tipuri de traiectorii. În cazul traiectoriei cu pas constant (V1), variația componentei verticale a forței are un maxim local după fiecare pătrundere pe verticală a poansonului, urmată de o scădere bruscă a acesteia și apoi o scădere lină până la finalizarea unei traiectorii circulare când din nou are un minim local. Această variație se repetă până la atingerea valorii maxime a forței pe direcție verticală. Acest maxim se obține la aproximativ o treime din înălțimea totală a piesei. Se poate observa faptul că diferențele dintre maximele și minimele locale ale fiecărei traiectorii circulare rămân aproximativ constante pe parcursul întregii traiectorii.

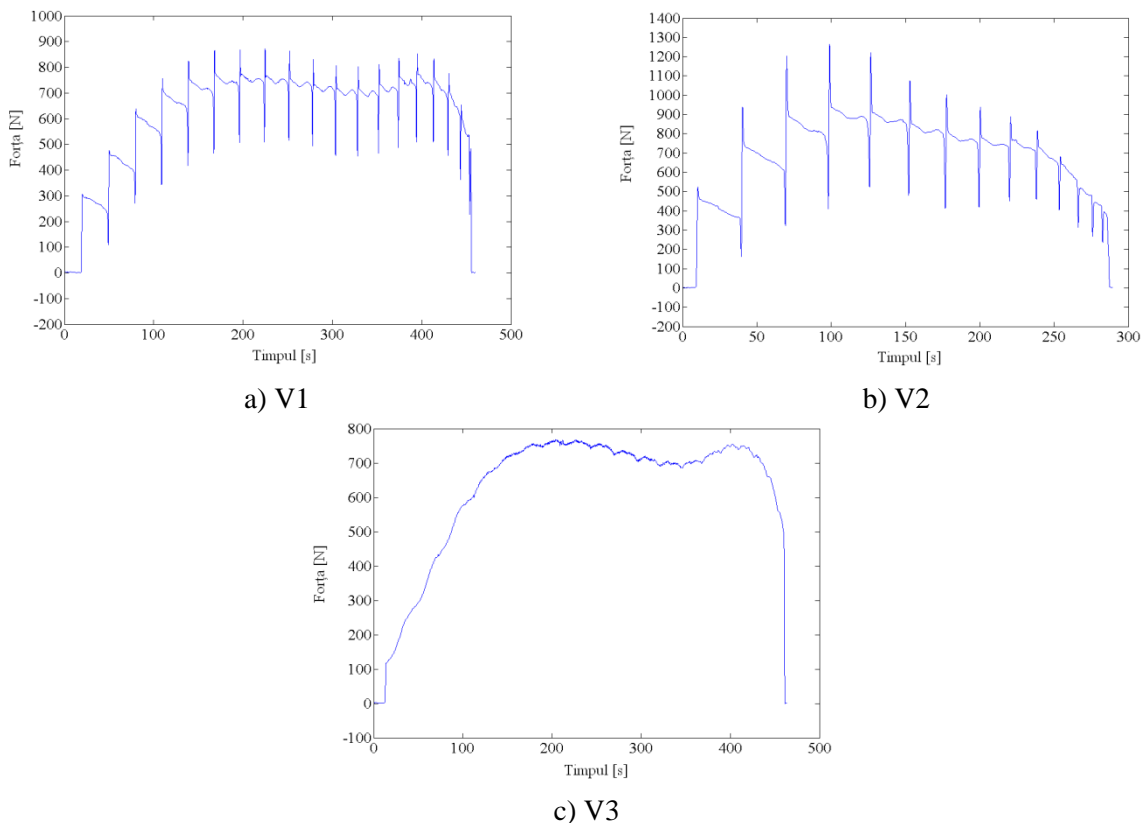


Fig. 5.98 Forțele după direcția z

În cazul traiectoriei cu unghi constant (V2), variația componentei verticale a forței este asemănătoare cu cea din cazul traiectoriei V1 doar că diferențele dintre maximele și minimele locale ale fiecărei traiectorii circulare scad, în acest caz.

semnificativ după atingerea valorii maxime a componentei F_z . De asemenea, alura descrescătoare a curbei prezintă un palier în cazul traiectoriei V1 fiind asemănătoare cu cea din cazul componentei F_x .

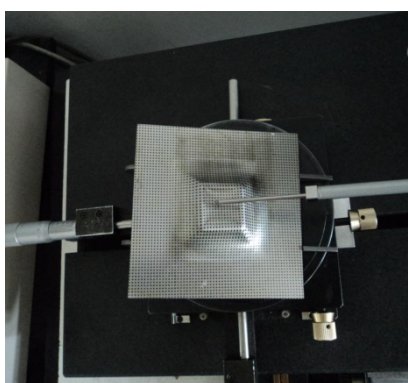
În cazul traiectoriei loxodrome (V3), variația componentei verticale a forței este lină, fără maxime sau minime locale. Componenta verticală a forței crește până la atingerea valorii maxime (tot la aproximativ jumătate din înălțimea piesei) după care se menține pe un palier relativ constant până spre finalul procesării piesei. Se observă faptul că, în toate cele trei cazuri, valoarea componentei verticale a forței (F_z) scade spre finalul procesării piesei datorită formei pe care aceasta o are (calotă) și care conduce la o suprafață redusă de deformat spre finalul traiectoriei. În figura 5.98 sunt prezentate graficele obținute pentru componenta verticală a forței (F_z) pentru toate cele trei tipuri de traiectorii. La fel ca și în cazul componentelor orizontale se observă că varianta optimă pentru prelucrare este cea cu traiectorie loxodromă care are valori maxime mai mici și o variație lină.

5.6 Determinarea preciziei geometrice

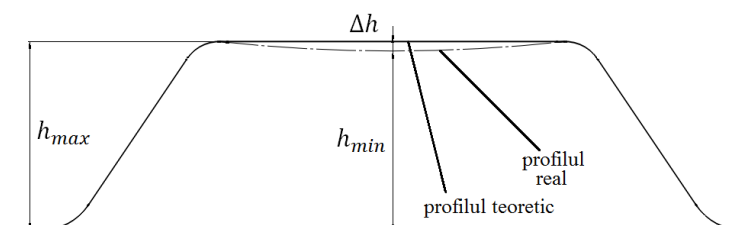
Principalul obiectiv al acestor cercetări a constat în determinarea preciziei de formă a pieselor deformate incremental, pentru acest scop alegându-se o piesă de tip trunchi de piramidă. Piesele analizate sunt identice cu cele folosite pentru determinarea deformațiilor și forțelor.

S-a studiat influența asupra preciziei piesei a următorilor factori:

- ◆ pasul pe direcție verticală;
- ◆ unghiul de înclinare al peretelui piesei.



a) Piesă



b) Profilele măsurate

Fig. 5.103 Măsurarea preciziei

Cu ajutorul mașinii de măsurat în coordonate Contourecord 1600D s-au determinat variațiile de nivel ale fundului piesei față de profilul teoretic (fig. 5.103). Aceste variații au fost analizate atât de-a lungul laturilor fundului piesei (direcția A-B și direcția A-C) cât și după diagonala fundului piesei (direcția A-D) (fig. 5.104). Punctele A, B, C și D reprezintă punctele în care au fost înregistrate valorile maxime și minime ale înălțimii piesei.

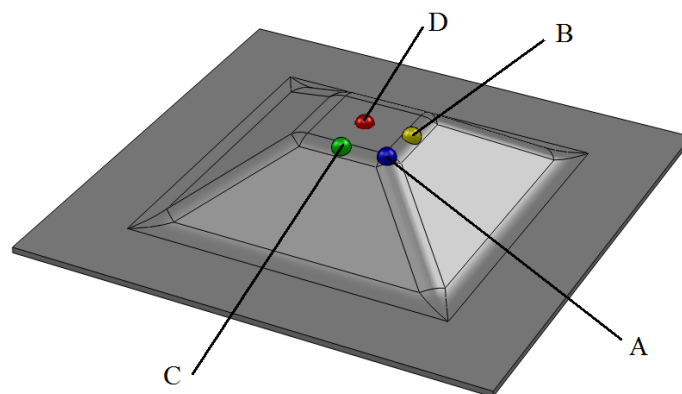


Fig. 5.104 Direcțiile de măsurare ale piesei

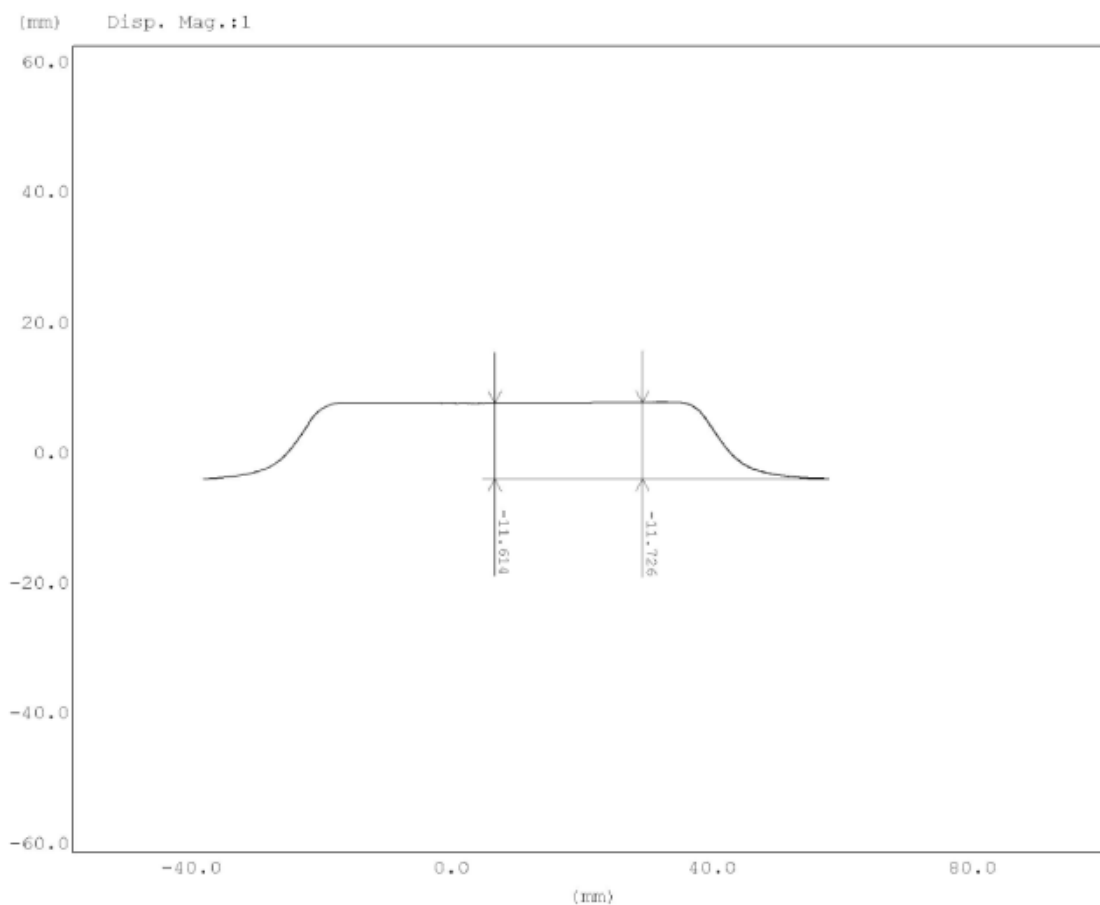


Fig. 5.105 Profilul piesei pentru cazul C3

În toate cazurile analizate diferența de nivel maximă apare la mijlocul piesei (respectiv în punctul D). Având în vedere că valorile înregistrate după direcțiile A-B și A-C nu diferă semnificativ și au valori mai reduse decât cele măsurate după direcția A-D în analiză au fost considerate doar valorile după această direcție. În tabelul 5.21 sunt prezentate rezultatele experimentelor.

Tabelul 5.21

Caz	p_z [mm]	u_g [°]	Δh_{A-D} [mm]
C1	2	65	0,425
C2	1	65	0,22
C3	0,25	65	0,112
C4	2	55	0,731
C5	1	55	0,523
C6	0,25	55	0,178
C7	2	45	0,864
C8	1	45	0,651
C9	0,25	45	0,231

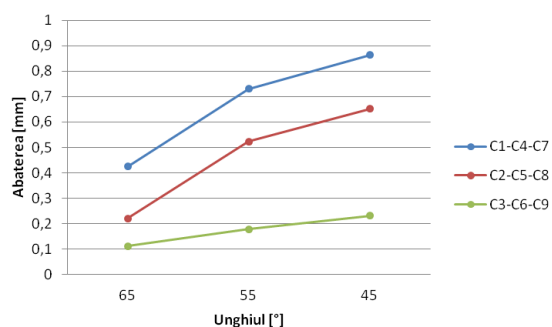


Fig. 5.106 Influența unghiului peretelui piesei asupra preciziei

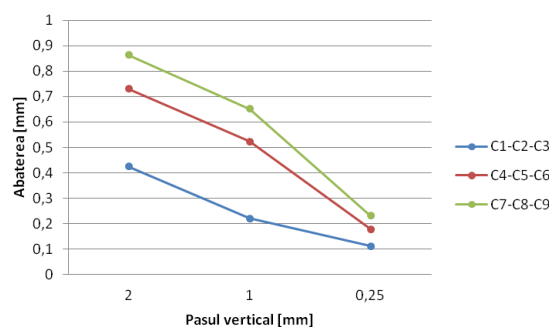


Fig. 5.107 Influența pasului pe direcție verticală asupra preciziei

După cum se poate observa din tabel creșterea unghiului de înclinare al piesei duce la o scădere a valorii diferenței de nivel (Δh) iar creșterea pasului vertical duce la o creștere a acestei diferenței (fig. 5.106 și 5.107).

În concluzie pentru a obține o diferență de nivel pe fundul piesei cât mai mică se recomandă a se utiliza unghiuri mari de înclinare ale peretelui piesei și pași verticali cât mai mici în anumite limite, deoarece prin creșterea unghiului cresc și deformațiile și există riscul apariției fisurilor sau chiar al rupturilor.

5.7 Concluzii

Principalul obiectiv al acestor cercetări a constat în determinarea distribuției deformațiilor în piesele deformate incremental și determinarea forțelor din proces pe două direcții, una verticală și una din planul tablei. Pentru realizarea pieselor s-au utilizat două tipuri de materiale, un oțel de ambutisare adâncă DC04 și un aluminiu AA6016, materiale având o deformabilitate bună.

Prin procedeul de deformare incrementală s-au realizat piese utilizând diferite traiectorii pentru poanson, cum ar fi calotă, trunchi de con, trunchi de piramidă sau canal rectiliniu. În cadrul testelor s-a determinat influența parametrilor geometrici și a modului de deformare asupra distribuției deformațiilor și valorilor acestora, dar și asupra forțelor din proces.

Testele de determinare a influenței parametrilor geometrici asupra deformațiilor și subțierii relative, dar și a forțelor pe două direcții, una verticală și una din planul tablei s-au efectuat pe trei tipuri de traiectorii: traiectorie care descrie un canal rectiliniu, traiectorie care descrie o calotă și traiectorie care descrie un trunchi de piramidă. Pentru evaluarea influenței parametrilor geometrici în cazul traiectoriei care descrie un canal rectiliniu și a traiectoriei care descrie o calotă s-au luat în considerare ca și parametrii pasul pe direcție verticală și diametrul poansonului, iar în cazul traiectoriei care descrie un trunchi de piramidă pasul pe direcție verticală și unghiul de înclinare al peretelui piesei.

Testele de determinare a influenței modului de deformare asupra deformațiilor și subțierii relative, dar și a forțelor pe două direcții, una verticală și una din planul tablei s-au efectuat pe trei tipuri de traiectorii: traiectorie care descrie o calotă, traiectorie care descrie un trunchi de con și traiectorie care descrie un trunchi de piramidă.

Testele pentru determinarea precizie pieselor obținute prin procedeul de deformare incrementală s-au efectuat pe piesele de tip trunchi de piramidă, aceleași care s-au utilizat și în cazul determinării deformațiilor și a forțelor. Parametrii luați în considerare au fost aceeași, adică pasul vertical al poansonului și unghiul de înclinare al peretelui piesei.

6 CONCLUZII. PRINCIPALELE CONTRIBUȚII ALE LUCRĂRII

6.1 Concluzii finale

Lucrarea de față a urmărit studierea distribuției deformațiilor pe piesele deformate incremental, determinarea forțelor ce intervin în proces și a preciziei geometrice a pieselor obținute prin deformare incrementală.

În vederea desfășurării cercetărilor teoretice și experimentale au fost alese două tipuri de materiale, ambele având o bună deformabilitate, oțelul DC04 și aluminiul AA6016.

Inițierea cercetărilor teoretice și practice, alegerea direcțiilor de cercetare și a metodelor utilizate au fost stabilite în urma parcurgerii unui material documentar de specialitate, prezentat în stadiul actual în domeniu.

Etapele parcurse în desfășurarea cercetărilor teoretice și experimentale au avut ca suport logistic utilizarea programului de analiză numerică cu element finit în domeniul plastic – ANSYS LS-DYNA, Matlab pentru achiziția și prelucrarea automată a datelor experimentale, respectiv Mathcad.

O parte a documentării, unele cercetări teoretice și determinarea caracteristicilor mecanice ale tablelor au fost realizate pe parcursul stagiului de perfecționare desfășurat la Universitat Stuttgart – Institut für Umformtechnik.

Concluziile finale ale cercetărilor se pot sintetiza astfel:

- procedeul de deformare incrementală a tablelor metalice „într-un singur punct” este un procedeu complex, flexibil care se pretează pentru producia de serie mică sau unicat din industria constructoare de mașini, aeronautică, constructoare de vapoare, medicină sau arhitectură;
- acest procedeu este limitat de timpii mari de realizare a pieselor;
- pentru modelarea cât mai corectă a procedurii de deformare incrementală „într-un singur punct” se impune metoda elementelor finite în domeniul neliniar;
- deformațiile principale, deformațiile echivalente și subțierea relativă au o distribuție neuniformă în piesă;

- în cazul pieselor de tip calotă scăderea diametrului poansonului duce la scăderea deformațiilor secundare, dar cresc deformațiile principale, deformațiile echivalente și subțierea relativă, iar creșterea pasului pe direcție verticală are ca efect scăderea valorilor deformațiilor principale și a subțierii relative, dar cresc deformațiile secundare;
- în cazul pieselor de tip canal rectiliniu prin scăderea valorii pasului vertical obținem deformații secundare și subțiere relativă mai mari, iar prin creșterea diametrului poansonului cresc valorile pentru toate caracteristicile studiate, deformații principale, deformații echivalente și subțiere relativă;
- pentru piesele de tip trunchi de piramidă creșterea pasului vertical și a valorii unghiului peretelui piesei duc la creșterea deformației principale, secundare, deformației echivalente von Mises și a subțierii relative;
- în cazul determinării influenței parametrilor geometrici asupra valorii forțelor, pe direcție verticală și una din direcțiile din planul tablei, creșterea valorii acestora are ca efect creșterea valorii forțelor pentru toate tipurile de piese care au fost utilizate în cadrul cercetărilor;
- pentru obținerea unei distribuții a deformațiilor mai omogenă în piesă și a unor valori ale deformațiilor secundare și subțierii relative mici pentru piesele de tip calotă, trunchi de con și trunchi de piramidă se recomandă a se utiliza o traiectorie de tip spirală, traiectorie prin care se obțin și valori mai mici ale forțelor, dar se evită în același timp variațiile bruște din momentul pătrunderii poansonului în material;
- creșterea unghiului de înclinare al peretelui piesei duce la o scădere a valorii diferenței de nivel dintre profilul teoretic și profilul real, iar creșterea pasului vertical duce la o creștere a acestei diferențe;
- deși nu se pot compara valorile obținute prin calcul analitic pentru deformații și forțe din cauza utilizării în calcul a ipotezelor simplificatoare se poate observa că modul în care influențează creșterea valorii unghiului peretelui piesei și creșterea pasului vertical este aceeași, adică duc la creșterea ambelor componente ale forțelor, dar și a deformațiilor;
- evaluând rezultatele analizelor prin MEF efectuate pentru piesele de tip canal rectiliniu s-a constatat că prin creșterea valorii pasului vertical deformațiile secundare și subțierea relativă sunt mai mici, dar avem

deformații principale mai mari, iar prin creșterea valorii diametrului poansonului cresc valorile tuturor caracteristicilor studiate (deformații principale, secundare și subțiere relativă). Diferențele între valorile înregistrate prin MEF și cercetările experimentale sunt de 2-19 % în cazul deformației principale, 1-17 % pentru deformația secundară și 0,5-15 % pentru subțierea relativă;

- în cazul determinării forțelor din proces prin MEF se poate observa că alura celor două curbe, a componentei forței pe direcție verticală, respectiv a componentei forței pe direcție orizontală, este aceeași cu aceea determinată prin încercările experimentale. Diferențele între valorile înregistrate prin MEF și cercetările experimentale sunt de 1,5-20 %;
- pentru toate cele trei piese: trunchi de con, trunchi de piramidă și canal rectiliniu analizele cu element finit au evidențiat faptul că revenirea maximă este localizată în zona de avans vertical al poansonului.

6.2 Contribuții originale și posibile direcții ulterioare de cercetare

Prin lucrarea de față s-au adus o serie de contribuții originale la studiul deformării plastice incrementale a tablelor metalice, după cum urmează:

Din punct de vedere teoretic:

- s-a sintetizat sub forma unui studiu bibliografic majoritatea rezultatelor științifice publicate pe plan mondial care abordează această temă;
- s-a elaborat o clasificare originală a procedeelor de deformare incrementală a tablelor metalice;
- în ipoteza unei stări plane de deformare în material s-au determinat modelele matematice pentru determinarea deformațiilor și a forțelor în momentul indexării pe direcția verticală (z) a poansonului, pentru cazul în care se utilizează o placă de reținere pătrată;
- s-a realizat câte un model parametrizat, prin metoda elementului finit, cu ajutorul programelor ANSYS/LS-DYNA pentru semifabricat și elementele active, pentru cazurile în care avem placă activă de reținere circulară respectiv pătrată;

- s-au efectuat analize dinamice explicite pentru traiectoria care descrie un canal rectiliniu și s-a studiat starea de deformații;
- s-au efectuat analize dinamice explicite pentru traiectoria care descrie un canal rectiliniu, traiectoria care descrie un trunchi de con și aceea care descrie un trunchi de piramidă în vederea studierii forțelor și energiei consumate în proces dar și a evoluției unor parametri în timp;
- s-au efectuat analize dinamice implicite pe baza celor dinamice explicite în vederea determinării revenirii elastice pentru cele trei tipuri de traiectorii.

Din punct de vedere experimental:

- s-au efectuat încercări la tracțiune pentru cele trei grosimi de epruvete din oțel respectiv cele două de aluminiu pentru determinarea caracteristicilor mecanice;
- s-au determinat curbele limită la deformare pentru materialele utilizate în cadrul cercetărilor;
- s-a realizat un instrument virtual de achiziție a datelor în programul Matlab;
- s-au efectuat cercetări experimentale pentru determinarea distribuției deformațiilor principale și a subțierii relative utilizând diferite traiectorii și moduri de deformare și a fost analizat modul în care parametrii geometrici influențează valorile acestora;
- s-au efectuat cercetări experimentale pentru determinarea componentei forței pe direcție verticală și a unei componente a forței pe direcție orizontală utilizând diferite traiectorii și moduri de deformare și a fost analizat modul în care parametrii geometrici influențează valorile acestora;
- s-au efectuat cercetări experimentale privind precizia pieselor obținute prin acest procedeu și s-a determinat influența parametrilor geometrici asupra acestora.

Direcții de cercetare ulterioare:

- determinarea experimentală a distribuției deformațiilor pe piese având o geometrie complexă;
- determinarea pe cale experimentală a evoluției deformațiilor principale prin metode optice de măsurare, de data aceasta măsurătoarea făcându-se „on-line”;
- realizarea fizică a unei mașini de deformat incremental;

- determinarea distribuției deformațiilor pe piesă și pe alte tipuri de materiale: materiale greu deformabile, care se deformează mai ușor la semicald, materiale sudate, PVC, materiale sandwich, materiale laminate etc;
- stabilirea metodelor de obținere a "Diagramelor Limită de Deformare" pentru diferite combinații de materiale și grosimi.

BIBLIOGRAFIE

3. Alberti, N., et al. *Analysis of metal spinning processes by the ADINA code*. Computers & Structures 32 (3-4) , 1989, pp.517-525.
9. Ambrogio, G., et al. *Some relevant correlation between Process parameters and Process Performance in Incremental Forming of metal sheet*. Proc. of the 6th Conference ESAFORM, 28-30 April. Salerno Italy, 2003, pp. 175-178.
12. Ambrogio, G., et al. *An analytical model for improving precision in single point incremental forming*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 191, Issues 1-3, 1 August 2007, pp. 92-95, .
15. Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., *Optimization of tool path in two points incremental forming*, Journal of Materials Processing Technology 177, 2006, pp. 409-412.
16. Attanasio, A., et al. *Asymetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization*, Journal of Materials Processing Technology 197, 2008, pp. 59-67.
17. Aoyama, S., Amino, H., Lu, Y., Matsubara, S. *Apparatus for dieless forming plate materials*, Europäisches Patent EP0970764, 2000.
18. Avitzur, B., Yang, C.T. *Analysis of power spinning of cones*. Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME (series B) 82, 1960, pp. 231-245.
21. Bambach, M., Hirt, G., Junk, S. *Modelling and Experimental Evaluation of the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process*. 7th International conference on Computational Plasticity, 2003, Barcelona, pp.1.
24. Banabic D., Dorr R.I., *Deformabilitatea tablelor metalice subțiri*, OIDICM, București, 1990.
27. **Blaga, A.**, et al. *Mathematical model for determining the forces in single point incremental forming*, International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2011, 2011, pp. 163-166.
28. **Blaga, A.**, et al. *Influence of geometric parameters on the main deformations, relative thinning and forces in single point incremental forming for dome parts*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Vol. LVII(LXI), Fascicle 4, Machine Constructions, 2011, pp. 9-18
29. **Blaga, A.**, et al. *Experimental studies and FEM analysis regarding the forming forces in single point incremental forming process for various parts*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Vol. LVII(LXI), Fascicle 4, Machine Constructions, 2011, pp. 19-34
30. **Blaga, A.**, et al. *Influence of tool path on main strains, thickness reduction and forces in single point incremental forming process*, ICMaS, Vol. 6, Issue 4, 2011, pp. 191-196.
31. **Blaga, A.**, et al. *Experimental Studies and FEM Analysis Regarding the Influence of Geometric Parameters on Strain, Thickness Reduction and Forces in Incremental Forming Process*, Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița, Vol. XVIII, Issue 3, 2011, pp. 43-54.
32. **Blaga, A.**, et al. *Influence of geometric parameters on forces in single point incremental forming process for various parts*, The Annals of „Dunărea de Jos” University of Galați, Vol. XIV Mechanical Engineering, 2011, pp. 33-38.

33. **Blaga, A.**, et al. *Experimental researches regarding the influence of geometric parameters on the principal strains and thickness reduction in single point incremental forming*, Scientific Bulletin, Series D, Mechanical Engineering, Ed. University Politehnica of Bucharest, (în curs de publicare).
35. Bologa, O., **Blaga, A.**, et al. *Modular device for determining forming limit curves – a cost effective approach*, International Conference on Management and Control of Production and Logistic, 2010.
48. Douflou, J. R., et al. *Improved SPIF performance through dynamic local heating*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 2008, pp. 543-549.
49. Dröge, K. H. *Forces and material flow in spinning*. Technische Universität Dortmund, 1954.
50. Durante, M., Formisano, A., Langella, A. *The influence of tool rotation on an incremental forming process*, Journal of Materials Processing Technology, 209, 2009, pp. 4621-4262.
53. Fiorentino, A., et al. *Analysis of forces, accuracy and formability in positive die sheet incremental forming*, Int J Mater Form Vol. 2, suppl 1, 2009, pp. 805-808.
54. Franzen, V., et al. *E. Single point incremental forming of PVC*, Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, pp. 462-469.
55. Fratini, L., et al. *The Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming*. Annals of CIRP vol 53/1/2004, pp. 207.
63. Harada, Y., et al. *Improvement of mechanical properties of spring steel using warm shot-penning. Advanced Technology of Plasticity. Incremental Forming*, Proceedings of the 6th International Conference Of Technology of Plasticity-ICTP, Vol. II, 1999, pp. 1489-1494.
66. Hayama, M., Murota, T. *On the study of metal spinning. Bulletin of the Faculty of Engineering*, Yokohama National University 12, 1963, pp. 53-88.
67. Hayama, M., Murota, T., Kudo, H. *Experimental study of shear spinning*. Bulletin of JSME 8 (31), 1965, pp. 453-460.
68. Hayama, M., Murota, T. *Theoretical study of shear spinning*. Bulletin of JSME 8 (31), 1965, pp. 460-467.
71. He, S., et al. *Finite element Modeling of Aluminum Sheets*, J. Of Advanced Materials Research, vol. 6-8, 2005, pp. 525-532.
72. He, S., et al. Proc. of 8th ESAFORM, April 27-29, 2005, Cluj-Napoca, România, pp. 258-265.
74. Henrard, C., et al. J. Of Advanced Materials Research, vols. 6-8, 2005, pp.533-542.
76. Hirt, G., et al. *Process Limits and Material Behaviour in Incremental Sheet Forming with CNC-Tools*, Materials Science Forum, vols. 426-432, 2003, pp. 3825-3830.
78. Hirt, G., et al. *Forming Strategies and Process Modelling for CNC incremental Sheet Forming*. Annals of CIRP vol 53/1/2004, pp. 203-206.
81. Hussain, G., Gao, L., *A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 2007, pp. 419-435.
84. Iseki, H. *Flexible and Incremental Bulging of Sheet Metal Using High-Speed Water Jet*, JSME International Journal, Series C, Vol. 4, 2001, pp. 486-493.
85. Iseki, H. *An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of the sheetmetal using a spherical roller*, Journal of Materials Processing Technology 111, 2001, pp. 150-154.
87. Jackson, K., Allwood, J. *The mechanics of incremental sheet forming*, Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, pp. 1158-1174.

89. Jeswiet, J., Hagan, E. *Rapid Proto-typing of a Headlight with Sheet Metal*, Proceedings of Shemet, April, 2001, pp. 165-170.
94. Ji, Y. H., Park, J. J. *Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperatures*, Journal of Materials Processing Technology 201, 2008, pp. 354-358.
96. Junkar, M., Heiniger K. C., Jurisevic, B. *Application of water jet technology for incremental sheet metal forming*. J Mech Eng 50(12), 2004, pp. 613-622.
97. Jurisevic, B., et al. *Incremental Sheet Metal Forming with a High Speed Water Jet*. Proceedings of the International Deep Drawing Research Group conference. May 11, 2003, pp. 139-148.
101. Kalpakcioglu, S. *On the mechanics of shear spinning*. Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME 83(Series B) , 1961, pp. 125-130.
102. Kalpakcioglu, S. *A study of shear-spinability of metals*. Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME(series B) 83, 1961, pp. 478-484.
103. Kainer, K. U., et al. In: M. O. Pekguleryuz, L.W.F. Mackenzie (Eds.) *Metallurgy and petroleum*. Canadian Institute of Mining, Montreal, Canada, 2006, pp. 3-19.
111. Kim, C., Jung, S. Y., Choi, J. C. *A lower upper-bound solution for shear spinning of cones*. International Journal of Mechanical Science 45 (11) , 2003, pp. 1893-1911.
114. Kleiner, M., et al. *Combined methods for the prediction of dynamic instabilities in sheet metal spinning*. CIRP Annals-Manufacturing Technology 51(1), 2002, pp. 209-214.
116. Klimmek, C. K., Gobel, R., Homberg, K. *Finite element analysis of sheet metal forming by spinning*. Journal of Japan Society for Technology of Plasticity 44(507), 2003, pp. 372-374.
117. Klocke, F., Wehrmeister, T. *Laser-assisted metal spinning of advanced materials*. In: 4th Lane Conference, Erlangen, Germany, 2003, pp. 1183-1192.
118. Kobayashi, S. *Instability in conventional spinning of cones*. Journal of engineering for Industry-transactions of the ASME(Series B) 85, 1963, pp. 44-48.
119. Kondo, K., et al. *Investigation of peen Forming*. Journal of the Japan Society of Mechanical Engineeres, Vol. III, nr. 44, 1992, pp. 3663-3672.
126. Leach, D., Green, A. J., Bramsley, A. N., *A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts*, 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven, 2001, pp. 211-218.
127. Leszaj, E. Patent US3342051A1, published 1967-09-19. *Apparatus and process for Incremental Dieless Forming*.
128. Liu, J. H., Yang, H., Li, Y. Q. *A study of stress and strain distributionsof firstpass conventional spinning under different roller-traces*. Journal of Materials Processing Technology 129(1-3), 2002, pp. 326-329.
130. Lu, X. Y., et al. *Three dimensional FE analysis on flange bending for TC4 alloy during shear spinning*. Journal of Materials Science & Technology 22 (6), 2006, pp. 855-859.
132. Martins, P. A. F., et al. *Theory of single point incremental forming*, CIRP Annals – Manufacturing technology 57, 2008, pp. 247-252.
135. Matsubara, S. *Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool*. J. Of the JSTP, vol. 35, 1994, pp. 1311-1316.
141. Micari, F. *Single Point Incremental Forming: recent results*. Seminar on Incremental Forming, 22 October, Cambridge University, 2004.

143. Minutolo, F. C., et al. *Forces analysis in sheet incremental forming and comparison of experimental and simulation results*, In: D.T. Pham, E.E. Eldukhri and A.J. Soroka, Editor(s), Intelligent Production Machines and Systems, Elsevier Science Ltd, Oxford, 2006, pp. 229-234.
149. Mori, K., Nonaka, T. *Simplified three-dimensional finite element simulation of shear spinning process based on axisymmetric modeling*. Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME 32, 2004, pp. 621-627.
155. Oleksik, V. Ș. *Cercetări teoretice și experimentale privind procedeul de deformare incrementală a tablelor metalice de fabricație indigenă*. Teză de doctorat., 2005.
156. Oleksik, V., Pascu, A. *Proiectarea optimală a mașinilor și utilajelor*, Ed. Universității "Lucian Blaga" din Sibiu, Sibiu, 2007.
157. Oleksik, V., et al. *Comparison between the numerical simulations of incremental sheet forming and conventional stretch forming process*. The 11th ESAFORM Conference on Material Forming, 23-25 April 2008, Lyon, France, pp. 1187-1190.
158. Oleksik, V., et al. *Study regarding the influence of geometrical parameters during the incremental forming process*, The 9th International Conference on Technology of Plasticity – 2008, Gyeongju, Korea, September 7-11, Advanced Technology of Plasticity, pp. 963-968.
159. Oleksik, V., et al. *Numerical simulations and experimental researches regards the precision of the incremental forming process*,. The 12th Conference on Metal Forming, Krakow - Poland, September 21-24 2008. Published on Journal "Steel Research International", No. 79 (2008), Special Edition, Volume 1, pp. 591-594.
160. Oleksik, V., et al. *The influence of geometrical parameters on the incremental forming process for knee implants analyzed by numerical simulation* – Proceedings of the 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (Numiform 2010), Published by American Institute of Physics, No. 1252, Vol. 1, 2010, pp. 1208-1215.
161. Oleksik, V., et al. *Experimental study about the surface quality of the medical implants obtained by incremental forming*, International Journal of Material Forming, Springer-Verlag France, Vol. 3, Suppl. 1, pp. 935-938.
162. Otsu, M., Fuji, M., Osakada, K. *Controlled laser forming of sheet metal with shape measurement and using database*, Proc. of Metal Forming , 2000, pp. 433-438.
163. Păunoiu, V., et al. *Experimental researches regarding the forming limit curves using a reduced scale samples*, Analele Universității Dunarea de Jos din Galați, fasc. V, 2005, pp. 55-59.
165. Pohlak, M. Majak, J., Küttner, R. *Incremental sheet forming process modelling – limitation analysis*, journal of Achievements in materials and Manufacturing Engineering, vol. 22, issue 2, 2007, pp. 67-70.
166. Powell, N., Andrew, C. *Incremental forming of flanged sheet metal components without dedicated dies*. IMECHE part B, J. Of Engineering Manufacture, vol. 206, 1992, pp. 41-47.
167. Quigley, E., Monaghan, J. *Metal forming: an analysis of spinning processes*. Journal of Materials Processing Technology 103(1), 2000, pp. 114-119.
168. Quigley, E., Monaghan, J. *Enhanced finite element models of metal spinning*. Journal of Materials Processing Technology 121(1), 2002, pp. 43-49.
169. Quigley, E., Monaghan, J. *The finite element modeling of conventional spinning using multi-domain models*. Journal of Materials Processing Technology 124(3), 2002, pp. 360-365.

174. Shim, M.-S., Park, J.J., The formability of aluminum sheet in incremental forming. *Journal of materials Processing Technology* 113, 2001, pp. 654-658.
178. Silva, M. B., et al. *Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis*, *international Journal of machine Tools & Manufacture* 48, 2008, pp. 73-83.
179. Silva, M. B., et al. *Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding*, *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009, pp. 811-820.
180. Sortais, H. C., Kobayashi, S., Thomsen, E. G. *Mechanics of conventional spinning*. *Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME* 85 (Series B), 1963, pp. 346-350.
182. Velicu, Ș., et al. *A Study on the Improvement of the Mechanic Eccentric Presser Dynamic*, *ICMaS București*, 2004, pp. 223-226.
183. Taleb Araghi, B., et al. *Investigation into a new hybrid forming process: Incremental Sheet forming combined with stretch forming*, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 58, 2009, pp. 225-228.
188. Wang, Z. R., Lu, G. *A suggestion on the standardization of English technical terminology used in rotary forming*. In: *Proceedings of the Fourth International Conference of Rotary Forming*. October 17-21, 1989, pp. 38-41.
190. Yamashita, M., Gotoh, M., Atsumi, S.-Y., Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology* 199, 2008, pp. 163-172.
194. Zhan, M., et al. *Research on variation of stress and strain field and wall thickness during cone spinning*. *Materials Science Forum* 532-533, 2006, pp. 149-152.
195. Zhan, M., et al. *3D FEM analysis of influence of roller feed rate on forming force and quality of cone spinning*. *Journal of Materials Processing Technology* 187-188., 2007, pp. 486-491.
196. Zhang, Q., et al. *Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming*, *Journal of Materials Processing Technology* 209, 2009, pp. 5514-5520.
197. *** ARAMIS User Manual – Software. *FLC Computation v6*, GOM mbH, Germany, 2007.
198. *** ISO 12004-2/2008 Metallic materials. *Sheet and strip. Determination of forming-limit curves. Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory*, 2008.
199. *** LS-DYNA version 971. Keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, Vol.1, 2009.
200. *** LS-DYNA version 971. Materials models. Livermore Software Technology Corporation, Vol.2, 2009.
201. *** LS-DYNA version 971. Theoretical Manual. Livermore Software Technology Corporation, 2009.
202. *** MSC.MARC. *Theory and user information*. MSC. Software Corporation, Volume A, Version 2003
203. *** SR EN 10002-1:2002 *Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metodă de încercare (la temperatura ambiantă)*, 2002.