



**UNIVERSITATEA "LUCIAN BLAGA" DIN SIBIU**  
**FACULTATEA DE INGINERIE**

Ing. Melania TERA

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**- REZUMAT -**

**CONTRIBUȚII PRIVIND  
AMBUTISAREA UNOR  
TABLE BIMETALICE**

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Octavian BOLOGA

**SIBIU**

**- 2012 -**



# CUPRINS

<b>1. INTRODUCERE .....</b>	<b>(5).....5</b>
1.1. JUSTIFICAREA TEMATICII LUCRĂRII .....	(5)..... 5
1.2. PRINCIPALELE DIRECȚII DE CERCETARE ABORDATE.....	(6)..... 7
<b>2. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL PRELUCRĂRILOR PRIN AMBUTISARE A MATERIALELOR BIMETALICE .....</b>	<b>(8).....9</b>
2.1. REALIZĂRI ȘI TENDINȚE ÎN DOMENIUL PROCEDEELOR DE AMBUTISARE A TABLELOR METALICE .....	(8).....9
2.1.1. <i>Procedeul de ambutisare incrementală a tablelor metalice</i> .....	(8)..... 9
2.1.2. <i>Ambutisarea incrementală cu contraoanson</i> .....	11
2.1.3. <i>Deformarea incrementală prin ciocănire</i> .....	12
2.1.4. <i>Ambutisarea multipunct</i> .....	15
2.1.5. <i>Ambutisarea incrementală asistată de fasciculul laser</i> .....	16
2.1.6. <i>Ambutisarea incrementală cu jet de apă</i> .....	19
2.1.7. <i>Ambutisarea incrementală în trepte</i> .....	21
2.2. MATERIALE METALICE MULTISTRAT FOLOSITE LA AMBUTISARE.....	(8).....22
2.2.1. <i>Structuri realizate din îmbinarea a două table</i> .....	23
2.2.2. <i>Plăci de tip sandwich</i> .....	27
2.2.3. <i>Table bimetalice sudate cap la cap</i> .....	29
2.2.4. <i>Domenii de utilizare ale materialelor metalice multistrat</i> .....	(10).....30
2.3. ECHIPAMENTE TEHNOLOGICE UTILIZATE PENTRU PRELUCRĂRILE PRIN PROCEDEUL DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ .....	32
2.3.1. <i>Echipament tehnologic de tip mașină unealtă cu comandă numerică</i> .....	32
2.3.2. <i>Echipament tehnologic de tip mașină specializată</i> .....	34
2.3.3. <i>Echipament tehnologic de tip robot industrial serial</i> .....	35
2.3.4. <i>Echipament tehnologic de tip structură robotică paralelă</i> .....	36
2.4. TEHNICI CAD/CAM UTILIZATE PENTRU FABRICAREA PIESELOR PRIN PROCEDEUL DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ .....	37
2.4.1. <i>Tehnici CAD/CAM în prelucrările pe mașini unelte cu comandă numerică</i> .....	37
2.4.2. <i>Particularități ale aplicării tehnicilor CAD/CAM pentru procedeul de ambutisare incrementală</i> ...	38
2.5. TRAIECTORII DE PRELUCRARE UTILIZATE ÎN PROCEDEUL DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ .....	40
2.6. CONCLUZII ȘI OBIECTIVE ALE CERCETĂRILOR .....	(10).....43
<b>3. FUNDAMENTE TEORETICE ȘI CERCETĂRI PRELIMINARE PRIVIND STUDIUL PROCESELOR DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ A TABLELOR BIMETALICE .....</b>	<b>(13).....46</b>
3.1. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MATERIALELOR .....	(13).....46
3.1.1. <i>Determinarea caracteristicilor intrinseci ale materialelor prin încercarea la tracțiune</i> .....	46
3.1.2. <i>Determinarea curbelor limită de deformare</i> .....	(15).....54
3.2. PRINCIPII TEORETICE ALE SIMULĂRII AMBUTISĂRII TABLELOR BIMETALICE.....	58
3.2.1. <i>Metoda de analiză folosită în cadrul simulărilor numerice</i> .....	60
3.2.2. <i>Modelul sistemului de prelucrare prin ambutisare incrementală a tablelor bimetalice</i> .....	(18).....61
3.2.3. <i>Rezultatele simulării numerice</i> .....	(22).....66
3.2.3.1. <i>Rezultatele simulării – piese de tip trunchi de con</i> .....	(22).....66
3.2.3.1. <i>Rezultatele simulării – piese de tip emisferă</i> .....	71
3.2.3.1. <i>Rezultatele simulării – piese complexe</i> .....	73
3.3. SISTEME DE ACHIZIȚII DE DATE ASISTATE DE CALCULATOR .....	75
3.3.1. <i>Noțiuni generale</i> .....	75
3.3.2. <i>Funcțiile instrumentației virtuale</i> .....	76
3.3.3. <i>Semnale vehiculate în sistem de achiziții de date</i> .....	77
3.3.3.1. <i>Semnalul digital</i> .....	78
3.3.3.2. <i>Semnalul analogic</i> .....	79
3.3.4. <i>Achiziția datelor experimentale</i> .....	83
3.4. CONCLUZII.....	(26).....89
<b>4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND AMBUTISAREA INCREMENTALĂ A TABLELOR BIMETALICE.....</b>	<b>(27).....90</b>

4.1. MATERIALE UTILIZATE .....	(27)...	90
4.2. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MATERIALELOR .....		93
4.2.1. Determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor prin încercarea la tracțiune.....		93
4.2.2. Determinarea caracteristicilor intrinseci ale materialelor .....		95
4.2.3. Determinarea curbelor limită de deformare.....		96
4.3. PROCEDEUL DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ A TABLELOR BIMETALICE UTILIZAT PENTRU DESFĂȘURAREA CERCETĂRIILOR .....	(27)...	101
4.3.1. Procedeele tehnologice utilizate pentru deformarea incrementală a tablelor bimetalice.....	(27)...	101
4.3.2. Tipurile de piese realizate .....	(30)...	106
4.3.2.1. Piese de tip trunchi de con.....	(31)...	107
4.3.2.2. Piese de tip emisferă .....	(33)...	112
4.3.2.3. Piese complexe .....	(34)...	115
4.4. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A DEFORMAȚIILOR PIESELOR AMBUTISATE INCREMENTAL .....	(40)...	122
4.4.1. Măsurarea deformațiilor pieselor de tip trunchi de con .....	(40)...	125
4.4.1.1. Piese de tip trunchi de con prelucrate prin traiectorii simple .....	(40)...	125
4.4.1.2. Piese de tip trunchi de con prelucrate prin traiectorii complexe.....	(41)...	128
4.4.2. Măsurarea deformațiilor pieselor de tip emisferă.....		133
4.4.3. Măsurarea deformațiilor pieselor complexe .....		138
4.5. ANALIZA COMPARATIVĂ A REZULTATELOR TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE .....	(44)...	144
4.5.1. Piese de tip trunchi de con .....	(44)...	144
4.5.1.1. Evoluția deformațiilor principale.....		147
4.5.2. Piese de tip emisferă .....		149
4.5.3. Piese complexe.....		150
4.6. PRECIZIA DIMENSIONALĂ ȘI DE FORMĂ A PIESELOR PRELUCRATE PRIN PROCEDEUL DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ .....	(47)...	152
4.6.1. Precizia dimensională și de formă a pieselor de formă emisferică .....		152
4.6.2. Precizia dimensională și de formă a pieselor de formă complexă.....	(47)...	156
4.7. STUDIUL RUGOZITĂȚII PIESELOR .....	(50)...	161
4.8. CONCLUZII .....	(51)...	164
<b>5. CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND FORȚELE ȘI MOMENTELE DIN PROCESUL DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ .....</b>	<b>(52)...</b>	<b>165</b>
5.1. INTRODUCERE .....		165
5.2. CINEMATICA MIȘCĂRII.....		165
5.3. CALCULUL FORȚELOR ȘI MOMENTELOR REZISTENTE .....		167
5.3.1. Deplasări pe orizontală (axele X și Y) .....		167
5.3.2. Deplasări pe verticală (axa Z).....		171
5.4. DETERMINAREA MOMENTELOR ȘI FORȚELOR REZISTENTE PENTRU SISTEMUL EXPERIMENTAL .....		172
5.5. CONCLUZII.....	(53)...	184
<b>6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII.....</b>	<b>(54)...</b>	<b>185</b>
6.1. CONCLUZII FINALE .....	(54)...	185
6.2. PRINCIPALELE CONTRIBUȚII ALE LUCRĂRII .....	(55)...	187
6.3. DIRECȚII DE CERCETARE ULTERIOARE .....	(57)...	189
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>(58)...</b>	<b>190</b>
<b>ANEXE.....</b>		<b>199</b>
ANEXA 1. PIESE PRELUCRATE.....		199
ANEXA 2. PIESE DEFECTE .....		201
ANEXA 3. PROGRAM SIMULARE NUMERICĂ.....		202
ANEXA 4. PROGRAM CNC ÎN COD ISO .....		204
ANEXA 5. RUGOZITĂȚI PENTRU DIVERSE TIPURI DE PIESE PRELUCRATE.....		213

# **1. INTRODUCERE**

## **1.1. Justificarea tematicii lucrării**

Procedeele de prelucrare prin deformare plastică la rece, împreună cu procedeele de prelucrare prin aşchiere, reprezintă cele mai răspândite și utilizate metode de generare a formei pieselor finite în domeniul construcției de mașini.

Cele două mari grupe de procedee de prelucrare și-au împărțit astfel domeniul, stabilindu-se și o distribuție implicită a necesității de utilizare a uneia sau alteia: prelucrări prin aşchiere pentru obținerea pieselor de dimensiuni medii și mici, în condiții de mare precizie și prelucrări prin deformare plastică la rece pentru obținerea unor piese de dimensiuni mari și forme complexe. Această distribuție a fost influențată în principal de industria constructoare de autovehicule, „locomotiva” industriei prelucrătoare, piesele reprezentative pentru cele două tipuri de procedee de prelucrare fiind piesele din construcția motoarelor pentru aşchiere, respectiv elementele de caroserie, pentru deformarea plastică la rece.

Aceste paradigme au fost însă serios zdruncinate de evoluțiile din domeniul tehnic și economic din ultimii ani. Pe de o parte, cercetările din domeniul prelucrărilor prin deformare plastică la rece au extins mult zona de aplicabilitate a acestora, ambutisarea incrementală fiind unul dintre procedeele care permit realizarea unor piese în condiții de dimensiuni, forme, precizii și costuri care erau cu puțin timp în urmă accesibile doar prelucrărilor prin aşchiere. Pe de altă parte, criza economico-financiară, care se manifestă la nivel global, a obligat firmele să-și regândească strategiile de producție și să investească în tehnologii de prelucrare cu grad ridicat de noutate. Tehnologiile de prelucrare prin deformare plastică au beneficiat intens de acest lucru, literatura de specialitate de ultimă oră abundând de rezultate în acest domeniu, un loc important fiind ocupat de ambutisarea incrementală.

De asemenea, industria constructoare de autovehicule și-a redus rolul dominat în industria prelucrătoare, în favoarea industriei bunurilor de consum și a industriei bio-medicale. Acest fapt nu a condus la o scădere a gradului de utilizare a tehnologiilor de prelucrare prin deformare plastică la rece, ci dimpotrivă, dar a implicat în principal găsirea unor soluții la următoarele provocări: reducerea dimensiunilor pieselor realizate prin aceste procedee, creșterea complexității formei și creșterea gradului de flexibilitate a procedeeului de generare a formei pieselor.

Procedeul de ambutisare incrementală, studiat în cadrul lucrării, răspunde acestor provocări, piesele realizate îndeplinind toate cerințele amintite mai sus. Cu toate acestea, procedeul are încă un grad ridicat de noutate, existând încă multe întrebări de natură științifică și tehnologică care își așteaptă încă răspunsul.

Cercetările asupra procedeeului de ambutisare incrementală au un grad ridicat de dificultate, existând câteva motive principale ale acestui fapt. În primul rând baza materială pentru aceste cercetări este una foarte complexă, fiind necesare echipamente pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor utilizate, echipamente pentru măsurarea deformațiilor, echipamente pentru achiziții de date, echipamente tehnologice pentru realizarea propriu-zisă a proceselor. De asemenea, sunt necesare pachete software pentru simulare, analiză tehnică, prelucrare și interpretare a datelor.

O estimare aproximativă, dar cu un grad relativ ridicat de acuratețe, relevă faptul că suma necesară dezvoltării unui laborator de cercetări în domeniul procedeelor moderne de prelucrare prin deformare plastică la rece depășește 500.000 EUR. Nu în ultimul rând trebuie avută în vedere resursa umană implicată în aceste cercetări care trebuie să aibă un nivel extrem de ridicat de instruire. Studiile asupra ambutisării incrementale necesită cunoștințe din domeniul mecanicii teoretice, studiului și tehnologiei materialelor, teoriei plasticității, tehnologiei construcțiilor de mașini, tehnicilor CAD/CAE/CAM, automatizărilor industriale și programării mașinilor unelte cu comandă numerică.

În acest context, este evident că o astfel de cercetare nu poate fi inițiată și finalizată cu succes decât într-un centru de excelență, care îndeplinește cerințele enunțate: o dotare cu echipamente competitive la nivel mondial și un colectiv de cercetare valoros, cu experiență și realizări deosebite în domeniu.

Cercetările desfășurate pe parcursul elaborării prezentei lucrări au fost realizate în cadrul unui astfel de centru de excelență, Centrul de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice (CSCDP) al Universității “Lucian Blaga” din Sibiu, sub îndrumarea conducătorului științific al prezentei lucrări, prof.univ.dr.ing. Octavian Bologa, directorul centrului, și beneficiind de sprijinul colectivului de cercetare format și coordonat de către acesta.

În consecință, tematica lucrării a fost aleasă în contextul prezentat mai sus, legat de dezvoltarea noilor procedee de prelucrare prin deformare plastică la rece, iar cercetările teoretice și experimentale abordate pe parcursul elaborării lucrării au fost realizate beneficiind de baza materială a CSCDP, de competența, experiența în domeniu și rezultatele anterioare obținute de membrii colectivului de cercetare al acestuia, și, nu în ultimul rând, de sprijinul, sfaturile și îndrumarea competentă a conducătorului științific al lucrării.

Autoarea dorește să mulțumească și pe această cale, în primul rând, domnului prof. univ. dr. ing. Octavian Bologa, în dubla sa calitate de conducător științific al lucrării și de director al Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice, pentru sprijinul, sfaturile și îndrumarea competentă de pe tot parcursul elaborării tezei.

De asemenea, se cuvin aduse mulțumiri, întregului colectiv al centrului de cercetări menționat mai sus și al Departamentului de Mașini și Echipamente Industriale, pentru susținerea permanentă, sfaturile competente și asistența oferită în utilizarea unor echipamente sau pachete software.

Autoarea dorește să aducă mulțumiri și membrilor comisiei de evaluare a tezei de doctorat, pentru sugestiile oferite în etapa de finalizare a lucrării și pentru analiza acesteia.

Nu în ultimul rând, autoarea dorește să mulțumească familiei și prietenilor, pentru toată înțelegerea și sprijinul necondiționat oferite pe parcursul elaborării tezei de doctorat.

## **1.2. Principalele direcții de cercetare abordate**

Principalele obiective ale lucrării s-au desprins din analiza critică a stadiului actual din domeniu și au presupus orientarea cercetărilor pe câteva direcții principale, prezentate în continuare. Una dintre aceste direcții a fost utilizarea ca și semifabricate a tablelor bimetalice. Acest tip de semifabricat poate duce la cumularea avantajelor oferite de ambele materiale din componența lui și la reducerea dezavantajelor majore ale fiecăruia luat separat. De asemenea,

un semifabricat de acest tip, de o anumită grosime, compus dintr-un material mai scump și unul mai ieftin, în anumite condiții (legate în special de procedeul de prelucrare), poate avea o comportare similară sau apropiată cu un semifabricat de aceeași grosime, compus numai din materialul mai scump, cu efecte evidente privind reducerea costurilor. Mai mult, există situații în care sunt necesare anumite proprietăți la exteriorul piesei și cu totul altele la interior. Această necesitate apare frecvent în două cazuri. Un prim caz este legat de industria alimentară, în cazul recipientelor, unde la interiorul recipientelor sunt necesare proprietăți legate de conservarea conținutului, gradul de contaminare cu impurități, reactivitatea cu diverse componente ale conținutului etc., în timp ce la exterior sunt necesare proprietăți legate de în principal de rezistența mecanică. Un al doilea caz este legat de industria bio-medicală, la fabricarea componentelor de proteze și implanturi, unde stratul interior vine de multe ori în contact cu țesuturile, iar stratul exterior cu mediul ambiant, fiecare dintre aceste straturi având funcții și, evident, proprietăți diferite.

În contextul acestei abordări, cercetările teoretice au urmărit dezvoltarea unor modele care să permită analiza prin metoda elementului finit a comportării semifabricatelor de acest tip, în scopul examinării limitelor de deformabilitate a unui material bimetalic.

O altă direcție majoră de cercetare s-a referit la modul de generare a formei pieselor obținute prin procedeul de ambutisare incrementală, din punct de vedere al tipurilor de traiectorii și al strategiilor de prelucrare. Astfel, s-a constatat că literatura de specialitate acordă o atenție redusă tipului de traiectorii utilizate, cercetările fiind orientate aproape în exclusivitate pe folosirea unor traiectorii simple, de tip curbe de nivel, obținute prin intersectarea conturului piesei cu plane paralele cu planul orizontal. Acest lucru se justifică pe de o parte prin dificultatea programării unor traiectorii complexe, în condițiile inexistenței unor pachete software dedicate prelucrărilor prin ambutisare incrementală, iar pe de altă parte dificultății implementării unor astfel de traiectorii pe echipamentele tehnologice utilizate.

În lucrarea de față, în cadrul cercetărilor experimentale au fost utilizate traiectorii complexe pentru generarea formei pieselor, și, de asemenea, au fost abordate strategii de prelucrare în două treceri, una de degroșare și una de finisare. Cercetările derulate pe această direcție au urmărit o mai bună înțelegere a influenței traiectoriei de deplasare a poansonului asupra creșterii gradului de deformabilitate a tablelor bimetalice, precum și asupra calității suprafeței prelucrate, a abaterilor de formă și a preciziei dimensionale.

O ultimă direcție de cercetare experimentală abordată în cadrul lucrării a presupus analiza teoretică și experimentală a forțelor apărute în procesul de prelucrare prin ambutisare incrementală. Este bine cunoscut faptul că nu există echipamente tehnologice dedicate pentru realizarea acestui proces, acesta desfășurându-se în majoritatea cazurilor pe centre de prelucrare prin frezare cu comandă numerică. Acestea din urmă sunt echipamente scumpe și complexe, apariția unor forțe tehnologice rezistente care să depășească valorile admisibile putând duce cu ușurință la deteriorarea acestora. Cercetările desfășurate pe parcursul realizării acestei lucrări au urmărit elaborarea unei metode analitico-experimentale care să permită determinarea acestor forțe în scopul evitării situației amintite mai sus.

## **2. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL PRELUCRĂRILOR PRIN AMBUTISARE A MATERIALELOR BIMETALICE**

### **2.1. Realizări și tendințe în domeniul procedeelor de ambutisare a tablelor metalice**

La ora actuală, procedeele de ambutisare a materialelor sunt bine reprezentate la nivel industrial, mai ales în domeniul construcției de componente pentru autovehicule. Se poate constata însă o anumită discrepanță între dotarea actuală a companiilor industriale din România, cu echipamente pentru ambutisarea „clasică”, și tendințele moderne privind forma pieselor pentru autovehicule, respectiv privind folosirea unor materiale cu caracteristici superioare. Pe de altă parte, competiția tot mai dură din industria autovehiculelor impune o flexibilizare avansată a proceselor tehnologice, implicit a echipamentelor folosite.

Astfel, ambutisarea cu poansoane monobloc, rigide, care realizează forma pieselor de caroserie, de exemplu, ca negativ al propriei forme, nu permite o schimbare rapidă a formei sau tipului de piesă prelucrată, fiind necesară deformarea materialului cu scule unitare de dimensiuni relativ mici sau cu scule segmentate.

În continuare este prezentată o analiză a celor mai importante procedee moderne de ambutisare flexibilă a tablelor metalice.

#### **2.1.1. Procedeul de ambutisare incrementală a tablelor metalice**

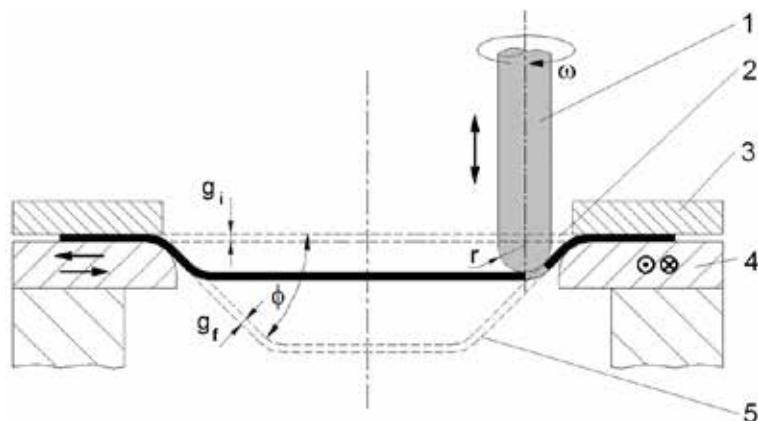
Procedeul de ambutisare incrementală a tablelor metalice permite realizarea prin deformare plastică la rece, a unor cavități de diferite forme și dimensiuni în piese din tablă, pentru o producție de serie mică sau unicat, pornind de la deplasarea, pe anumite traiectorii, a unui poanson de geometrie simplă. Astfel, fără a utiliza plăci active sau poansoane de complexitate ridicată, în funcție de mișcările impuse elementelor active și utilizând același tip de echipament tehnologic, destul de des întâlnit la ora actuală, (de obicei o mașină-unealtă cu cel puțin trei axe comandate numeric) se pot obține o multitudine de forme cave.

Ideea deformării incrementale a unor semifabricate de tip tablă, folosind o sculă cu contact singular (denumit uneori impropriu „contact într-un singur punct” - zona de contact fiind de fapt o suprafață care depinde de forma poansonului), a fost brevetată de Leszak [90] cu mult înainte chiar ca ea să fie realizabilă din punct de vedere tehnic [76].

În cazul procedeului de deformare incrementală a tablelor metalice, deformarea se realizează de către un poanson 1 (fig. 2.1), având raza la vârful  $r$ , aflat în mișcare de rotație în jurul axei sale cu viteza unghiulară  $w$ , care vine în contact parțial cu suprafața semifabricatului 2. Semifabricatul, având grosimea inițială  $g_i$  este fixat cu ajutorul unui inel de reținere 3 pe placa activă 4. Pentru realizarea formei finale a piesei 5, având grosimea  $g_f$  și unghiul de înclinare față de orizontală  $f$ , între poanson și semifabricat trebuie să existe o



mişcare relativă compusă dintr-o deplasare de avans axial pe direcție verticală a poansonului, continuă sau în trepte (incrementală), și o deplasare în planul orizontal a semifabricatului.



*Fig. 2.1. Schema procedurii de ambutisare incrementală a tablelor*

Deformarea începe din zona de pătrundere a poansonului. Acesta parcurge o traiectorie circulară în plan și după completarea acesteia, coboară pentru pasul următor și continuă deformarea. Traiectoria poansonului precum și pasul vertical sunt dependente de forma finală a piesei prelucrate.

Procedeele de ambutisare incrementală, apărute relativ recent, nu este încă foarte bine reprezentat în literatura de specialitate, mai ales în ceea ce privește condițiile de deformare pentru anumite categorii de materiale, în ciuda numeroaselor avantaje pe care le prezintă și a potențialelor aplicații industriale. În plus, deși cercetările publicate sunt relevante, de multe ori rezultatele obținute sunt limitate sau contradictorii [72], ceea ce face necesară continuarea cercetărilor în acest domeniu.

Studiile referitoare la acest procedeu s-au concentrat până în prezent pe trei direcții principale: măsurarea deformațiilor și deplasărilor produse în table, estimarea deformațiilor cu ajutorul metodei elementului finit și măsurarea forțelor de deformare [72].

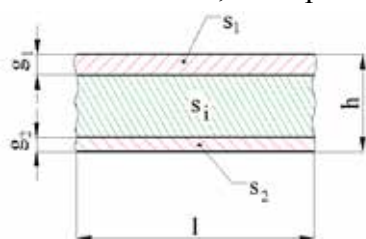
Simulările numerice efectuate de diverși cercetători au arătat că, în cazul realizării prin ambutisare incrementală a unui trunchi de con cu bază circulară sau eliptică [68], [49] sau a unui trunchi de piramidă [112], [10], [76], materialul nu prezintă o deplasare semnificativă pe direcția paralelă cu planul tablei nedeformate, ci se deplasează mai ales perpendicular față de acest plan. Acest lucru a fost demonstrat și prin determinări experimentale de către Sawada pe un model numeric 2D [124]. Ca urmare, se poate considera că starea de deformație creată prin ambutisare incrementală este o stare de deformație plană. Spre deosebire de studiile anterioare, Bambach [10], folosind un model 3D complet, a arătat însă că, deși întinderea și subțierea au loc într-un plan perpendicular pe direcția sculei, solicitarea dominantă în acest plan este cea de forfecare. În planul paralel față de direcția poansonului apar deformații de forfecare, ce cresc cu scăderea diametrului sculei de deformare, ceea ce ar contrazice ipoteza unei stări plane de deformare.

## **2.2. Materiale metalice multistrat folosite la ambutisare**

Deși reprezintă o dezvoltare relativ recentă în industrie, tablele compozite multistrat se regăsesc în prezent în aproape toate domeniile industriale, datorită proprietăților de densitate, rezistență mecanică și absorbție a energiei superioare celor ale semifabricatelor realizate dintr-un

singur material. Acestea sunt utile mai ales în ramuri cum ar fi industria auto, unde mijloacele de transport trebuie să îndeplinească simultan condiții de siguranță crescută a pasagerilor, confort îmbunătățit, creșterea capacității de încărcare în condițiile reducerii consumului de energie.

În principiu, tablele multistrat, fig. 2.17, constau dintr-un număr de două sau mai multe straturi de materiale și grosimi diferite (în general două straturi exterioare  $s_1$  și  $s_2$  și un strat interior  $s_i$  denumit și miez sau inimă), organizate astfel încât să combine cele mai bune proprietăți ale componentelor rezultând în final o serie de proprietăți superioare comparativ cu cele ale materialului de bază. Straturile exterioare  $s_1$  și  $s_2$  au în general grosimi reduse dar o densitate ridicată, o bună rezistență și rigiditate, iar la interior miezul are o grosime mai mare și o densitate scăzută. Aceste straturi sunt îmbinate mecanic sau prin intermediul adezivilor, astfel încât să se comporte ca o componentă unitară. De regulă, în cazul structurilor multistrat straturile exterioare preiau solicitările de îndoire, în timp ce stratul interior (miezul) preia solicitările de forfecare.



$g_1, g_2$  – grosimea straturilor exterioare;  
 $s_1, s_2$  – straturile exterioare;  
 $s_i$  – stratul interior;  
 $h$  – grosimea totală;  
 $l$  – lungimea tablei.

Fig. 2.17. Schema de principiu a tablelor multistrat

## 2.2.4. Domenii de utilizare ale materialelor metalice multistrat

În prezent, structurile multistrat sunt utilizate în cele mai diverse aplicații, datorită înaltei eficiențe rezistență–greutate și rigiditate–greutate. Numeroase aplicații pot fi întâlnite la fuzelajele și aripile avioanelor, la navele spațiale, automobilele și ambarcațiunile de curse, la construcția de clădiri și echipamente sportive:

- mobilierul utilizat în industria aeronautică și cea spațială;
- datorită greutateii reduse și rezistenței la lovituri și deteriorare, plăcile din materiale multistrat sunt utilizate la containerele din transport aerian;
- la autovehicule, pentru șasiuri, și pentru absorbția energiei, direcționarea aerului, izolare termică, suprafețe reflectorizante pentru faruri [74], [75];
- scuturi termice și de amortizare a vibrațiilor[74];
- în domeniul medical pot fi obținute plăci craniene sau dentare (fig. 2.42) [136, 76].

## 2.6. Concluzii și obiective ale cercetărilor

Procedeul de prelucrare a tablelor prin ambutisare incrementală are un potențial ridicat în ceea ce privește obținerea prin deformare plastică a unor piese de forme complexe. Aplicarea pe scară industrială a procedurii este însă limitată, deși cercetările recente au încercat să amelioreze această situație. În primul rând, conform cercetării bibliografice efectuate, nu există încă o opinie unanimă referitor la echipamentul tehnologic optim pentru acest procedeu. Unii autori consideră că mașinile unelte cu comandă numerică de tipul centrelor de prelucrare prin frezare sunt cele mai indicate, alții au dezvoltat echipamente dedicate, în timp ce alții au cercetat posibilitatea utilizării roboților industriali seriali și

paraleli. Un alt aspect este legat de faptul că nu există suficiente date legate de mărirea forțelor rezistente tehnologice care apar în proces, și nici metode practice rapide și eficiente de determinare a acestora. Astfel, există o reținere la nivelul companiilor industriale în utilizarea procedeului, pentru a nu se ajunge la deteriorarea unor echipamente scumpe (mașini unelte cu comandă numerică sau roboți industriali) din cauza apariției unor forțe în proces care să depășească limitele admisibile.

Din punct de vedere al semifabricatului utilizat, cercetările au fost orientate spre utilizarea semifabricatelor din tablă realizate dintr-un sigur material. Pe de altă parte, studiile bibliografice au relevat tendința din ce în ce mai accentuată de utilizare în procedeele de prelucrare prin deformare plastică a semifabricatelor multistrat. Cu toate acestea, cercetarea bibliografică nu a identificat nici o referire la utilizarea acestor materiale în procedeul de prelucrare prin ambutisare incrementală. Se poate considera că există în principal două cauze majore pentru această situație. Una dintre acestea se referă la faptul că nu există modele teoretice care să permită studiul prin metoda elementului finit al comportării acestor materiale la deformare. O a doua cauză se referă la faptul că în general costurile asociate cu obținerea acestor semifabricate (lianți, tehnologii speciale de suprapunere și intercalare a diverselor materiale speciale etc.) nu justifică utilizarea lor la fabricarea unor piese specifice procedeului de ambutisare incrementală. Cu toate acestea, cercetarea bibliografică a relevat faptul că o combinație optimă de materiale, susceptibile de a fi prelucrate prin deformare plastică la rece include o tablă dintr-un material cu rezistență mecanică ridicată, din categoria oțelurilor și un material cu greutate specifică redusă, dar cu o capacitate de deformare superioară, cum sunt aliajele de aluminiu. Astfel, un semifabricat realizat din cele două materiale (oțel și aliaj aluminiu) beneficiază de o serie de avantaje specifice materialelor multistrat, fără a avea costurile ridicate asociate obținerii lui.

Din punct de vedere al tehnologiei utilizate, nu există încă suficiente date, și implicit o abordare unitară care să permită obținerea pieselor în condiții optime atât din punct de vedere al preciziei de formă și dimensionale și a calității suprafețelor prelucrate cât și a comportării semifabricatului la deformare (tensiuni, deformații, subțieri).

Generarea formei pieselor, indiferent de echipamentul tehnologic utilizat este supusă unor limitări datorate, în principal, inexistenței unor pachete software CAM dedicate procedeului de ambutisare incrementală. Astfel, fie tipul traiectoriilor utilizate în prelucrare este limitat de utilizarea programării manuale ca metodă de realizare a programului pentru echipamentul tehnologic utilizat, fie, în cazul programării asistate de calculator (CAM), traiectoriile utilizate pentru generarea formelor sunt extrem de simple, limitate la curbele de nivel obținute la intersecția conturului piesei cu planuri paralele cu planul orizontal. Există foarte puține cercetări care să fi studiat influența utilizării unor traiectorii de complexitate ridicată atât asupra preciziei de formă și dimensionale și a calității suprafețelor prelucrate cât și a comportării semifabricatului la deformare.

Cercetările teoretice și experimentale legate de prelucrarea pieselor prin procedeul de ambutisare incrementală au fost orientate în principal pe studierea comportării acestora la deformare. Astfel, se fac studii comparative legate de valorile teoretice ale deformațiilor și subțierilor și cele determinate experimental. Există însă foarte puține studii asupra preciziei

dimensionale și de formă și a rugozității pieselor fabricate prin acest procedeu și a modului în care acestea pot fi influențate prin utilizarea unor strategii și parametri diferiți de prelucrare.

În consecință, cercetările realizate pe parcursul elaborării acestei lucrări au fost orientate spre obiectivele prezentate în continuare.

Din punct de vedere al cercetărilor teoretice:

- dezvoltarea unor modele care să permită analiza prin metoda elementului finit a comportării semifabricatelor bimetalice, compuse dintr-un strat din oțel și unul din aluminiu, în scopul examinării limitelor de deformabilitate a unui material bimetalic;
- realizarea unor simulări a procedeeului de prelucrare prin ambutisare incrementală a tablelor bimetalice;
- realizarea asistată de calculator a unor programe pentru generarea unor traiectorii complexe de prelucrare;
- determinarea unor relații analitice și elaborarea unei metode teoretico-experimentale de estimare a forțelor rezistente tehnologice aferente procedeeului.

Din punct de vedere al cercetărilor experimentale:

- propunerea și validarea experimentală a tablei bimetalice ca material utilizabil pentru fabricarea pieselor prin procedeeul de ambutisare incrementală;
- cercetări experimentale de determinare a comportării la ambutisare incrementală a tablelor bimetalice în scopul determinării caracteristicilor de material;
- realizarea unor cercetări experimentale asupra comportării tablelor bimetalice supuse procedeeului de ambutisare incrementală;
- determinarea experimentală a influenței diversilor parametri tehnologici ce intervin în proces;
- realizarea unor cercetări privind influența traiectoriilor utilizate;
- realizarea unor cercetări asupra preciziei de formă și dimensionale și a calității suprafețelor prelucrate pentru piesele obținute.

### **3. FUNDAMENTE TEORETICE ȘI CERCETĂRI PRELIMINARE PRIVIND STUDIUL PROCESELOR DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ A TABLELOR BIMETALICE**

#### **3.1. Determinarea caracteristicilor materialelor**

Cercetările desfășurate pe parcursul elaborării acestei lucrări au utilizat frecvent informații legate de caracteristicile de material și comportarea la deformare a tablelor bimetalice. Aceste date au fost determinate experimental folosind proceduri specifice, descrise în cadrul acestui capitol.

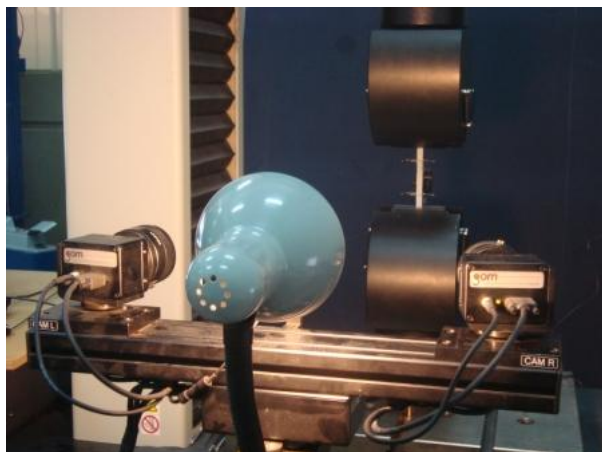
În scopul determinării comportării materialelor utilizate s-au derulat încercări pentru determinarea caracteristicilor intrinseci (încercarea la tracțiune) și trasarea curbelor limită de deformare (încercarea Nakajima).

Pe parcursul cercetărilor experimentale au fost utilizate două tipuri de materiale, oțel DC04 și aluminiu AA6016. În continuare sunt descrise metodele și procedurile generale și fundamentele teoretice care stau la baza acestora, valorile concrete ale caracteristicilor materialelor de mai sus fiind prezentate în capitolul dedicat cercetărilor experimentale.

Standul experimental utilizat pentru încercarea la tracțiune compus din mașina de încercat la tracțiune - Instron 5587 și sistemul optic de măsurare a deformațiilor - Aramis este prezentat în figura 3.3.



*Fig. 3.3. Standul experimental utilizat pentru încercarea la tracțiune*



a. Sistemul optic de măsurare a deformațiilor - Aramis

b. Detaliu cu extensometru montat pe epruvetă

Fig.3.4. Mașina de încercat la tracțiune - Instron 5587

Pentru realizarea încercărilor suprafața epruvetelor a fost acoperită cu două straturi de vopsea. Primul strat, de vopsea albă mată, a fost distribuit uniform pe toată suprafața, acoperind total epruvetele, iar al doilea strat, de vopsea neagră, a fost pulverizat într-o distribuție aleatoare de puncte având o granulație specificată în documentația sistemului Aramis.

Utilizând rețeaua de puncte astfel realizată s-au măsurat deplasările fiecărui punct pe tot parcursul derulării încercărilor, sistemul optic de măsurare a deformațiilor - Aramis determinând deformațiile ce apar în epruvetele solicitate.

Epruvetele astfel pregătite au fost supuse pe rând testului de încercare la tracțiune pe mașina de încercat la tracțiune Instron 5587 și concomitent măsurate cu sistemul Aramis.

Pentru determinarea valorilor lungimii și lățimii, inițiale și finale, ale fiecărei epruvetei deformată a fost utilizat programul aferent sistemului optic de măsurare a deformațiilor - Aramis. Deoarece măsurarea întregii epruvete nu este posibilă, din cauza condițiilor de luminozitate în zona de prindere a epruvetei în bacurile mașinii, pentru determinarea valorilor menționate anterior, s-a utilizat următorul algoritm:

- s-au definit două puncte pe direcția lungimii epruvetei, respectiv două puncte pe direcția lățimii epruvetei (fig. 3.6);
- s-au măsurat lungimile segmentelor dintre cele două puncte, pe direcția lungimii, respectiv pe direcția lățimii epruvetei, la două momente ale încercării, și anume: momentul inițial și final al deformării;
- aceste valori reprezintă valorile mărimilor inițiale  $L_0$ ,  $b_0$ , respectiv finale  $L$  și  $b$ , prezentate în relația (3.6).

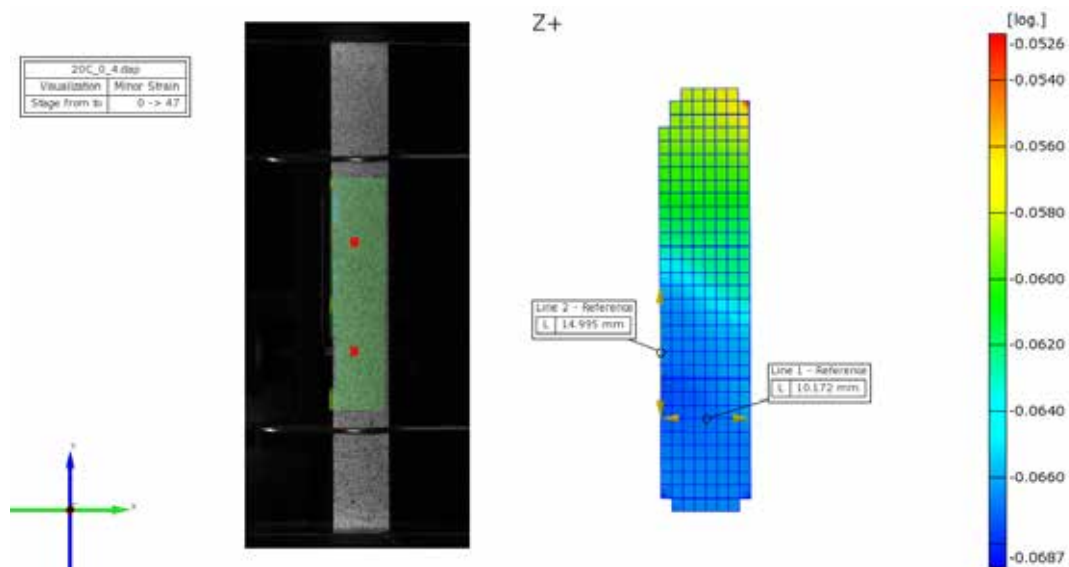


Fig.3.6 Măsurarea lungimii și lățimii epruvetei

Analiza rezultatelor se face pentru momentul anterior apariției găturii, timpul având aceeași valoare pentru ambele tipuri de încercări.

Distribuțiile deformațiilor principale și a grosimii epruvetei indică faptul că acestea sunt uniforme pe întreaga lungime calibrată a epruvetei, datorită ipotezei omogenității materialului în toată structura [166].

Pe baza rezultatelor obținute experimental s-a ajuns la cunoașterea exactă a caracteristicilor mecanice și a parametrilor intrinseci ai materialului precum și a modelului comportării elasto-plastice a materialului, necesare pentru simularea numerică prin metoda elementului finit.

### 3.1.2. Determinarea curbelor limită de deformare

Determinarea curbelor limită de deformare are ca scop obținerea limitei maxime de deformare a unui material. Pentru a determina curbele limită de deformare este necesar ca la contactul dintre poanson și material frecarea să fie cât mai redusă.

Pe suprafața plană și nedeformată a semifabricatului se aplică o rețea de cercuri cu diametrul de 2 sau 3 mm sau un model aleatoriu de puncte. Semifabricatul este apoi deformat conform testului Nakajima sau Marciniak, până la apariția fisurii în material, moment în care testul este oprit. Se determină deformațiile materialului, care sunt măsurate în faza anterioară ruperii. Deformațiile maxime pe care le suportă materialul fără apariția ruperii sunt determinate prin interpolare, iar valoarea maximă a acestora constituie curba limită de deformare [168].

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, stare plană, 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 ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ) până la forfecarea pură ( $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ ) [13].



Pentru determinarea curbilor limită de deformare s-a optat pentru testul Nakajima [107], care presupune deformarea epruvetelor cu un poanson semisferic și o placă activă de formă circulară. Această încercare simulează foarte realist procesele de ambutisare prin faptul că ține seama atât de fenomenul de frecare dintre poanson și piesă cât și de efectul razei la vârf a poansonului [13].

Pentru epruvetele utilizate s-a ales forma propusă de Hašek [63]. Epruvetele de formă circulară au diametrul de 200 mm și degajări laterale simetrice față de direcția de laminare având raze diferite (fig. 3.7). Prin utilizarea acestor epruvete se pot obține căi de deformare cuprinse între tracțiunea uniaxială și întinderea echibiaxială, acoperindu-se astfel întreg domeniul de variație al stărilor de deformare ale tablelor [13].

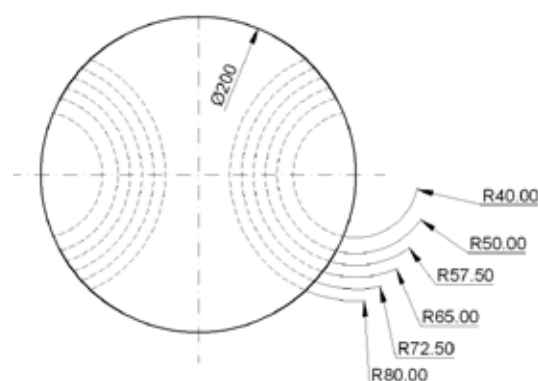


Fig.3.7. Forma epruvetelor pentru determinarea curbilor limită de deformare

Orientarea semifabricatelor în raport cu direcția de laminare 1 se face conform figurii 3.8, și anume la oțel este perpendiculară pe direcția degajării (fig. 3.8.a), iar la aluminiu este paralelă cu direcția degajării (fig. 3.8.b).

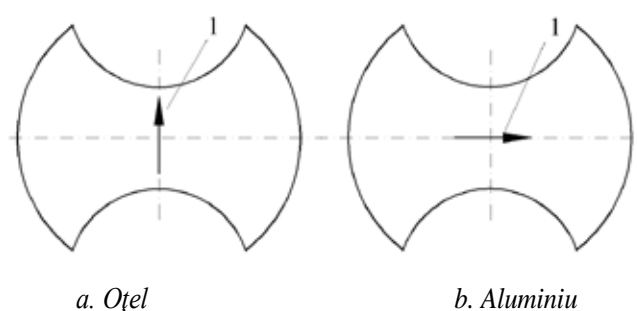


Fig. 3.8. Orientarea semifabricatelor în raport cu direcția de laminare

Conform metodologiei, trebuie realizat un număr de teste având ca rezultat minim trei piese valide. Abaterea totală a sistemului trebuie să fie mai mică de 2%. Precizia măsurării este influențată de:

- acuratețea rețelei aplicate pe semifabricat;
- rezoluția camerei (abaterea dispozitivului de măsurare trebuie să fie mai mică de 1% din lungimea măsurată);
- domeniul de măsurare;
- algoritmul de calcul.



Măsurarea deformațiilor se poate realiza pe o rețea de dimensiune cunoscută măsurarea făcându-se doar pe rețeaua finală, în cazul în care abaterea rețelei inițiale este mai mică de 1%, sau prin compararea dimensiunii rețelei finale cu cea inițială.

#### **Standul experimental utilizat**

Pentru determinarea curbelor limită de deformare s-a utilizat un stand din dotarea Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice al Universității „Lucian Blaga” din Sibiu. Standul este compus din dispozitivul de ambutisare, sistemul de achiziție și prelucrare a datelor experimentale și sistemul optic de măsurare a deformațiilor Aramis.

Dispozitivul de ambutisare (fig. 3.10) este compus dintr-o matriță de ambutisare, modulară, fixată pe masa dispozitivului, având montate în partea inferioară motoarele hidraulice liniare 14 care acționează poansonul 1 și inelul de reținere 6. Matrița de ambutisare este cu acționare inferioară, cu placa activă 2 fixă. Elementele active ale matriței: poansonul, placa activă și inelul de reținere sunt modulare, rapid schimbabile, astfel putându-se realiza diferite tipuri de încercări, cum ar fi: testul Nakajima, testul Marciniak, teste de ambutisare a pieselor cilindrice, conice, paralelipipedice etc.

Poansonul este acționat în mișcare de translație de către tija motorului hidraulic de ambutisare 15, iar inelul de reținere de către cele patru motoare hidraulice liniare de reținere 14. Acționarea și comanda motoarelor hidraulice, de ambutisare respectiv de reținere, se realizează prin intermediul a două pompe hidraulice independente, cu presiuni maxime de 250 bar (circuitul de ambutisare) respectiv 700 bar (circuitul de reținere).

Elementele componente ale standului pentru încercarea Nakajima sunt următoarele:

- |   |                         |  |
|---|-------------------------|--|
| 1 - Poanson;                                | 6 - Placă intermediară; | 13 - Flanșă;   |
| 2 - Placă activă;                           | 7 - Placă de ghidare;   | 14 - Motor hidraulic liniar pentru reținerea semifabricatului; |
| 3 - Piuliță canelată;                       | 8 - Bucșe de ghidare;   | 15 - Motor hidraulic liniar pentru ambutisare;                 |
| 4 - Placă superioară;                       | 9 - Coloană;            | 16 - Suport.   |
| 5 - Șuruburi pentru strângere suplimentară; | 10 - Placă de presiune; |  |
|   | 11 - Inel de reținere;  |  |
|   | 12 - Suport tijă;       |  |

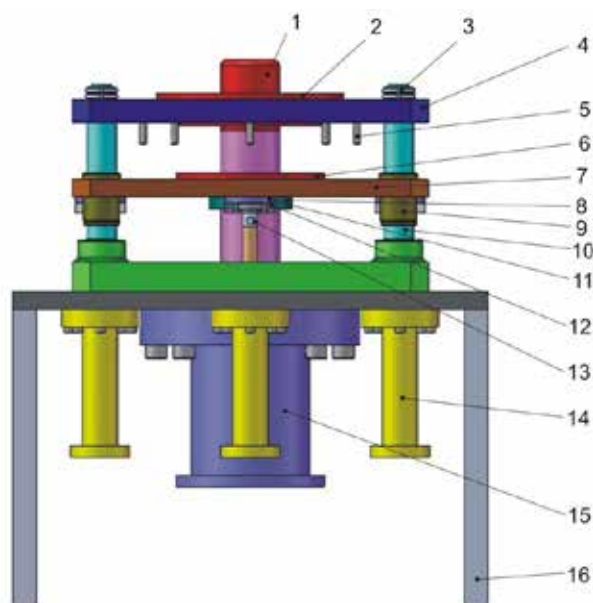


Fig. 3.10. Schemă de principiu a dispozitivului de ambutisare pentru determinarea curbelor limită de deformare

În figura 3.11 este prezentat standul experimental pentru realizarea încercărilor pentru determinarea curbelor limită de deformare. Standul include și sistemul de măsurare a deformațiilor - Aramis amplasat deasupra matriței, astfel încât să poată fi vizualizată și fotografiată întreaga zonă a epruvetei deformate în timpul prelucrării (fig. 3.11).

Principalele caracteristici ale standului sunt:

- forța maximă de ambutisare: 200 kN;
- forța maximă de reținere a materialului: 100 kN;
- poanson semisferic cu diametrul: 100 mm;
- placă activă cu diametrul interior: 105 mm și rază de 10 mm.



*Fig. 3.11. Standul experimental pentru determinarea curbelor limită de deformare*

### **3.2.2. Modelul sistemului de prelucrare prin ambutisare incrementală a tablelor bimetalice**

Modelul sistemului de prelucrare prin ambutisare incrementală este prezentat în figura 3.12. Sistemul de prelucrare este constituit dintr-un semifabricat, de formă pătrată realizat din două table (o foaie de oțel DC04 de grosime 0.6 mm, notată în figura 3.12 cu 4 și o foaie de aluminiu AA6016 de grosime de 0.8 mm notată cu 3), solicitat cu un poanson sferic 1. Tabla bimetalică este fixată între placa de reținere 2 și placa activă 5 cu ajutorul unei forțe de reținere.

Placa activă a fost realizată în două variante:

- a – placă activă de formă rotundă;
- b – placă activă de formă ovală, ambele având o rază de racordare de 6 mm.

Semifabricatul realizat din cele două tipo-dimensiuni de materiale este așezat pe placa activă și este fixat cu inelul de reținere prin intermediul unei forțe de reținere, aplicată uniform pe suprafața acestuia. Astfel, se asigură imposibilitatea alunecării semifabricatului

prin jocul dintre inel și placa activă, procedeul analizat fiind un procedeu la care se obține o anumită adâncire a piesei prin subțierea materialului.

Principalele date geometrice caracteristice procedeului sunt prezentate în tabelul 3.1.

Au fost astfel desfășurate analize separate pentru toate tipurile de piese, corespunzătoare combinațiilor dimensionale din tabelul 3.1, în scopul evidențierii modificărilor la nivelul tensiunilor și deformațiilor din material introduse de acești parametri geometrici. Suplimentar s-au realizat studii prin simulare numerică pentru un număr de patru piese, în scopul determinării mărimii forțelor tehnologice.

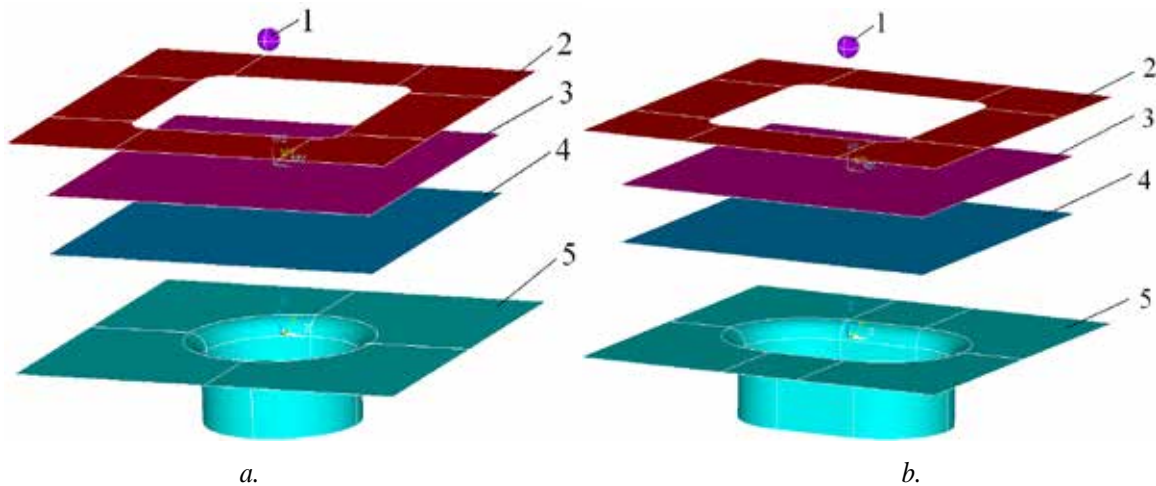


Fig. 3.12. Modelul sistemului de prelucrare prin ambutisare incrementală

Tabel 3.1.

Dimensiunile semifabricatului	$L_{sf} \times l_{sf}$	[mm]	120 × 120		
Grosimea inițială a tablei de oțel DC04	$g_{DC04}$	[mm]	0.6		
Grosimea inițială a tablei de aluminiu AA6016	$g_{AA6016}$	[mm]	0.8		
Raza plăcii active	$R_{pl}$	[mm]	6		
Diametrul poansonului	$D_p$	[mm]	6	8	10

Pentru studiul forțelor discretizarea s-a făcut cu 240 de elemente (comparativ cu modelul necesar pentru studiul deformațiilor unde discretizarea s-a făcut cu 60 de elemente) și s-au utilizat forțe de reținere cu valori cuprinse între 120-200 kN.

Datorită timpilor mari de rulare a analizei, de aproximativ 500 ore pentru piese realizate prin utilizarea de traiectorii simple de prelucrare, s-a renunțat la realizarea de simulări numerice pentru piesele care necesită traiectorii complexe de prelucrare. Realizarea unor astfel de simulări a fost practic imposibilă datorită atât timpilor de rulare cât și puterii de calcul necesare.

În urma simulărilor s-a constatat că starea de deformații din zona aflată sub poansonul sferic este una de întindere biaxială, după cum o confirmă și analiza numerică.

Rezultatele simulării numerice, pentru cele trei tipuri de piese propuse spre analiză, au urmărit în principal valorile deformațiilor specifice și subțierea relativă a materialului.

Modelul sistemului de deformare necesită o reprezentare tridimensională. Reprezentarea geometrică al sistemului a fost prezentată în figura 3.12 din care se observă că elementele componente ale sistemului au fost toate modelate pentru a reprezenta cât mai fidel sistemul real.

Astfel, semifabricatul este modelat printr-un corp geometric, având în secțiune orizontală o formă pătrată, fiecare dintre cele patru laturi ale pătratului fiind împărțite în 60 de diviziuni.

Semifabricatul, discretizat ca un corp solid deformabil, este compus din două materiale având fiecare inițial 3600 de elemente de tip membrană subțire (Thin Shell 163). Tipul de element asociat are patru noduri având 12 grade de libertate în fiecare nod și care poate fi utilizat doar în analize de tip explicit cum este cea de față. Gradele de libertate asociate fiecărui nod sunt reprezentate de:

- § deplasările nodale;
- § rotirile globale;
- § vitezele nodale;
- § accelerațiile nodale.

Pentru determinarea coordonatelor, deplasărilor și rotirilor sunt folosite interpolări biliniare. Deformațiile specifice sunt calculate din câmpul deplasărilor, iar curbura din câmpul rotirilor. Deformațiile specifice transversale sunt calculate la mijlocul laturilor și sunt interpolate în punctele de integrare. În analiza prezentată aici au fost folosite șapte puncte de integrare pe grosimea elementului.

Datorită modului de conectare al elementelor, în rețea se află un semifabricat care pentru fiecare dintre cele două materiale care îl compun are un număr de 3600 de elemente conectate prin 3604 noduri și de 43248 grade de libertate.

În cazul analizei numerice pentru determinarea forțelor s-a utilizat un semifabricat la care, pentru fiecare dintre cele două materiale care îl compun s-au folosit un număr de 57600 de elemente conectate prin 57604 noduri și de 691248 grade de libertate.

Majoritatea preprocesoarelor care însoțesc pachetele software permit modelarea corpurilor rigide (nedeformabile) analitic sau discret. În cazul de față elementele active sunt descrise și ele discret și nu analitic. Astfel, placa activă este generată dintr-un număr de 768 de elemente, respectiv 816 noduri având grosimea egală cu grosimea semifabricatului. Poansonul a fost generat sub forma unei suprafețe sferice, poziționată în contact cu semifabricatul, urmând ca prin deplasarea lui relativă față de acesta din urmă să se stabilească contactul pe o suprafață de contact extinsă. Poansonul conține un număr de 215 elemente, respectiv 217 noduri. Placa de reținere este compusă din 191 de elemente conectate prin intermediul a 239 de noduri.

Asupra nodurilor semifabricatelor aflate pe circumferință nu au fost impuse condiții de frontieră care să anuleze gradele de libertate, acest lucru fiind realizat cu ajutorul plăcii de reținere și a forței de reținere. Nu sunt prescrise în mod explicit nici alte condiții de frontieră, de tipul deplasărilor nodale impuse sau al încărcărilor cu forțe în noduri, acestea se realizează pe parcursul rulării programului ca urmare a impunerii condițiilor de non-penetrare a nodurilor semifabricatului discretizat.

Între placa de reținere și stratul de aluminiu din componența semifabricatului coeficientul de frecare este  $m = 0.0125$ , iar între stratul de oțel și placa activă coeficientul de frecare are valoarea de 0.075, coeficientul de frecare la contactul dintre poanson și stratul de aluminiu fiind  $m = 0.075$ . Datorită faptului că cele două table sunt fixate prin intermediul forței de reținere s-a introdus un coeficient de frecare  $m = 0.125$ .

Au fost realizate cinci „part-uri”, care definesc placa activă, poansonul, inelul de reținere și semifabricatul bimetalic compus din cele două materiale oțel și aluminiu. Un „part” reprezintă denumirea generică folosită pentru a defini ansamblul format din geometria, rețeaua de elemente finite, real constantele și materialele pentru fiecare din elementele sistemului de deformare. Pentru „part-ul” care definește placa activă s-au anulat toate gradele de libertate: trei translații și trei rotații.

Pentru poanson au fost anulate toate rotațiile după direcțiile X, Y și Z fiind permise doar translațiile pe direcțiile axelor X, Y (în planul tablei) și Z (perpendiculară pe planul tablei). „Part-ul” asociat inelului de reținere are anulate toate rotațiile, și translațiile după direcțiile X și Y. Pentru toate „part-urile” care definesc corpuri rigide a fost necesară introducerea datelor care definesc doar comportarea elastică a acestora și anume modulul de elasticitate longitudinal,  $E = 210 \text{ GPa}$  și coeficientul de contracție transversală,  $\nu = 0.3$ .

Tipul de material asociat elementelor semifabricatului este elasto-plastic. Condiția de curgere considerată este Hill, legea de curgere fiind dată de legea lui Swift și de modul de ecrisare anizotropică definit de Barlat. Modulul de elasticitate pentru oțel este  $E_{\text{DC04}} = 84.9 \text{ GPa}$ , iar coeficientul de contracție transversal,  $\nu_{\text{DC04}} = 0.28$ . Coeficientul de rezistență plastică,  $K_{\text{DC04}} = 522 \text{ MPa}$ , coeficientul de ecrisare,  $n_{\text{DC04}} = 0.211$  și deformația specifică la care apar primele deformații plastice este  $\epsilon_0 = 0.002 \text{ mm/mm}$ . Pentru aliajul de aluminiu, modulul de elasticitate considerat este  $E_{\text{AA6016}} = 61 \text{ GPa}$ , iar coeficientul de contracție transversal,  $\nu_{\text{AA6016}} = 0.34$ . Coeficientul de rezistență plastică,  $K_{\text{AA6016}} = 480 \text{ MPa}$ , coeficientul de ecrisare,  $n_{\text{AA6016}} = 0.260$  și deformația specifică la care apar primele deformații plastice este  $\epsilon_0 = 0.002 \text{ mm/mm}$ .

Legea de curgere este reprezentată de relația:

$$s = 561 \times (0.002 + \epsilon)^{0.224}. \quad (3.9)$$

Coeficienții de anizotropie determinați experimental (în paragraful 4.2.2.) pentru oțel sunt  $R_{0\text{DC04}} = 1.38$ ,  $R_{45\text{DC04}} = 0.863$  și  $R_{90\text{DC04}} = 1.686$ , iar pentru aliajul de aluminiu  $R_{0\text{AA6016}} = 0.748$ ,  $R_{45\text{AA6016}} = 0.43$  și  $R_{90\text{AA6016}} = 1.099$ .

Toate datele de material introduse au fost determinate experimental, în laboratoarele Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice al Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, metodologia de lucru și rezultatele experimentale fiind prezentate în capitolul dedicat cercetărilor experimentale.

Contactul dintre poanson și semifabricat a fost idealizat prin folosirea unui coeficient de frecare static,  $m = 0.075$ . Toleranța de contact a fost aleasă de  $0.01 \text{ mm}$  și distribuită egal în jurul suprafeței exterioare a semifabricatului. Forța de desprindere a nodurilor în contact a fost considerată ca având valoarea de  $10^{-12} \text{ kN}$ , deci practic cea mai mică forță de tragere duce la ruperea contactului. Acest fapt este necesar datorită schimbărilor foarte frecvente de contact care apar în tipul acestui tip de analiză.

Pentru soluționarea sistemului de ecuații neliniare se folosește metoda Newton-Raphson. Rularea programului se face cu alocarea unui spațiu  $2 \text{ GB}$  din memoria internă pe un procesor cu două nuclee.

### 3.2.3. Rezultatele simulării numerice

Cercetările experimentale preliminare au relevat faptul că pentru prelucrarea pieselor din semifabricate bimetalice prin procedeul de ambutisare incrementală este necesar ca, contactul dintre poanson și semifabricat să aibă loc pe stratul de aluminiu al tablei bimetalice. Orientarea semifabricatului astfel încât contactul să aibă loc pe stratul de oțel a condus în mod repetat la fisurarea pieselor prelucrate (a unuia sau a ambelor straturi).

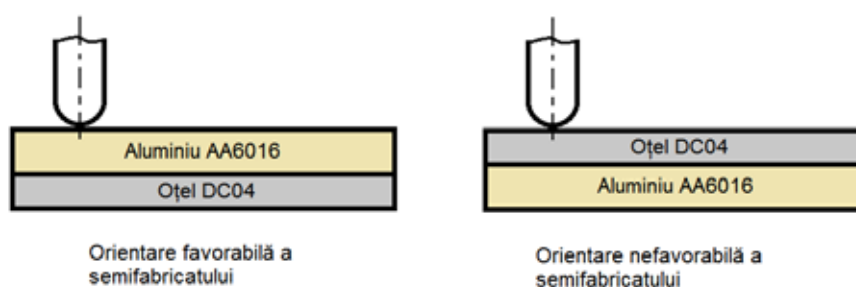


Fig. 3.13. Orientarea semifabricatului bimetalic în raport cu poansonul

Analiza prin simulare numerică a urmărit determinarea deformațiilor semifabricatului. Modelul semifabricatului utilizat în simulare a ținut cont de natura bimetalică a acestuia, dar rezultatele trebuie analizate individual pentru cele două straturi.

În acest paragraf sunt prezentate rezultatele analizei prin simulare numerică ce descriu comportarea aluminiului din componența semifabricatului bimetalic, rezultatele privind comportarea oțelului fiind prezentate în capitolul dedicat cercetărilor experimentale.

Au fost realizate simulări prin metoda elementului finit pentru piesele a căror formă a fost generată prin deplasarea poansonului pe diverse traiectorii. Problema care a intervenit a constat în definirea deplasării poansonului pe aceste traiectorii și în programul de simulare. Pentru rezolvarea acestei probleme au fost extrase coordonatele pe cele trei axe ale punctelor de pe traiectorie, din programul cu comandă numerică, și adaptate pentru a putea fi utilizate în programul ANSYS. Fiecare punct achiziționat de pe traiectorie trebuie să fie corelat exact cu incrementul de timp al simulării și cu forța de reținere a tablei bimetalice. Pentru un control exact al acestor date de intrare a fost realizată o bază de date cu coordonatele fiecărui punct de pe traiectorie.

#### 3.2.3.1. Rezultatele simulării – piese de tip trunchi de con

Modelul sistemului de prelucrare a fost prezentat în paragraful 3.2.2. Trebuie menționat că pentru realizarea pieselor de tip trunchi de con s-a utilizat o placă activă rotundă și au fost alternate poansoane cu diametre de 6 respectiv 8 mm.

Pentru piesele de tip trunchi de con au fost realizate simulări numerice pentru următoarele variante:

- piese de tip trunchi de con cu unghi de  $45^\circ$  prelucrate cu poanson cu diametru de 6 mm;
- piese de tip trunchi de con cu unghi de  $45^\circ$  prelucrate cu poanson cu diametru de 10 mm;
- piese de tip trunchi de con cu unghi de  $55^\circ$  prelucrate cu poanson cu diametru de 6 mm;
- piese de tip trunchi de con cu unghi de  $55^\circ$  prelucrate cu poanson cu diametru de 10 mm.



Toate piesele de tip trunchi de con au fost realizate utilizând traiectorii complexe compuse din curbe de nivel formate dintr-o spirală arhimedică completată cu un cerc, decalate pe axa Z.

Așa cum s-a precizat mai sus, în acest paragraf vor fi prezentate rezultatele obținute prin simulare, privind comportarea stratului de aluminiu al semifabricatului bimetalic. În cazul oțelului, rezultatele simulării vor fi comparate cu cele experimentale și prezentate în paragraful 4.5, în scopul validării modelului propus în cadrul simulării.

Mărimile caracteristice obținute în urma simulării numerice sunt următoarele:

- Subțierea maximă relativă:  $S_{\max}$  %;
- Deformația principală maximă:  $\varepsilon_1$  %;
- Deformația secundară maximă:  $\varepsilon_2$  %;
- Deformația echivalentă maximă Von Mises:  $\varepsilon_{VM}$  %.

Codificarea pieselor s-a făcut utilizând un șir alfanumeric de tipul **2507**  
**\_TC\_10\_55\_SAC\_240**, unde:

2507 – numărul programului CNC pentru prelucrarea piesei (formatul este impus de echipamentul de comandă numerică al mașinii);

TC – forma piesei finite (TC-trunchi de con, E-emisferă, PC-piesă complexă);

10 – diametrul poansonului utilizat în prelucrare;

55 – unghiul trunchiului de con;

SAC – tipul traiectoriei (în acest caz spirală arhimedică – SA, completată de un cerc – C);

240 – viteza de avans pe traiectorie a poansonului, în mm/min.

În continuare sunt prezentate rezultatele variațiilor subțierii relative maxime obținute prin simularea numerică a procedurii de deformare incrementală a tablelor bimetalice a pieselor de formă trunchi de con (fig. 3.14).

Din analiza figurii 3.14 se poate observa faptul că subțierile relative au o distribuție uniformă pe suprafața semifabricatului supus deformării.

Deformațiile cu valori maxime sunt localizate pe pereții laterali ai trunchiului de con, corespunzând traiectoriei poansonului de-a lungul spiralei arhimedice. Subțierea minimă apare la baza trunchiului de con.

Cazurile cele mai dezavantajoase sunt reprezentate de trunchiurile de con cu unghi de 55°. Acest lucru rezultă din analiza valorilor subțierii relative, care pentru aceste piese au valori mai ridicate decât în cazul pieselor realizate la un unghi de 45°.

Subțierea relativă maximă, cu valoare de 50.29 %, apare în cazul piesei de tip trunchi de con cu unghi de 55°, realizată cu un poanson cu diametrul de 10 mm. Piesa similară, realizată tot cu poanson de 10 mm, dar cu unghi de 45°, prezintă o reducere a valorii subțierii relative cu aproximativ 11%. Dacă se analizează piesele din figura 3.14.b și d, realizate cu poansoane de 6 mm, se observă că pentru unghiul de 55° valoarea subțierii relative este cu aproximativ 11% mai mare decât în cazul piesei realizate cu același poanson, dar la un unghi de 55°.

În figura 3.15.a-d sunt prezentate deformațiile principale maxime. Distribuția deformațiilor principale are aceeași mod de variație ca și în cazul subțierilor relative, și anume poziționarea valorilor de maxim este de-a lungul traiectoriei de deplasare a poansonului pe

spirala arhimedică. Valoarea minimă a deformației apare pe porțiunea plană de la baza trunchiului de con.

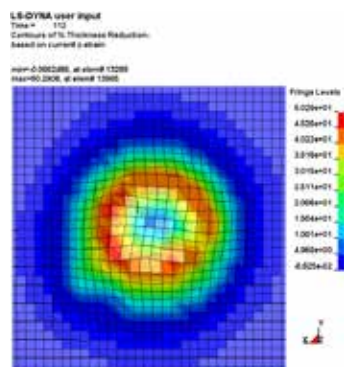
Deformațiile secundare la piesele de tip trunchi de con sunt evidențiate în figura 3.16.a-d. Aici poate fi observată, datorită apariției unei valori maxime locale, zona de început a traiectoriei de pătrundere a poansonului în material, corespunzătoare începutului spiralei arhimedice.

Variația deformațiilor echivalente Von Mises este prezentată în figura 3.17.a-d, iar distribuția acestora respectă modul de comportare descris în cazul subțierilor relative.

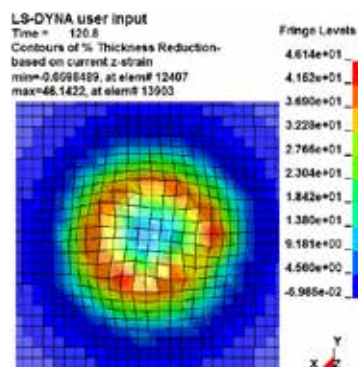
O sinteză a valorilor și evoluției mărimilor determinate prin analiza numerică este prezentată în tabelul 3.2.

Tabelul 3.2.

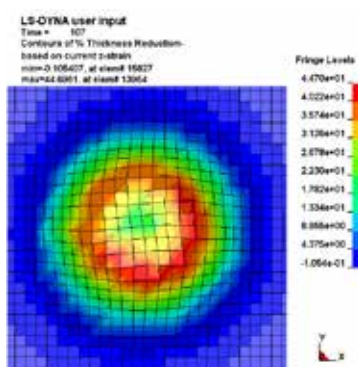
Piesă			Mărimi caracteristice			
			Deformația principală maximă	Deformația secundară maximă	Deformația echivalentă maximă Von Mises	Subțierea relativă maximă
			$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_{VM}$	$S_{max}$
			%	%	%	%
Nr. piesă	Cod piesă	Material	Sim.	Sim.	Sim.	Sim.
1.	2507_TC_10_55_SAC_240	Al	73.93	28.98	93.18	50.29
2.	2508_TC_6_55_SAC_240	Al	70.68	34.82	88.42	46.14
3.	2517_TC_10_45_SAC_240	Al	58.29	26.88	77.94	44.70
4.	2518_TC_6_45_SAC_240	Al	59.20	28.75	75.38	43.02



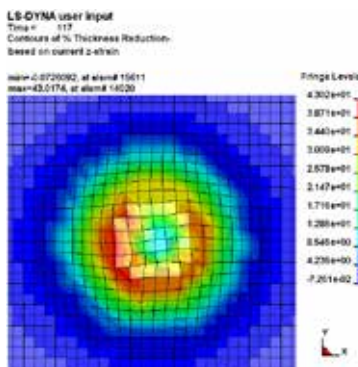
a. 2507\_TC\_10\_55\_SAC\_240



b. 2508\_TC\_55\_6\_SAC\_240



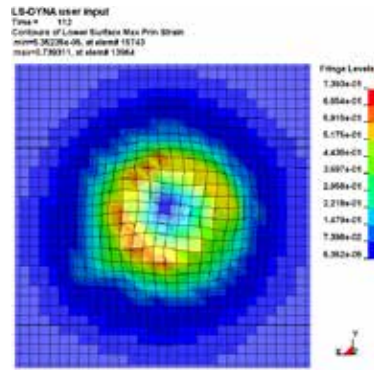
c. 2517\_TC\_45\_10\_SAC\_240



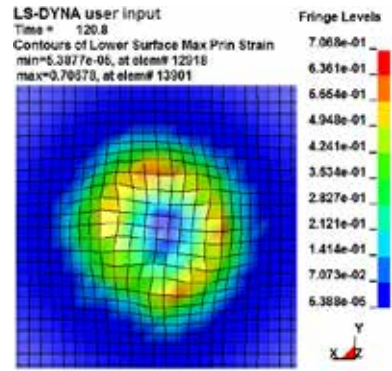
d. 2518\_TC\_45\_6\_SAC\_240

Fig. 3.14. Subțierea relativă

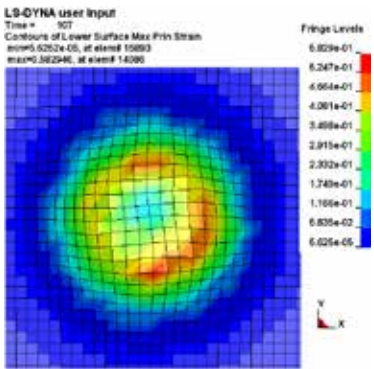




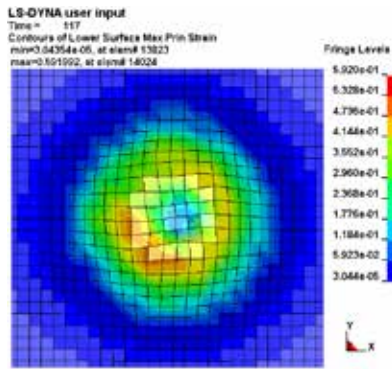
a. 2507\_TC\_10\_55\_SAC\_240



b. 2508\_TC\_55\_6\_SAC\_240

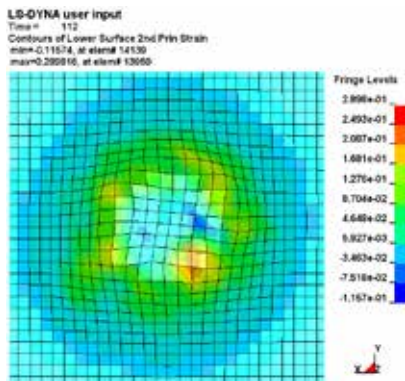


c. 2517\_TC\_45\_10\_SAC\_240

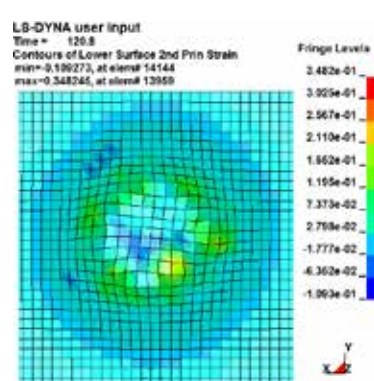


d. 2518\_TC\_45\_6\_SAC\_240

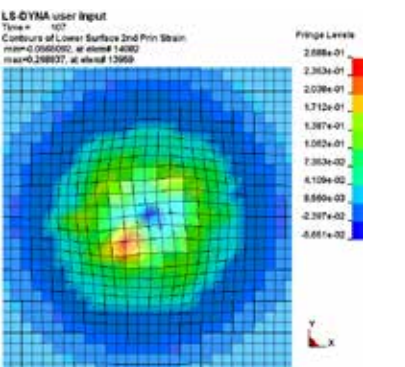
Fig. 3.15. Deformația principală



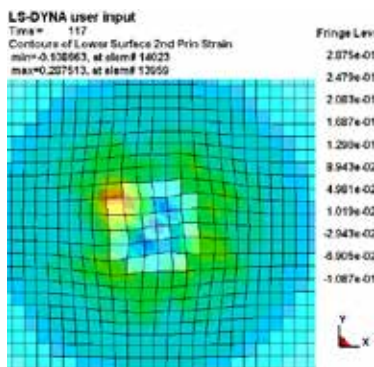
a. 2507\_TC\_10\_55\_SAC\_240



b. 2508\_TC\_55\_6\_SAC\_240



c. 2517\_TC\_45\_10\_SAC\_240



d. 2518\_TC\_45\_6\_SAC\_240

Fig. 3.16. Deformația secundară

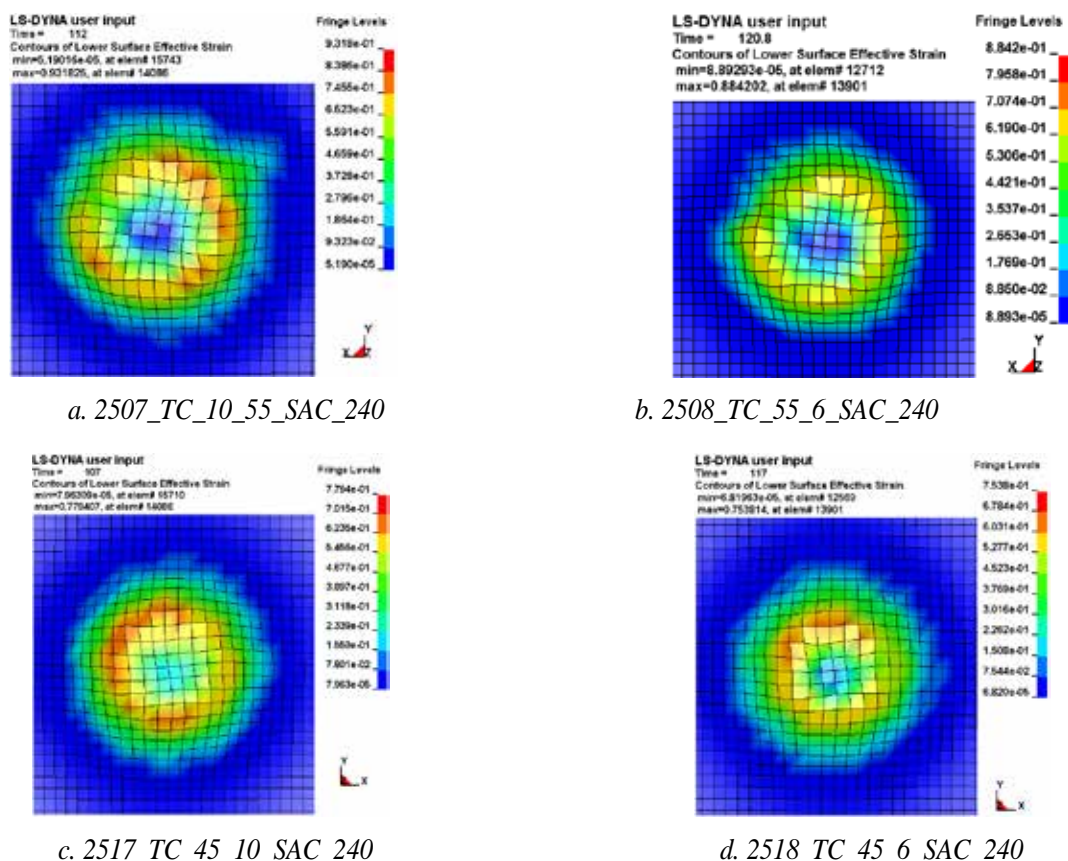


Fig. 3.17. Deformația echivalentă Von Mises

### 3.4. Concluzii

În prima parte a acestui capitol au fost prezentate principalele metode de determinare a caracteristicilor materialelor, mai exact de determinare a caracteristicilor intrinseci ale acestora prin încercarea la tracțiune. De asemenea, a fost prezentată și metodologia de determinare a curbelor limită de deformare. În continuare, au fost enunțate o serie de principii teoretice, care stau la baza procesului de simulare a procedurii de ambutisare a tablelor bimetalice. A fost, de asemenea, prezentată metoda de analiză folosită în cadrul simulărilor numerice, precum și modelul sistemului de prelucrare prin ambutisare incrementală a tablelor bimetalice, utilizat pentru studiul prin simulare. În cadrul aceluiași paragraf, au fost prezentate și rezultatele analizei prin simulare numerică ce descriu comportarea stratului de aliaj de aluminiu din componența semifabricatului bimetalic utilizat în cadrul cercetărilor.

Deoarece în cadrul cercetărilor desfășurate pe parcursul elaborării acestei lucrări au fost utilizate sisteme de achiziții de date asistate de calculator, în continuare au fost sintetizate principalele aspecte teoretice și practice legate de acestea. Astfel, au fost evidențiate funcțiile instrumentației virtuale și principalele tipuri de semnale vehiculate în sistemele de achiziții de date. A fost prezentat sistemul de achiziție a datelor experimentale utilizat în cadrul cercetărilor experimentale, precum și principalele etapele ale procesului de achiziție. Achiziția datelor experimentale a cuprins, într-o primă fază, stabilirea naturii și tipului semnalului achiziționat, analiza spectrală și filtrarea acestuia. Următoarea etapă a fost reprezentată de etalonarea mesei dinamometrice, iar în final a fost prezentată structura diagramei de achiziție, realizată cu ajutorul pachetului software Matlab & Simulink.

## IV. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND AMBUTISAREA INCREMENTALĂ A TABLELOR BIMETALICE

### 4.1. Materiale utilizate

Pentru realizarea cercetărilor experimentale s-au utilizat table bimetalice (fig. 4.1) compuse prin suprapunerea a două tipuri de materiale:

- tablă de oțel de ambutisare tip DC04 grosime 0.4 mm și 0.6 mm;
- tablă de aluminiu tip AA6016 grosime 0.8 mm.

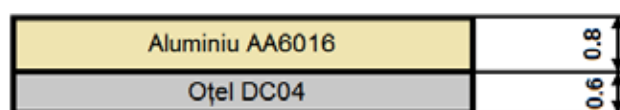


Fig.4.1. Semifabricatul bimetalic utilizat

### 4.3. Procedeele de ambutisare incrementală a tablelor bimetalice utilizate pentru desfășurarea cercetărilor

#### 4.3.1. Procedeele tehnologice utilizate pentru deformarea incrementală a tablelor bimetalice

Următoarea parte a cercetărilor experimentale a fost orientată spre studiul procedeei de ambutisare incrementală a tablelor bimetalice. Ambutisarea constituie unul dintre cele mai răspândite procedee de fabricație, prin deformare plastică, a pieselor cu forme complexe în industria aeronautică și de autovehicule.

Fabricarea pieselor prin procedeele de ambutisare clasice este eficientă pentru producția de masă a componentelor din table metalice și necesită parcurgerea unor etape legate de elaborarea procesului tehnologic de matrițare a piesei și de proiectare propriu-zisă a matriței.

Cu toate acestea, din cauza costurilor mari și a valorii foarte ridicate a timpilor de prelucrare, procedeul nu este economic pentru loturile mici de producție sau pentru realizarea pieselor unicate.

Din acest motiv în cadrul lucrării au fost abordate cercetări privind ambutisarea incrementală, în încercarea de a reduce costurile ridicate aferente realizării matrițelor destinate procesului de ambutisare clasică.

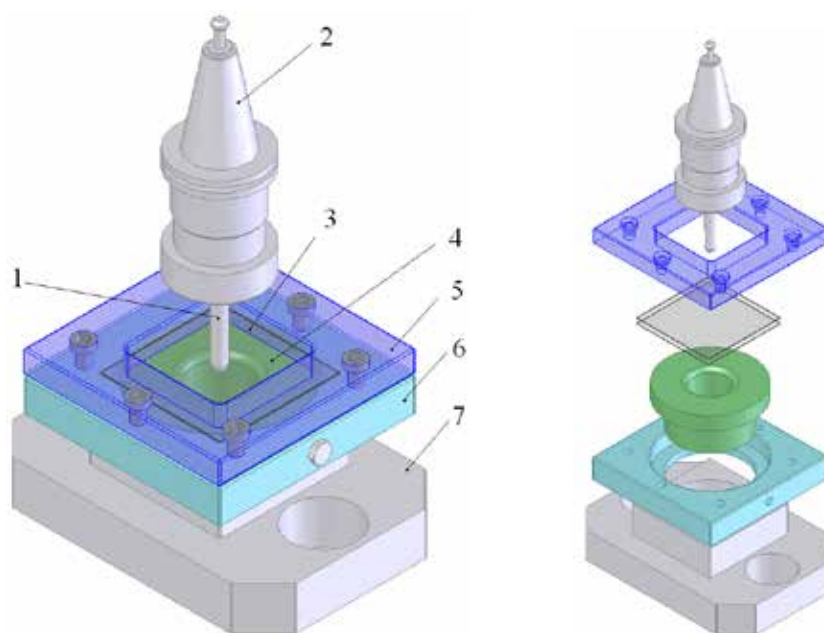
Ambutisarea incrementală permite utilizarea unor matrițe simplificate, pe care se pot obține un număr mare de tipuri-dimensiuni de piese, spre deosebire de procedeul clasic, unde o matriță este destinată realizării unui singur tip de piesă.

Din acest motiv, s-a optat pentru folosirea unei matrițe de deformare cu un set de plăci active interschimbabile, care, utilizată în procedeul de ambutisare incrementală a tablelor

bimetalice, permite o cercetare amănunțită a comportării acestora la deformare, prin realizarea mai multor tipuri-dimensiuni de piese.

Matrița utilizată în procedeul de ambutisare incrementală este prezentată în figura 4.11 fiind compusă din:

- |                      |                       |                   |
|----------------------|-----------------------|-------------------|
| 1. poanson;          | 4. placă activă;      | 7. placă de bază. |
| 2. port-poanson;     | 5. placă de reținere; |                   |
| 3. tablă bimetalică; | 6. placă port-activă; |                   |



*Fig. 4.11. Matrița de ambutisare utilizată în procedeul de deformare incrementală*

Semifabricatul 1 este fixat rigid între placa activă și placa de reținere, cu ajutorul a șase șuruburi. Plăcile active utilizate sunt prezentate în figura 4.12.

În vederea obținerii unor traiectorii de prelucrare cât mai diverse, și implicit a unor piese cu forme complexe, plăcile active sunt interschimbabile și au diferite forme la interior: circulară (fig. 4.12.a) și ovală (fig. 4.12.b), fiecare dintre ele fiind executate cu rază de racordare de 6 mm.



*Fig. 4.12. Plăcile active utilizate*

Poansoanele utilizate în procedeul de deformare sunt, de asemenea, ușor de înlocuit datorită port-sucei cu bușă elastică utilizată pentru montarea poansonului pe mașină. Poansoanele utilizate au formă emisferică la vârf, cu raze de 6, 8 și 10 mm.



Portscula și cele trei poansoane utilizate sunt prezentate în figura 4.13.



*Fig. 4.13. Portscula și poansoanele utilizate*

Poansoanele și plăcile active de ambutisare sunt executate dintr-un oțel aliat 20Cr115 SR EN ISO 4957:2002 căruia i s-a aplicat un tratament termic de îmbunătățire.

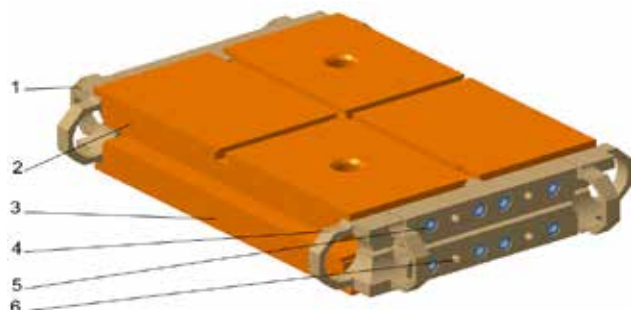
Cercetările experimentale privind ambutisarea incrementală a tablelor bimetalice au urmărit realizarea unor piese cu forme complexe, în condiții de precizie dimensională ridicată. Din acest motiv, ca și echipament tehnologic utilizat pentru cercetările experimentale s-a optat pentru centrul de prelucrare prin frezare cu comandă numerică Haas MiniMill, existent în laboratoarele Departamentului de mașini și echipamente industriale a Facultății de Inginerie din Sibiu, prezentat în figura 4.14.



*Fig. 4.14. Centrul de prelucrare prin frezare CNC Haas MiniMill*

Pentru măsurarea forțelor rezistente tehnologice după cele trei direcții (X, Y, Z) în timpul prelucrării s-a utilizat o masă dinamometrică (fig. 4.15.a), montată pe masa mașinii (fig. 4.15.b), care este constituită din două plăci: inferioară 3 și superioară 2 între care sunt montate cele două elemente elastice 1 și 4. Centrarea și fixarea lor se realizează cu ajutorul

știfturilor de centrare și a șuruburilor. Placa de bază dispune de pene pentru centrarea pe masa mașinii, iar placa superioară de canale în formă de T, pentru centrarea și fixarea matriței utilizate în cadrul încercărilor experimentale.



*a. model 3D*



*b. montarea pe masa mașinii*

*Fig. 4.15. Masa dinamometrică*

### **4.3.2. Tipurile de piese realizate**

Cercetările experimentale au fost realizate pe o tablă bimetalică obținută prin suprapunerea unei table de oțel DC04 cu grosime  $g = 0.6$  mm și a unei table de aluminiu AA6016 cu grosime  $g = 0.8$  mm. Caracteristicile mecanice oferite de producător au fost descrise detaliat în paragraful 4.1. Semifabricatul astfel obținut va fi tratat în continuare ca ansamblu unitar și denumit tablă bimetalică.

Comportarea tablei bimetalice cu această componentă nu a fost tratată în literatura de specialitate, motiv pentru care a fost necesară realizarea unui studiu detaliat pentru determinarea comportării la deformare plastică în condițiile respectării caracteristicilor de calitate a suprafeței și a asigurării preciziei de formă a piesei finite.

În scopul determinării comportării la deformare a tablei bimetalice au fost analizați o serie de parametri reprezentativi în procesul de ambutisare incrementală. Acești parametri au fost variați în scopul determinării modului în care influențează procesul de ambutisare.

Prin procedeul de ambutisare au fost realizate piese cu flanșă, de diferite forme, prin variația unor parametri, cum ar fi:

#### **1. Parametrii tipo-dimensionali ai piesei finite:**

##### **1.1. Forma piesei finite**

- trunchi de con;
- emisferă;
- piesă de formă complexă.

##### **1.2. Unghiul de înclinare al trunchiului de con**

- unghi de  $45^\circ$ ;
- unghi de  $55^\circ$ .

#### **2. Parametrii legați de geometria și dimensiunile elementelor active:**

##### **2.1. Forma plăcii active pe care s-a prelucrat piesa**

- placă activă de formă rotundă;

- placă activă de formă ovală.

**2.2. Dimensiunile poansonului**

- diametru de 6 mm;
- diametru de 8 mm;
- diametru de 10 mm.

3. Parametrii legați de procedeul de prelucrare:

**3.1. Viteza de avans a poansonului pe traiectorie**

- $v_{av} = 240$  mm/min;
- $v_{av} = 480$  mm/min.

**3.2. Pasul de avans pe adâncime**

- $p = 1$  mm;
- $p = 2$  mm.

4. Tipurile de traiectorii utilizate în prelucrare:

**4.1. Traiectorii simple**

**4.2. Traiectorii complexe**

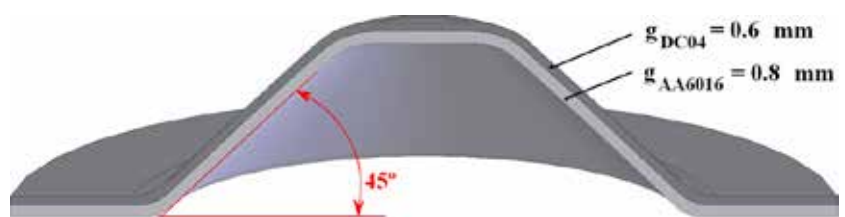
**4.3.2.1. Piese de tip trunchi de con**

Parametrii variați în timpul procesului de ambutisare sunt prezentați în tabelul 4.8.

*Tabelul 4.8.*

Forma piesei	Diametrul poansonului [mm]	Unghiul conului [°]	Viteza de avans [mm/min]	Tip traiectorie	Pas de avans pe adâncime [mm]	Rețea marcaj [mm]	Codificare piesă
Trunchi de con	6	45 °	240	Cerc	1	3	TC_6_45_C_240
	10	45 °	240	Cerc	1	3	TC_10_45_SAC_240
	6	45 °	240	Cerc	2	2	TC_6_45_C_240
	6	45 °	240	Spirală arhimedică + cerc	2	2	TC_6_45_SAC_240
	6	55 °	240	Cerc	2	2	TC_6_55_C_240
	6	55 °	240	Spirală arhimedică + cerc	2	2	TC_6_55_SAC_240
	6	55 °	480	Spirală arhimedică + cerc	2	2	TC_6_55_SA_480
	10	45 °	240	Cerc	2	2	TC_10_45_C_240
	10	45 °	240	Spirală arhimedică + cerc	2	2	TC_10_45_SAC_240
	10	55 °	240	Cerc	2	2	TC_10_55_C_240
	10	55 °	240	Spirală arhimedică + cerc	2	2	TC_10_55_SAC_240

În figura 4.20 este prezentată piesa cu formă de trunchi de con, în care se pot observa caracteristicile dimensionale ale acesteia.

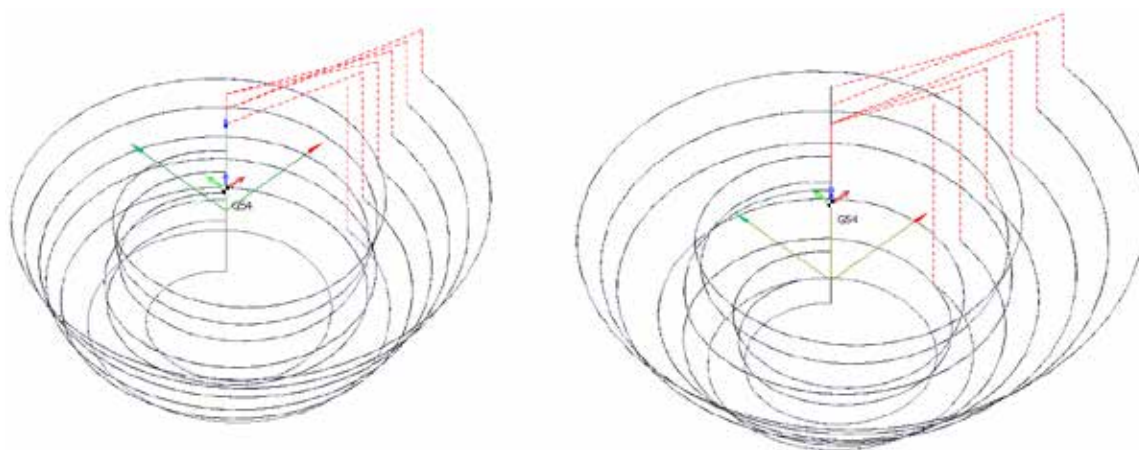


a.



b.

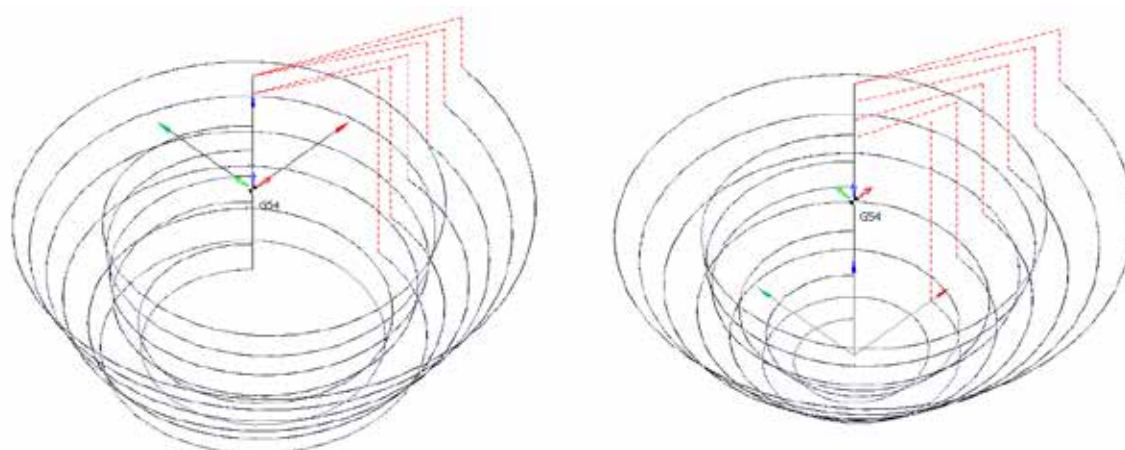
Fig. 4.20. Modelele pieselor de tip trunchi de con



a. unghi de 55°

b. unghi de 45°

Fig. 4.24. Deplasările poansonului ( $d = 6$  mm) necesare realizării trunchiurilor de con (traiectorii complexe)



a. unghi de 55°

b. unghi de 45°

Fig. 4.25. Deplasările poansonului ( $d = 10$  mm) necesare realizării trunchiurilor de con (traiectorii complexe)



#### 4.3.2.2. Piese de tip emisferă

Următoarea etapă a cercetărilor experimentale a implicat generarea prin procedeul de ambutisare incrementală a unor piese de formă emisferică (fig. 4.26).

În scopul obținerii unei abateri de formă cât mai scăzute, avansul de pătrundere a fost stabilit la o valoare de 1 mm pe Z. Emisferile au fost realizate utilizând o placă activă de formă circulară și un poanson cu diametrul de 8 mm.



Fig. 4.26. Modelul 3D al piesei de formă emisferică

Variația parametrilor s-a realizat conform tabelului 4.10.

Tabelul 4.10.

Forma piesei	Diametrul poansonului [mm]	Viteza de avans [mm/min]	Tip traiectorie	Pas de avans pe adâncime [mm]	Codificare piesă
Emisferă	8	240	Cerc	1	2402_E_8_C_240
	8	240	Spirală arhimedică + cerc	1	2401_E_8_SAC_240
	8	240	Cerc + cerc la 90°	1	2404_E_8_CC90_240

Procedeul de ambutisarea incrementală a tablelor bimetalice pentru realizarea pieselor de formă emisferică s-a realizat prin utilizarea a două tipuri de traiectorii:

**a. Traiectorii simple** care, ca și în cazul pieselor în formă de trunchi de con, au constat în cercuri distanțate pe adâncime (axa Z) cu 1 mm au fost prezentate grafic în figura 4.27.

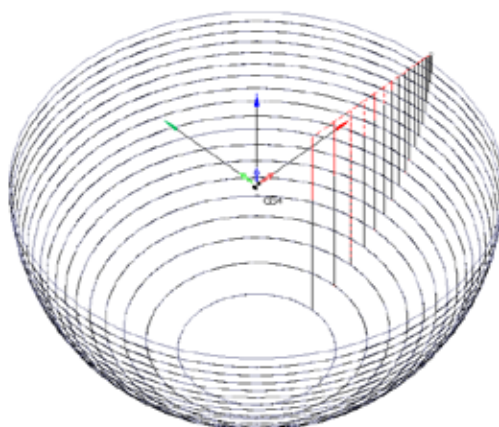


Fig. 4.27. Traiectorii circulare pentru generarea pieselor de tip emisferă

**b. Traietoriile complexe** au fost reprezentate într-o primă fază de combinația spirală arhimedică și cerc. Acest tip de traiectorie este prezentat pentru o anumită cotă Z (fig. 4.28.a), în figura 4.28.b sunt prezentate toate traiectoriile necesare generării unei piese.

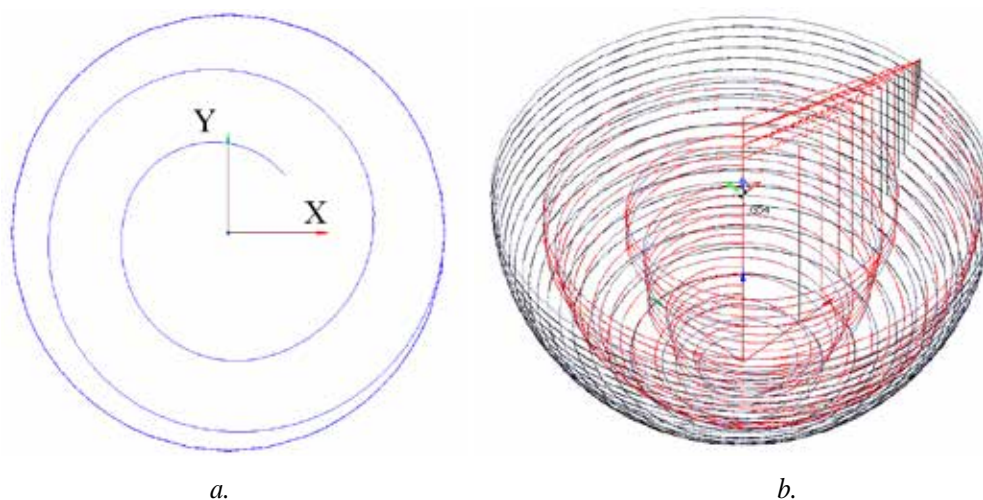


Fig. 4.28. Traietorii complexe de tip spirală arhimedică + cerc pentru generarea pieselor de formă emisferică

O altă abordare a realizării emisferei presupune generarea formei acesteia printr-o prelucrare prin ambutisare incrementală în două etape de prelucrare și anume:

- **Etapa de degroșare,**
- **Etapa de finisare**

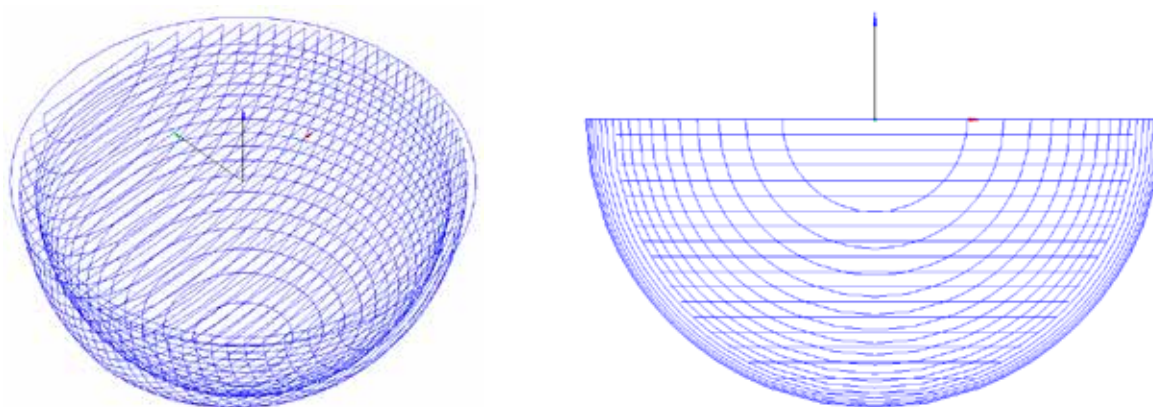


Fig. 4.29. Traietorii complexe degroșare și finisare

#### 4.3.2.3. Piese complexe

Unul dintre obiectivele cercetărilor experimentale a fost generarea prin procedeul de ambutisare incrementală a unei piese complexe, prezentată în figura 4.30. Forma piesei a fost astfel proiectată încât să alterneze suprafețele plane cu cele circulare.



Fig. 4.30. Modelul 3D în secțiune al piesei de formă complexă

Trajectoriile pentru obținerea pieselor complexe sunt prezentate în tabelul 4.12:

Tabel 4.12.

Forma piesei	Diame- trul poanso- nului [mm]	Număr treceri pentru prelucrare	Viteza de avans [mm/ min]	Etapele de prelucrare	Tip traiectorie	Pas de avans pe adân- cime [mm]	Codificare piesă
Piesă com- plexă	8	1	240	Degroșare	Curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z	2	2301_PC_8_ W_240
	8	1	240	Degroșare	Spirale arhimedice și curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z	2	2302_PC_8_ WSA_240
	8	2	240	Degroșare	Curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z	2	2701_PC_8_ WP0_240
				Finisare	Finisare plană, traiectorii la 0°		
	8	2	240	Degroșare	Curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z	2	2702_PC_8_ WP90_240
				Finisare	Finisare plană, traiectorii la 90°		
	8	2	240	Degroșare	Curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z	2	2703_PC_8_ WP45_240
				Finisare	Finisare plană, traiectorii la 45°		
	8	3	240	Degroșare	Curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z	2	2706_PC_8_ WOPTP_240
				Finisare 1	Finisare plană optimizată în două treceri		
				Finisare 2			

Problema care apare în acest caz este posibilitatea apariției de fisuri, datorită aplicării de solicitări repetate ale materialului în aceleași zone. Acest fapt a constituit una din principalele limitări întâlnite la prelucrarea acestui tip de piesă.

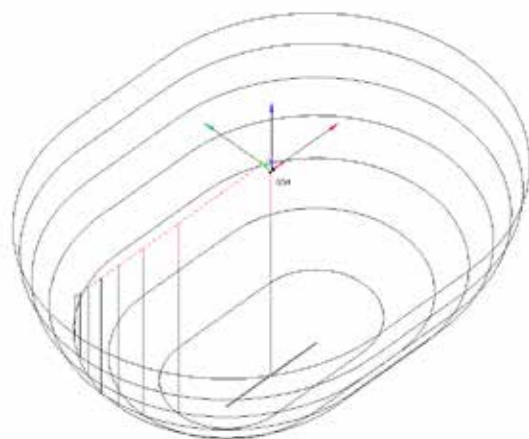
### I. Piese complexe prelucrate dintr-o singură etapă

În acest caz se disting două variante de deplasare:

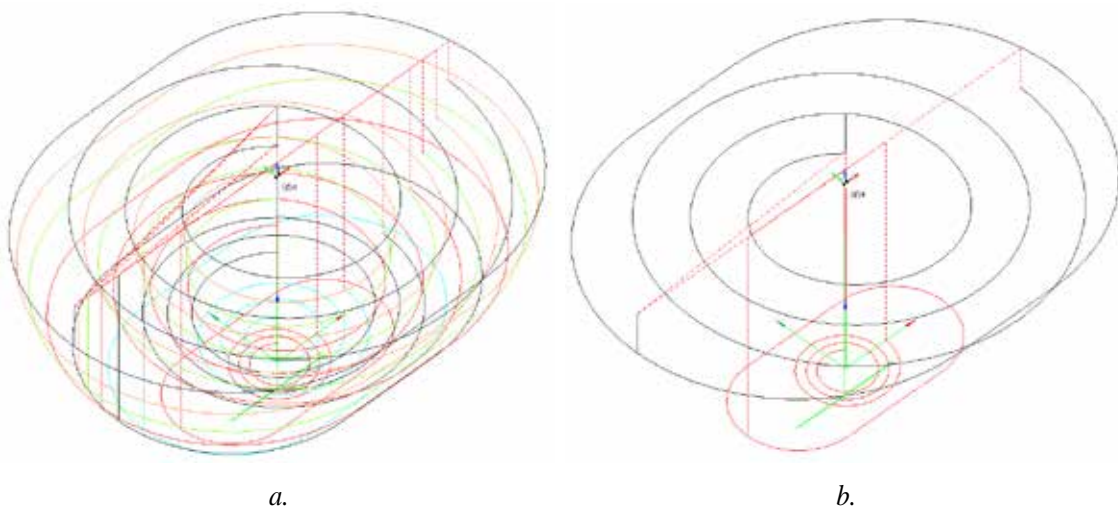
- a. curbă de nivel pe contur ce descrie conturul exterior al piesei decalată pe axa Z pentru fiecare adâncime de pătrundere a poansonului figura 4.32;

- b. traiectorie compusă din spirală arhimedică și curba de nivel pe contur decalată pe axa Z pentru fiecare adâncime de pătrundere a poansonului figura 4.33.

Pentru simplificarea, în figura 4.33.b au fost reprezentate doar două plane de lucru, și anume: planul de început al deformării de culoare neagră, iar cu culoare roșie ultimul plan în care se execută spirala și curba de nivel pe contur. Prelucrarea se încheie cu o deplasare liniară (de culoare verde în figură) într-un plan decalat pe axa Z cu încă -2 mm.



*Fig. 4.32. Curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z*



*Fig. 4.33. Traiectorii compuse din spirale arhimedice și curbe de nivel pe contur decalate pe axa Z*

## **II. Piese complexe prelucrate din două etape**

Așa după s-a amintit mai sus, problema care intervine în cazul pieselor complexe este apariția de fisuri datorate aplicării de solicitări repetate asupra materialului, în zonele de trecere de la suprafața sferică la suprafața plană. Din acest motiv, cercetările experimentale privind generarea prin ambutisare incrementală a pieselor complexe s-au axat pe optimizarea deplasării poansonului. A fost studiată astfel comportarea tablei bimetalice la deformare în condițiile unor abateri de formă cât mai scăzute, fără subțieri periculoase ale materialului.

Astfel prelucrarea piesei s-a realizat în două etape:

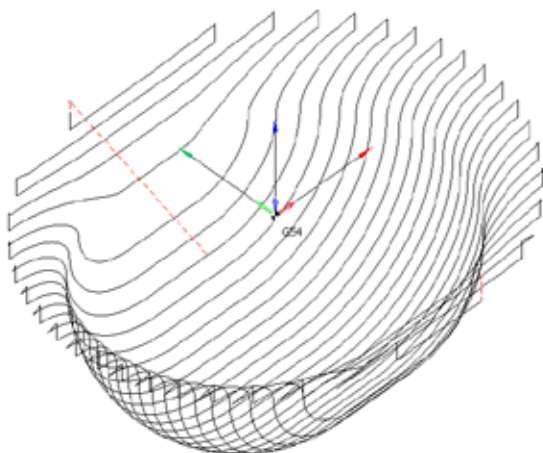
- a. degroșare, care deformează piesa la o cotă cu 2 mm mai mică decât cota finală a piesei (fig. 4.32),

b. finisare plană, care deformează piesa până la cota finală.

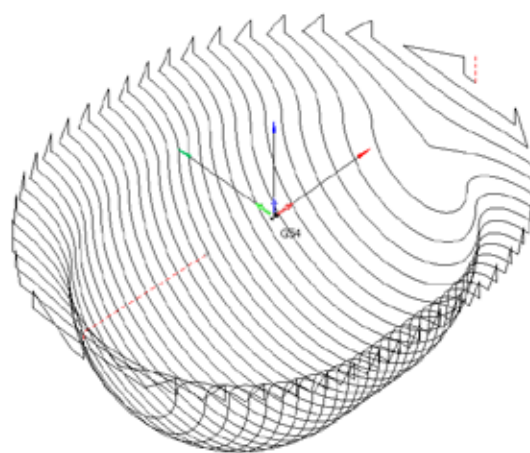
Etape de finisare plană este realizată prin două metode:

i. finisare realizată dintr-o singură fază (trecere), cu traiectorii înclinate la diferite unghiuri în raport cu axa X;

- finisare plană, traiectorii orientate la un unghi de  $0^\circ$  în raport cu axa X (fig. 4.35);
- finisare plană, traiectorii orientate la un unghi de  $90^\circ$  în raport cu axa X (fig. 4.36);

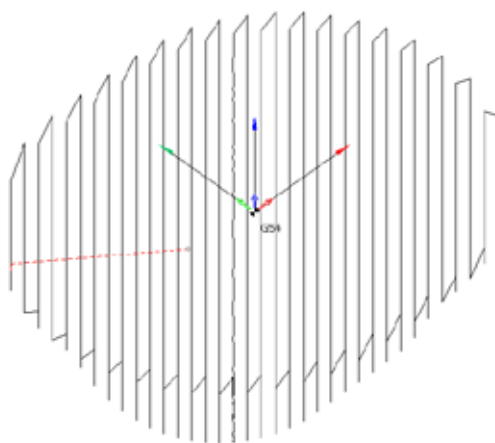


*Fig. 4.35. Finisare plană realizată dintr-o singură trecere - traiectorii orientate la  $0^\circ$*



*Fig. 4.36. Finisare plană realizată dintr-o singură trecere - traiectorii orientate la  $90^\circ$*

- finisare plană, traiectorii orientate la un unghi de  $45^\circ$  în raport cu axa X (fig. 4.37).



*Fig. 4.37. Finisare plană realizată dintr-o singură trecere - traiectorii orientate la  $45^\circ$*

Forma finală a piesei rezultă din combinarea traiectoriilor specifice celor două etape de prelucrare, degroșare, reprezentată în figură cu culoare roșie și finisare (culoare neagră), (fig. 4.38.a-c).



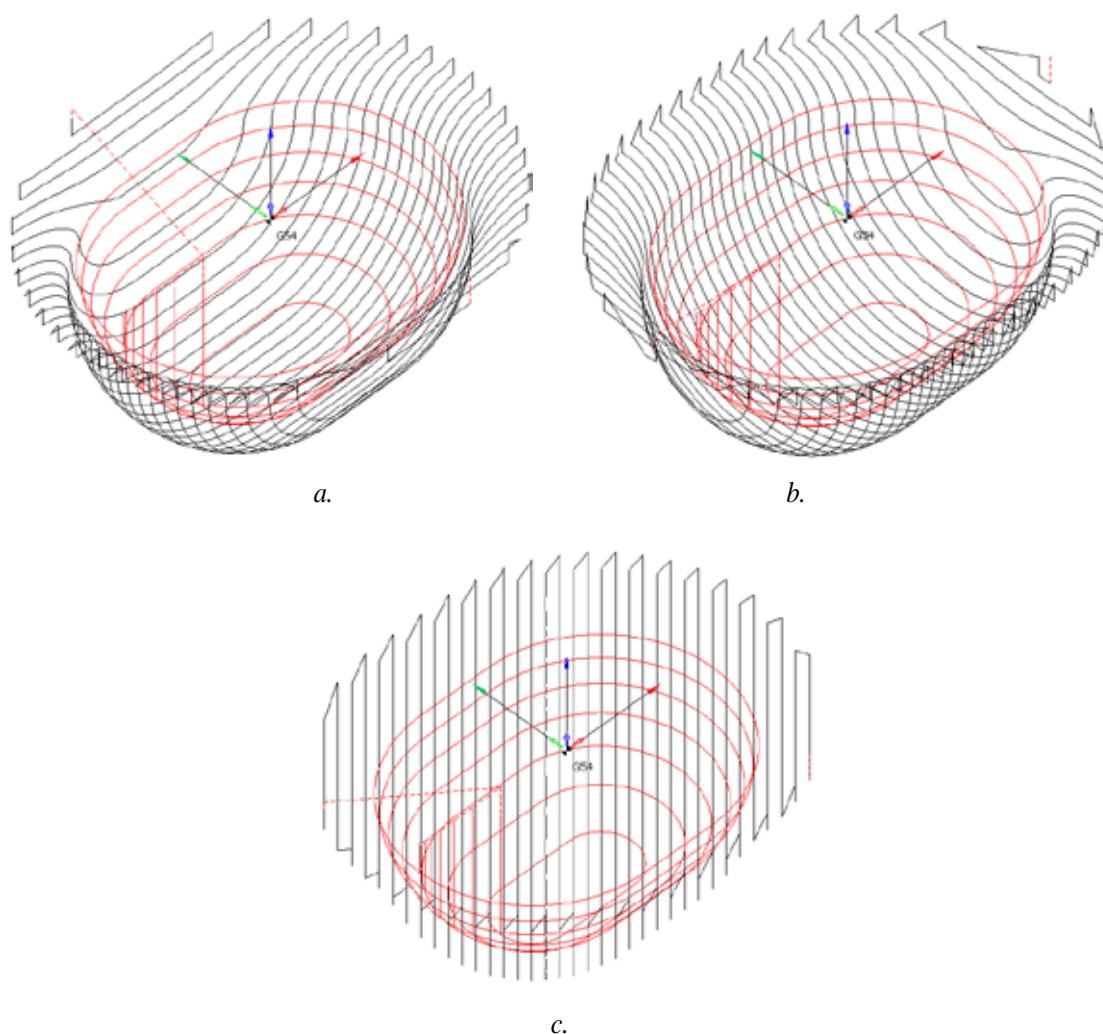


Fig. 4.38. Traiectorii de realizare piesei finale (degroșare + finisare plană dintr-o singură trecere)

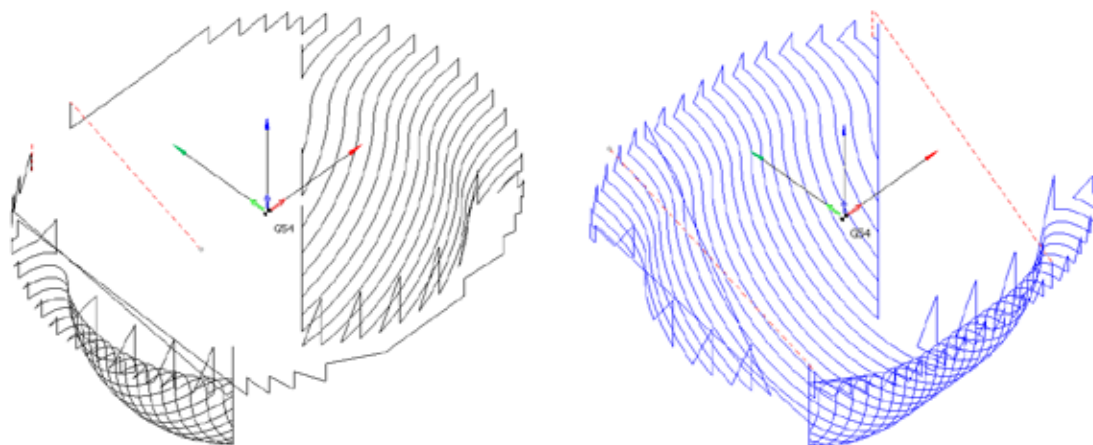
- ii. finisare realizată în două faze (treceri), cu traiectorii orientate pe direcții de deplasare distincte (fig. 4.39).

În urma măsurării deformațiilor pe piesele prelucrate s-au observat zone cu o subțiere accentuată a materialului, în special, în zonele de pătrundere a poansonului. Pentru a evita acest inconvenient, și pentru ca piesa să prezinte o subțiere uniformă a materialului, s-a modificat strategia de finisare prin utilizarea unei finisări în două treceri.

Această strategie a fost denumită finisare optimizată și a presupus divizarea prelucrării în două faze și respectiv două tipuri de traiectorii:

- o primă fază (fig. 4.39.a), în care traiectoriile sunt orientate la un unghi de  $0^\circ$  față de axa X (similare cu figura 4.35 de mai sus);
- o a doua fază (fig. 4.39.b), în care traiectoriile sunt orientate la un unghi de  $90^\circ$  față de axa X – paralel cu axa Y (similare cu figura 4.36 de mai sus).

Pentru reducerea mărimii acestei zone, unghiul de finisare pe direcția paralelă cu axa Y a fost diminuat până la obținerea unei variante optime, mai precis un unghi de  $20^\circ$  la vârf, din care se poate observa că zona de intersecție a celor două traiectorii de prelucrare prezintă acum un decalaj în raport cu raza de colț a piesei.



a. Finisarea 1 pe direcție paralelă cu axa X

b. Finisarea 2 pe direcție paralelă cu axa Y

Fig. 4.39. Deplasarea poansonului la finisare pe două direcții

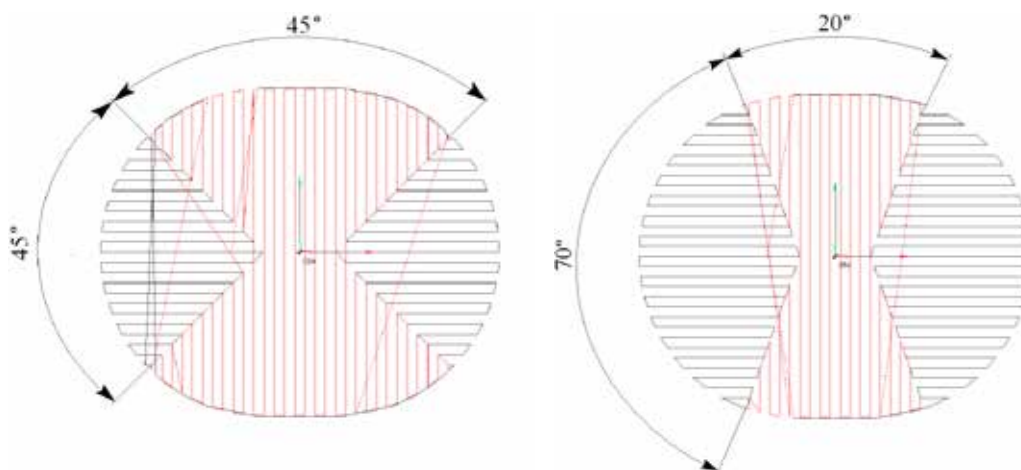


Fig. 4.40. Modificarea unghiurilor între direcțiile de deplasare a poansonului la finisare

În figura 4.41 sunt prezentate toate traiectoriile utilizate pentru obținerea pieselor complexe prin această metodă, cu trecerea de degroșare, ce realizează curbele de nivel pe contur decalate pe axa Z reprezentată cu culoare roșie, prima trecere de finisare pe direcție paralelă cu axa X (culoare neagră) și a doua trecere de finisare pe direcție paralelă cu axa Y (culoare albastră).

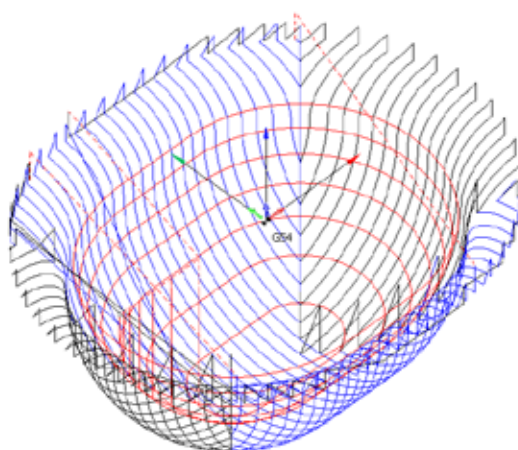


Fig. 4.41. Traiectoriile poansonului la degroșare și finisare în două faze (treceri)

## 4.4. Determinarea experimentală a deformațiilor pieselor ambutisate incremental

### 4.4.1. Măsurarea deformațiilor pieselor de tip trunchi de con

Mărimile caracteristice studiate pe baza măsurării deformațiilor pieselor sunt:

- Deformația principală maximă:  $\varepsilon_1$  %;
- Deformația secundară maximă:  $\varepsilon_2$  %;
- Deformația echivalentă maximă Von Mises:  $\varepsilon_{VM}$  %;
- Subțierea maximă relativă:  $S_{max}$  %.

Pentru fiecare din aceste mărimi au fost extrase imagini cu evoluția acestora după procedeele de ambutisare incrementală.

În cadrul cercetărilor experimentale, accentul a fost pus pe analiza capacității de deformare, prin studiul distribuției stării de deformații și a subțierii relative. Astfel, aceste mărimi caracteristice au fost analizate pentru cele mai reprezentative dintre piesele prelucrate.

#### 4.4.1.1. Piese de tip trunchi de con prelucrate prin traiectorii simple

În continuare sunt prezentate distribuțiile valorilor deformațiilor echivalente (fig. 4.48). și ale subțierii relative, precum și curbele limită de deformare raportate la deformațiile principale și secundare pentru piesele de tip de trunchi de con (fig. 4.47).

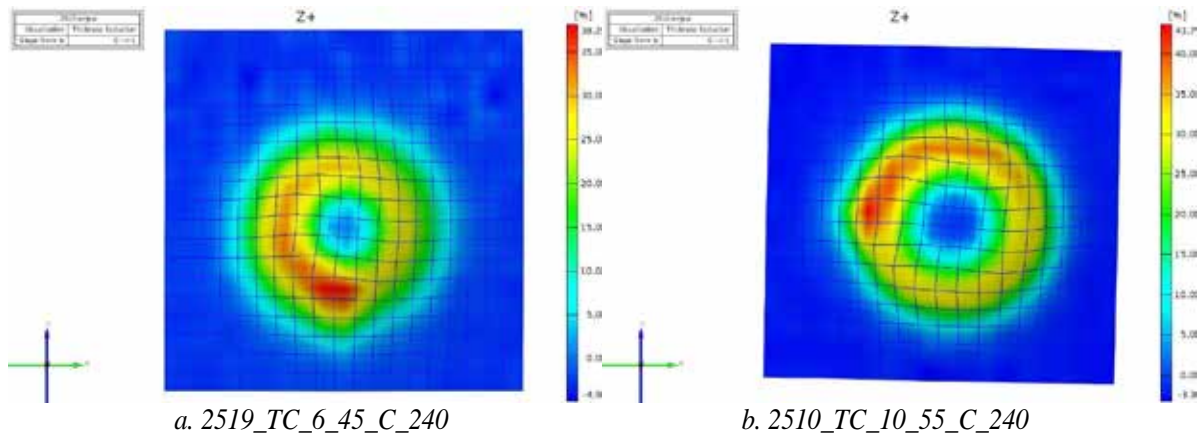


Fig. 4.47. Distribuțiile subțierii relative pe piesele trunchi de con, traiectorie circulară

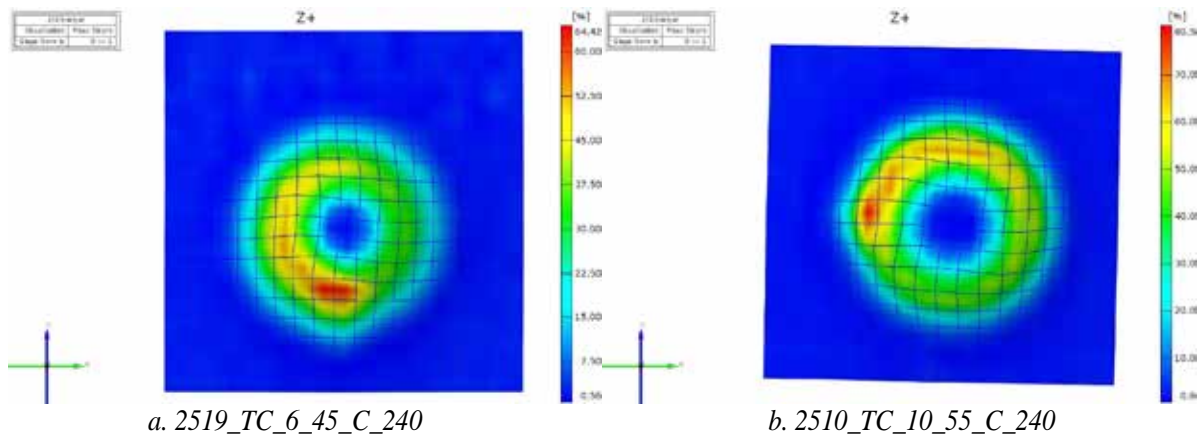


Fig. 4.48. Deformațiile echivalente Von Mises



În tabelul 4.13 sunt prezentate valorile mărimilor caracteristice pentru două dintre piesele de tip trunchi de con, cu unghiuri de 45° și 55°, prelucrate cu traiectorii simple, cu poansoane cu diametre de 6 mm, respectiv 10 mm.

Tabel 4.13.

Nr. crt.	Cod piese de tip trunchi de con	Mărimi caracteristice			
		Deformația principală maximă	Deformația secundară maximă	Deformația echivalentă maximă Von Mises	Subțierea maximă relativă
		$\epsilon_1$ %	$\epsilon_2$ %	$\epsilon_{VM}$ %	$s_{max}$ %
1.	2519_TC_6_45_C_240	42.50	16.81	64.42	38.20
2.	2510_TC_10_55_C_240	51.64	18.39	80.50	43.70

#### 4.4.1.2. Piese de tip trunchi de con prelucrate prin traiectorii complexe

În continuare sunt prezentate câteva piese de tip trunchi de con, pentru a căror realizare s-au utilizat traiectorii complexe pentru generarea formei.

În figura 4.52 sunt prezentate subțierile relative ale pieselor de tip trunchi de con realizate prin traiectorii complexe. Se observă faptul că pentru acest tip de piese distribuția subțierilor relative nu mai prezintă zone de concentrare a mărimilor caracteristice, ca în cazul pieselor de tip trunchi de con prelucrate cu traiectorii simple.

În tabelul 4.14 sunt prezentate mărimile caracteristice pentru piesele de tip trunchi de con analizate.

Tabelul 4.14.

Nr. crt.	Codificarea pieselor de tip trunchi de con	Mărimi caracteristice			
		Deformația principală maximă	Deformația secundară maximă	Deformația echivalentă maximă Von Mises	Subțierea maximă relativă
		$\epsilon_1$ %	$\epsilon_2$ %	$\epsilon_{VM}$ %	$s_{max}$ %
1.	2507_TC_10_45_SAC_240	45.30	20.90	74.27	42.10
2.	2508_TC_6_45_SAC_240	42.00	23.50	66.28	39.30
3.	2518_TC_6_45_SAC_240	41.00	24.60	74.30	42.41
4.	2508_TC_6_55_SAC_240	44.80	21.90	73.45	41.82
5.	2508_TC_6_55_SAC_480	45.10	22.70	73.47	42.02
6.	2517_TC_10_45_SAC_240	41.40	26.40	74.62	42.60
7.	2507_TC_10_55_SAC_240	63.44	35.0	94.7	42.51

Se remarcă faptul că, la acest tip de piese, localizarea deformațiilor cu valori maxime este de-a lungul spiralei arhimedice pe care s-a deplasat poansonul (fig. 4.53).

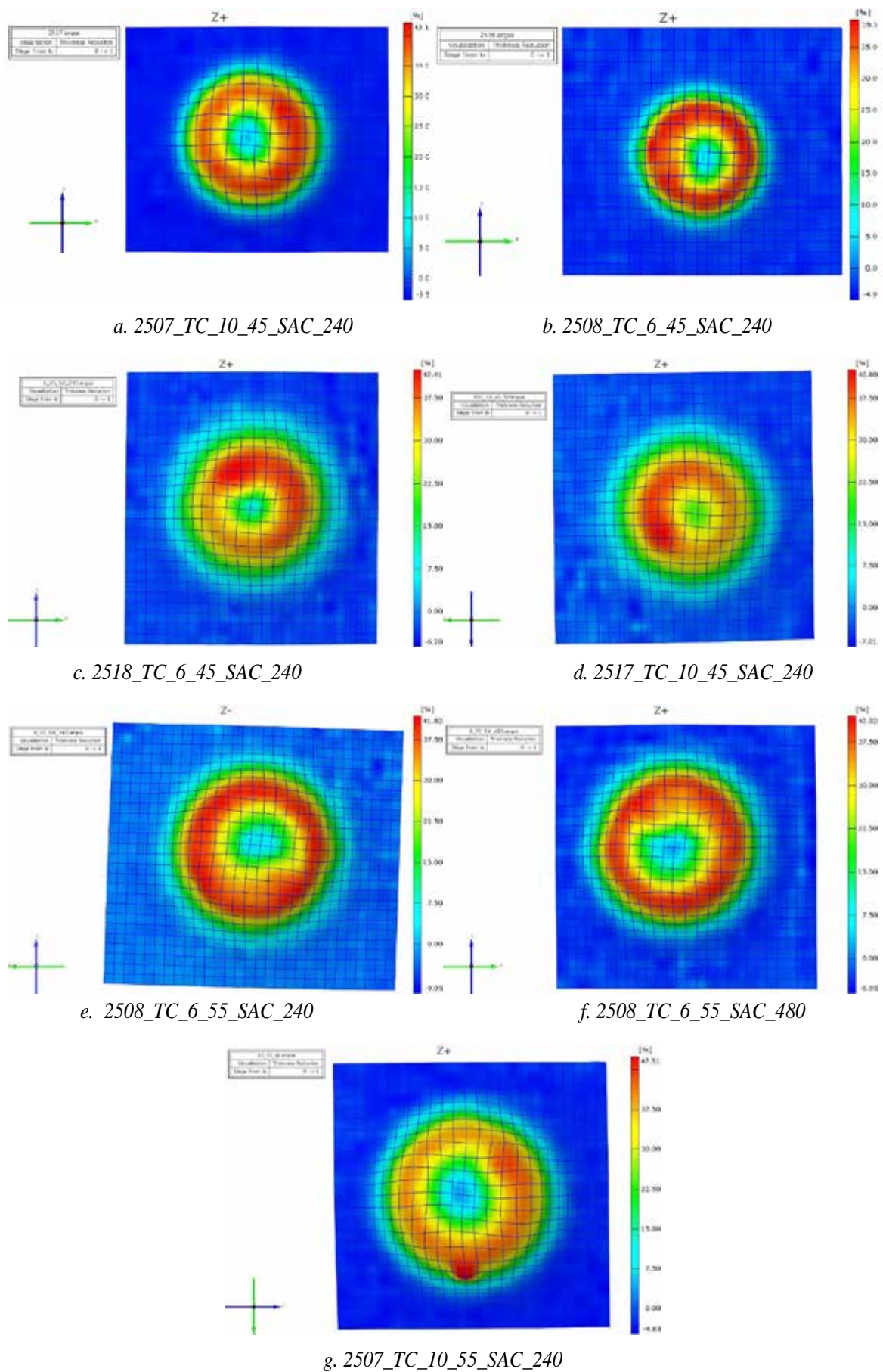
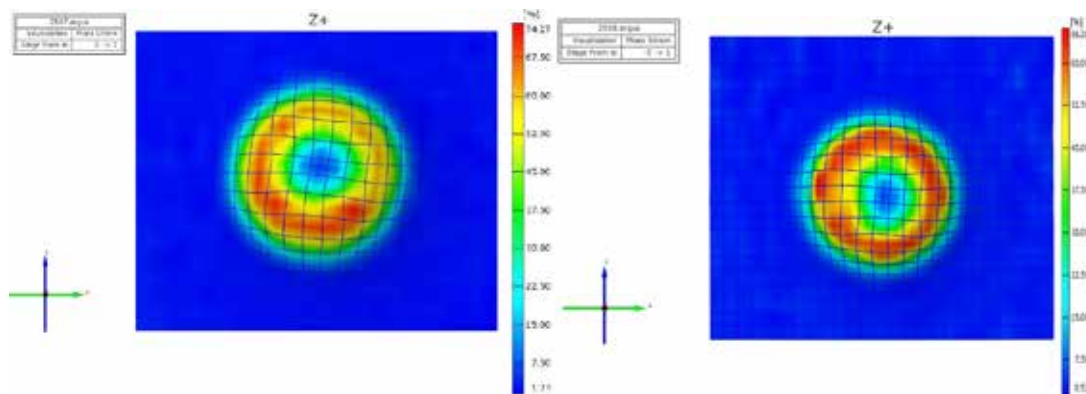
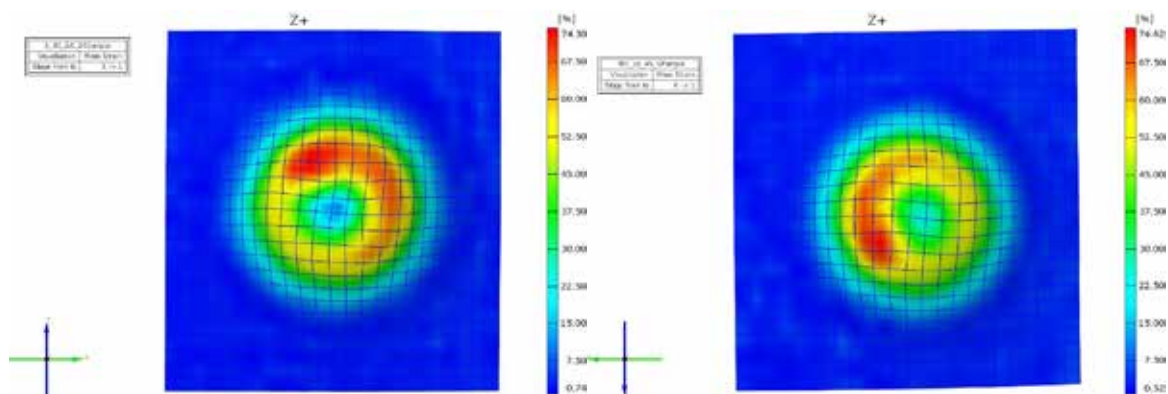


Fig. 4.52. Distribuțiile subțierii relative pe piesele trunchi de con trajectorie circulară și spirală arhimedică



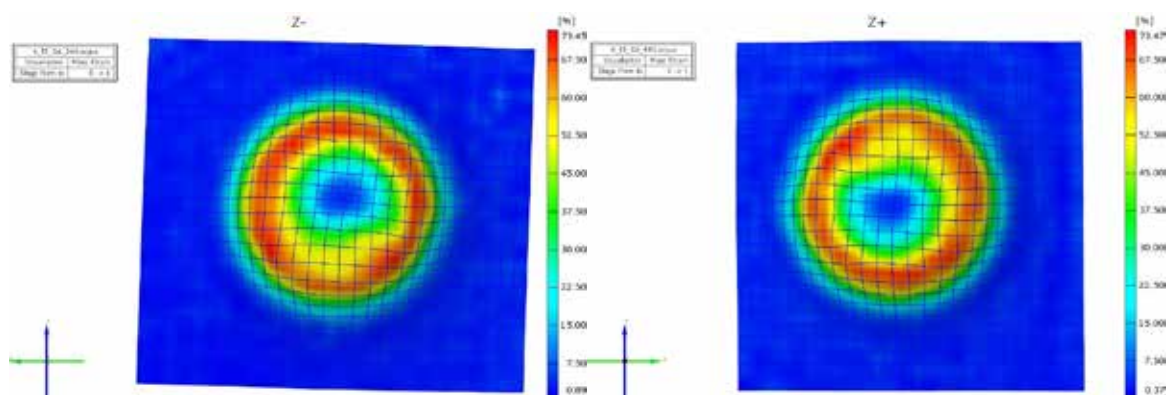
a. 2507\_TC\_10\_45\_SAC\_240

b. 2508\_TC\_6\_45\_SAC\_240



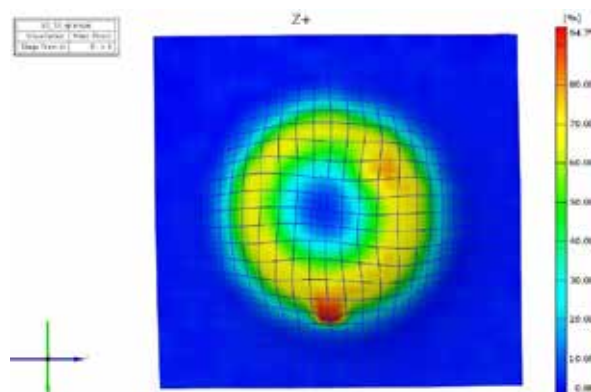
c. 2518\_TC\_6\_45\_SAC\_240

d. 2517\_TC\_10\_45\_SAC\_240



e. 2508\_TC\_6\_55\_SAC\_240

f. 2508\_TC\_6\_55\_SAC\_480



g. 2507\_TC\_10\_55\_SAC\_240

Fig. 4.53. Deformațiile echivalente Von Mises

## 4.5. Analiza comparativă a rezultatelor teoretice și experimentale

În cadrul acestui paragraf au fost analizate comparativ rezultatele experimentale cu cele obținute prin simulare numerică a procedurii de ambutisare incrementală a tablei bimetalice.

Datorită orientării semifabricatului bimetalic în timpul prelucrării (stratul de aliaj de aluminiu AA6016 în contact cu poansonul), determinarea experimentală a deformațiilor s-a făcut numai pentru stratul de oțel DC04. Plasarea la interior a aliajului de aluminiu a făcut imposibilă măsurarea deformațiilor la nivelul acestui strat. Comportarea aliajului de aluminiu AA6016 a fost studiată prin simulare numerică, rezultatele fiind prezentate în capitolul 3.

Cu ajutorul pachetului software ARGUS pot fi extrase valorile deformațiilor exprimate în trei variante: deformații convenționale, deformații reale și deformații de tip Green. În continuare, deformațiile reale, determinate experimental, au fost comparate cu deformațiile reale rezultate în urma simulării numerice.

### 4.5.1. Piese de tip trunchi de con

În tabelul 4.17 au fost introduse valorile mărimilor caracteristice obținute experimental și datele rezultate în urma analizării simulărilor numerice.

Tabel 4.17.

Nr. crt.	Codificarea pieselor de tip trunchi de con		Mărimi caracteristice							
			Deformația principală maximă		Deformația secundară maximă		Deformația echivalentă maximă Von Mises		Subțierea maximă relativă	
			$\epsilon_1$		$\epsilon_2$		$\epsilon_M$		$S_{max}$	
Cod piesă		%	log	%	log	%	log	%	log	
1.	2507_TC_10_55_SAC_240	Exp.	63.44	0.4912	35.00	0.3000	94.7	0.6664	47.51	0.6445
		Sim.	-	0.6375	-	0.2954	-	0.8231	-	0.7699
2.	2508_TC_6_55_SAC_240	Exp.	44.8	0.3700	21.9	0.1979	73.45	0.5507	41.82	0.5416
		Sim.	-	0.6353	-	0.3290	-	0.8150	-	0.6448
3.	2517_TC_10_45_SAC_240	Exp.	41.4	0.3460	26.4	0.2340	74.62	0.5574	42.6	0.5552
		Sim.	-	0.5171	-	0.2723	-	0.6901	-	0.6548
4.	2518_TC_6_45_SAC_240	Exp.	41.0	0.3430	24.6	0.2200	74.30	0.5556	42.41	0.5519
		Sim.	-	0.5439	-	0.2717	-	0.6796	-	0.6400

Datorită faptului că în paragraful 4.4.1 a fost studiată comportarea la deformare a pieselor de tip trunchi de con, prin studiul subțierilor relative și a deformațiilor Von Mises, în continuare vor fi comparate deformațiile principale maxime și deformațiile secundare maxime, obținute experimental pentru tabla de oțel DC04 și valorile obținute prin simulare (4.67-4.73).

Se remarcă faptul că, la acest tip de piese, localizarea deformațiilor principale cu valori maxime este de-a lungul spiralei arhimedice pe care se deplasează poansonul. Valoarea maximă apare în punctul inițial al spiralei arhimedice, corespunzând cu zona de intrare a poansonului în material. Ulterior aceste valori scad ușor rămânând apoi constante pe porțiunea finală a traiectoriei. Evoluția mărimilor este relativ similară în cazul deformațiilor secundare. În acest caz valoarea maximă este localizată mai precis în zona de intrare a poansonului în material.



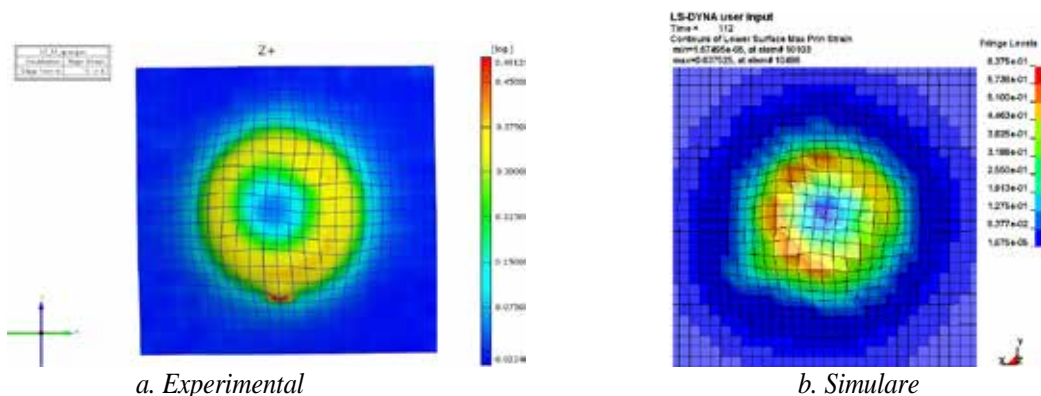


Fig. 4.66. Deformațiile principale maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2507\_TC\_10\_55\_SAC\_240

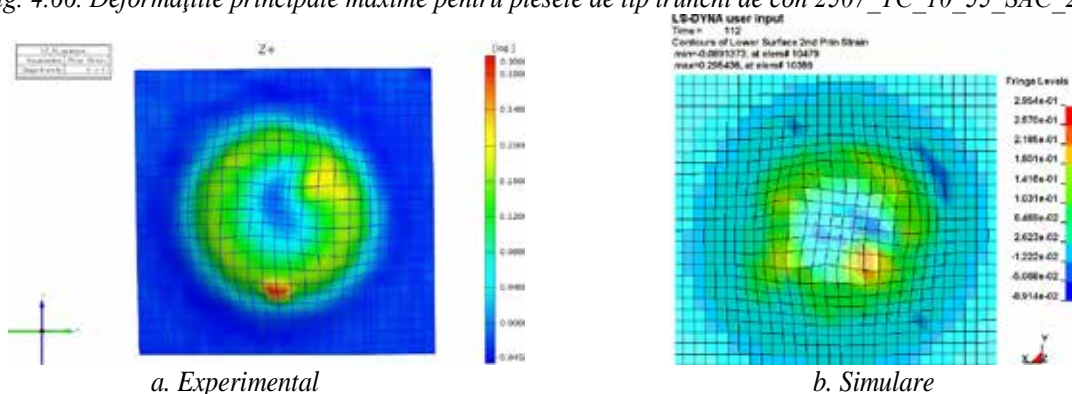


Fig. 4.67. Deformațiile secundare maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2507\_TC\_10\_55\_SAC\_240

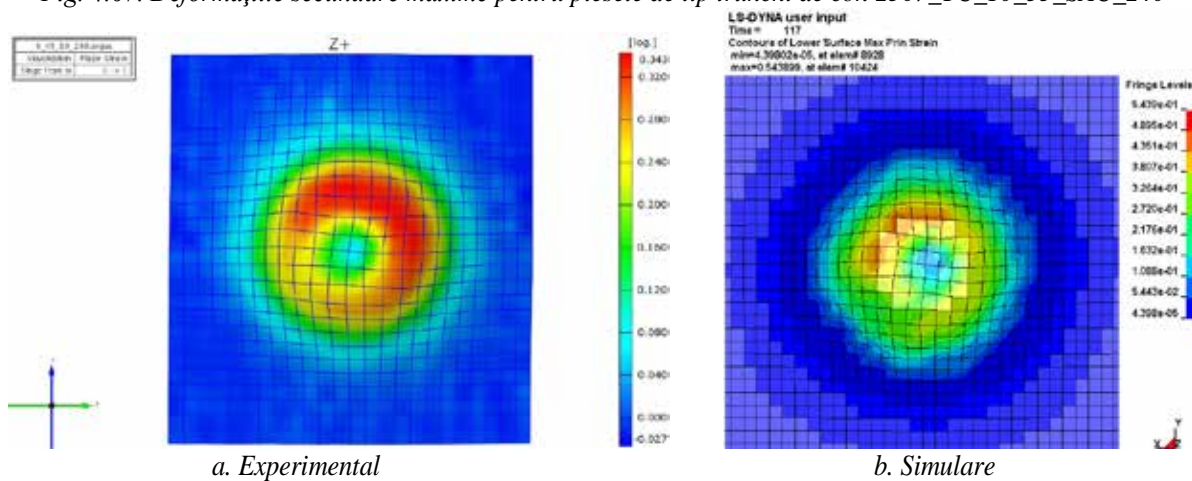


Fig. 4.68. Deformațiile principale maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2518\_TC\_6\_45\_SAC\_240

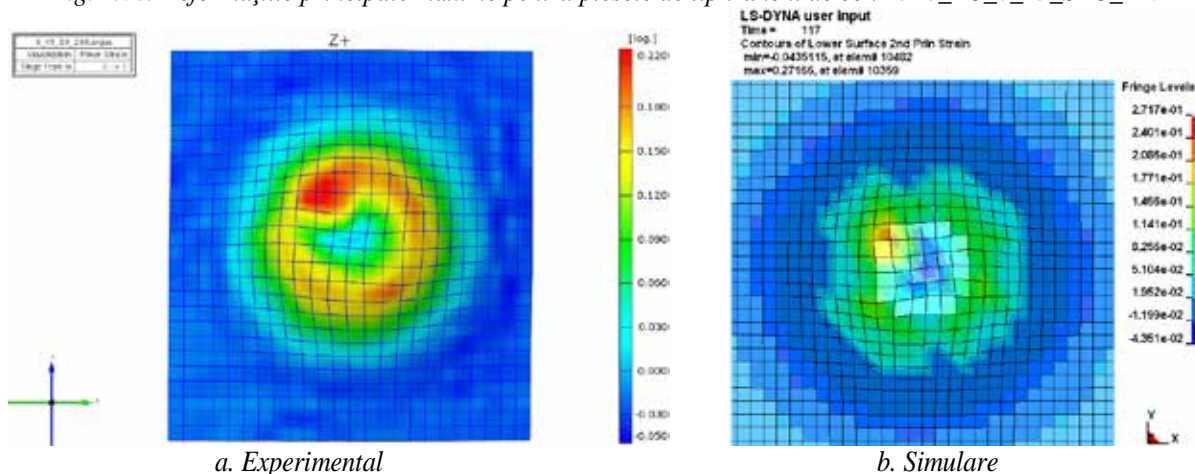
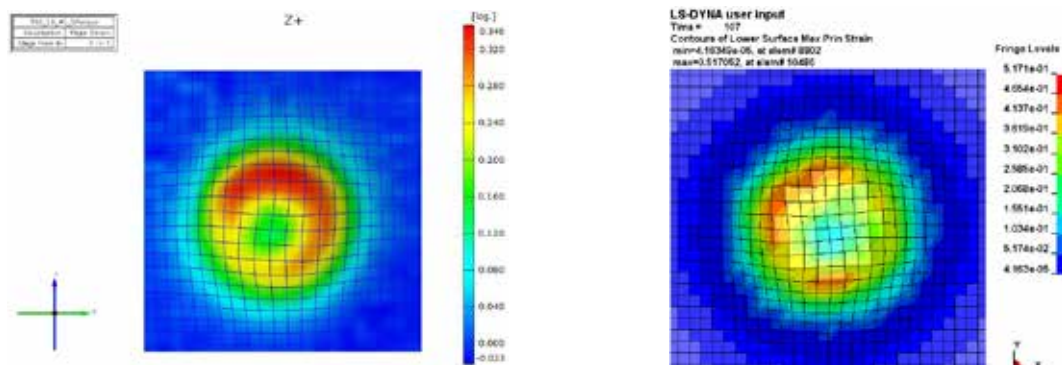


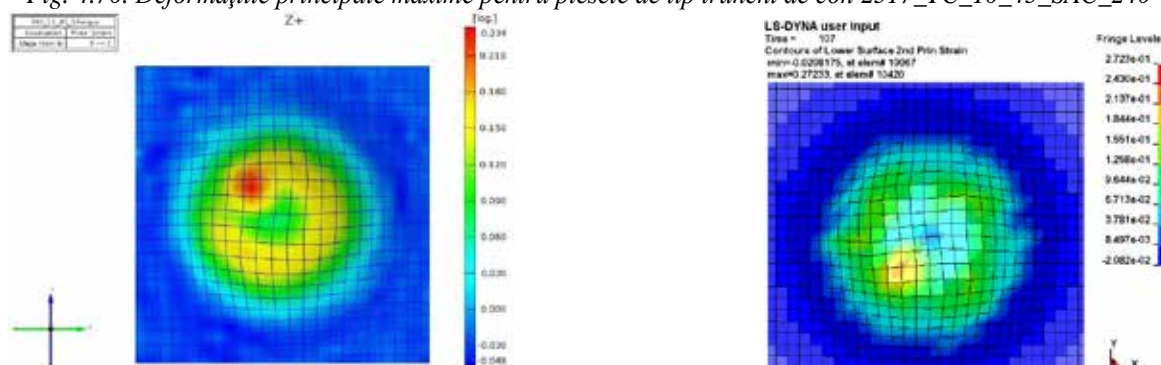
Fig. 4.69. Deformațiile secundare maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2518\_TC\_6\_45\_SAC\_240



a. Experimental

b. Simulare

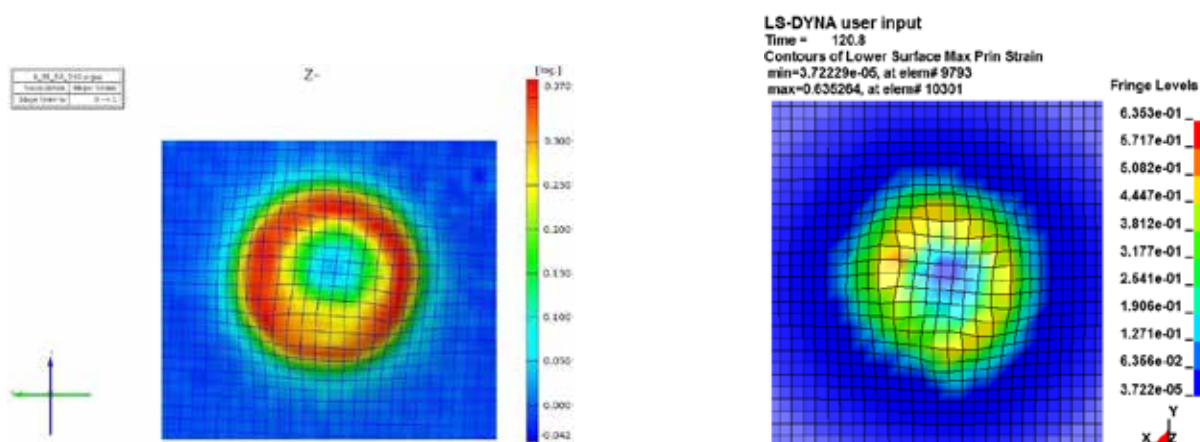
Fig. 4.70. Deformațiile principale maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2517\_TC\_10\_45\_SAC\_240



a. Experimental

b. Simulare

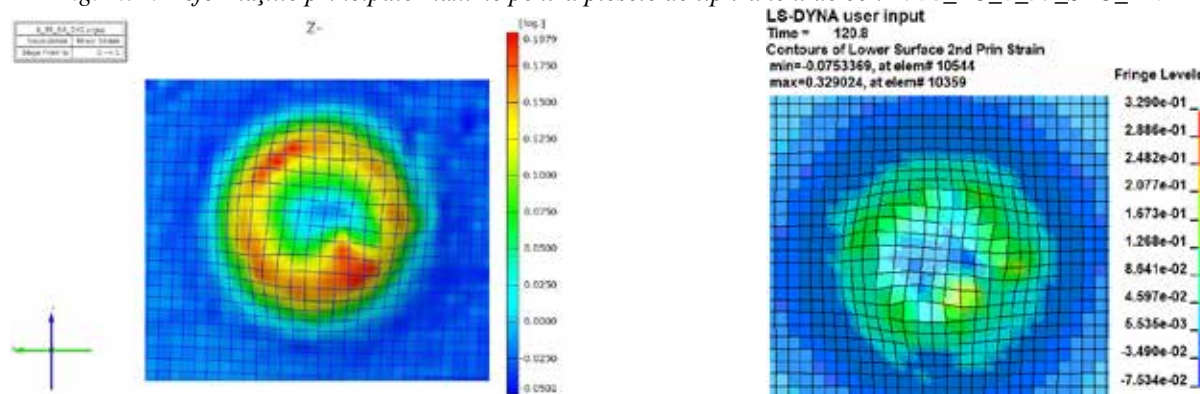
Fig. 4.71. Deformațiile secundare maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2517\_TC\_10\_45\_SAC\_240



a. Experimental

b. Simulare

Fig. 4.72. Deformațiile principale maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2508\_TC\_6\_55\_SAC\_240



a. Experimental

b. Simulare

Fig. 4.73. Deformațiile secundare maxime pentru piesele de tip trunchi de con 2508\_TC\_55\_6\_SAC\_240

## 4.6. Precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate prin procedeul de ambutisare incrementală

### 4.6.2. Precizia dimensională și de formă a pieselor de formă complexă

Măsurătorile pentru piesele de formă complexă, au fost realizate pe o mașină de măsurat în coordonate (MMC). S-a optat pentru o strategie de măsurare pe patru curbe rezultate prin intersecția suprafeței sferice cu patru plane perpendiculare pe planul XOY, orientate la 45° unul față de celălalt.

Au fost măsurate piesele a căror formă a fost generată prin una din următoarele variante ale procedeului de prelucrare:

*I. Prelucrare dintr-o sigură etapă, traiectorii de tip curbe de nivel pe contur, în plane paralele cu planul XOY, decalate pe axa Z;*

- I.a. Curbă de nivel ce descrie conturul exterior al piesei decalată pe Z pentru fiecare adâncime de pătrundere a poansonului;
- I.b. Curbă de nivel compusă din spirală arhimedică și contur exterior piesă repetate pentru fiecare adâncime de pătrundere pe axa Z;

*II. Prelucrare din două etape, o etapă (trecere) de degroșare pe curbe de nivel paralele cu planul XOY și decalate între ele pe axa Z și o etapă de finisare plană realizată în patru variante:*

- II a. Finisare plană pe traiectorii orientate la 0° față de axa X;
- II.b. Finisare plană pe traiectorii orientate la 45° față de axa X;
- II.c. Finisare plană pe traiectorii orientate la 90° față de axa X;
- II.d. Finisare plană optimizată.

Conceptele de finisare plană și finisare plană optimizată, precum și traiectoriile aferente celor două strategii de finisare au fost descrise în paragraful 4.3.1.3.

Cele șase curbe rezultate pe fiecare tip de piesă, din cele patru realizate utilizând strategiile de prelucrare în două treceri sunt prezentate în figura 4.83.a-f.

Pentru fiecare din cele șase piese prezentate în figura 4.83 au fost palpate și salvate coordonatele a 857 de puncte.

Pentru obținerea de informații asupra preciziei de formă și dimensionale au fost extrase și analizate, pentru fiecare tip de piesă și variantă a procedeului de generare, câte patru curbe, obținute în secțiuni transversale orientate la 0°, 45°, 90°, 135° față de axa X.

Ca și în cazul pieselor de tip emisferă, curbele analizate au rezultat prin unirea prin segmente a punctelor achiziționate prin măsurarea cu ajutorul MMC, deci informațiile obținute în acest caz au un grad de exactitate foarte ridicat.



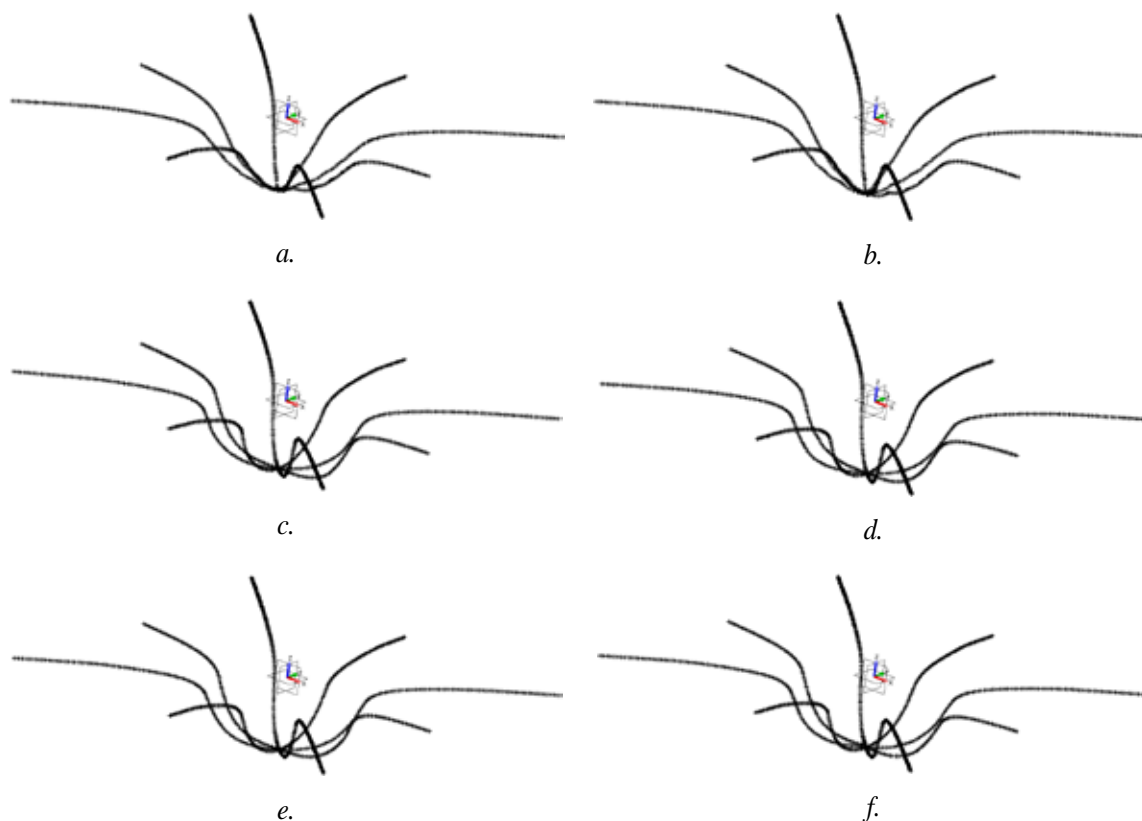


Fig. 4.83. Puncte de palpăre pe curbe, obținute la măsurarea pe MMC a pieselor de formă complexă realizate prin prelucrarea prin: a. curbe de nivel pe contur; b. spirală arhimedică și curbe de nivel pe contur; c. degroșare + finisare plană la  $0^\circ$ ; d. degroșare + finisare plană la  $45^\circ$ ; e. degroșare + finisare plană la  $90^\circ$ ; d. degroșare + finisare plană optimizată.

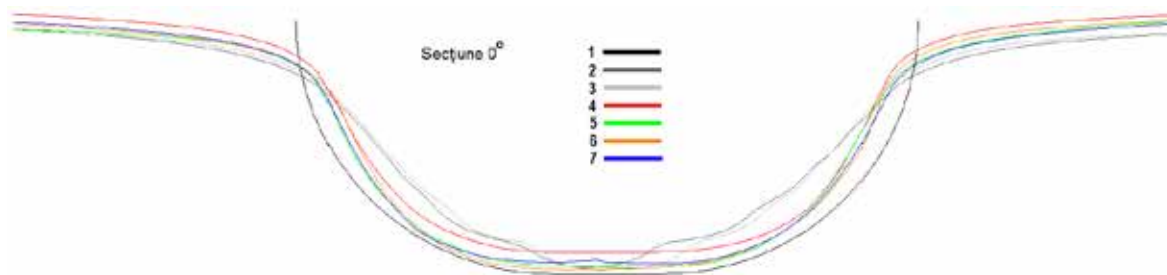
Din figura 4.84 se poate observa că, din punct de vedere al preciziei de formă, cele mai bune rezultate au fost obținute în cazul pieselor realizate din două etape (treckeri), care sunt superioare din punct de vedere al preciziei de formă și dimensionale pieselor realizate dintr-o singură etapă, indiferent de metoda utilizată (curbă de nivel pe contur sau spirală arhimedică și curbă de nivel pe contur).

În cazul pieselor realizate prin două etape de prelucrare, cele mai bune rezultate au fost obținute în cazul piesei realizate prin degroșare + finisare plană la  $90^\circ$ . Cel mai defavorabil caz din acest punct de vedere a fost cel al piesei realizate prin degroșare + finisare plană la  $0^\circ$ . Celelalte două procedee, degroșare + finisare plană la  $45^\circ$ , respectiv finisare plană optimizată se încadrează între cele două situații, abaterile de formă fiind sensibil egale în aceste cazuri.

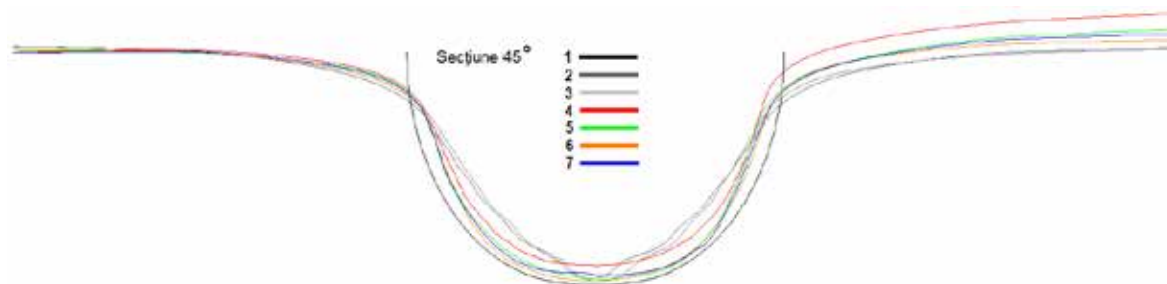
În cazul pieselor realizate dintr-o singură etapă, erorile dimensionale au valori mai mari, maximele fiind cuprinse între 1.5 și 2 mm.

Rezultatele măsurătorilor au demonstrat astfel faptul că prelucrările în două etape (treckeri), degroșare și finisare, permit obținerea unor piese de formă complexă în condiții de precizie de formă și dimensională ridicate, fiind superioare din acest punct de vedere prelucrărilor dintr-o singură etapă (trecker).

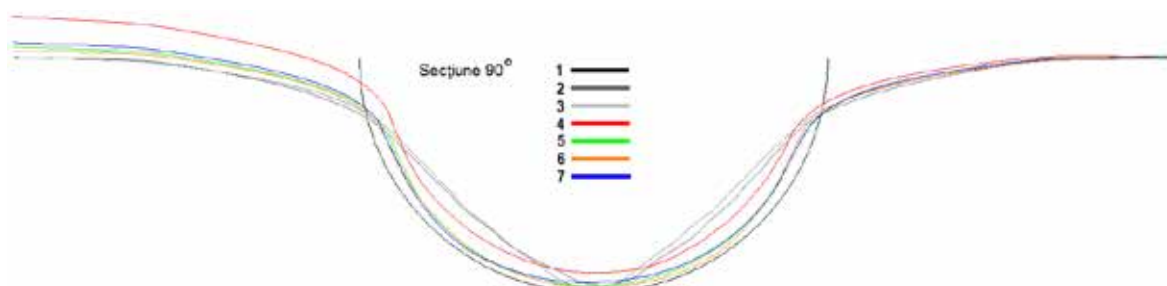




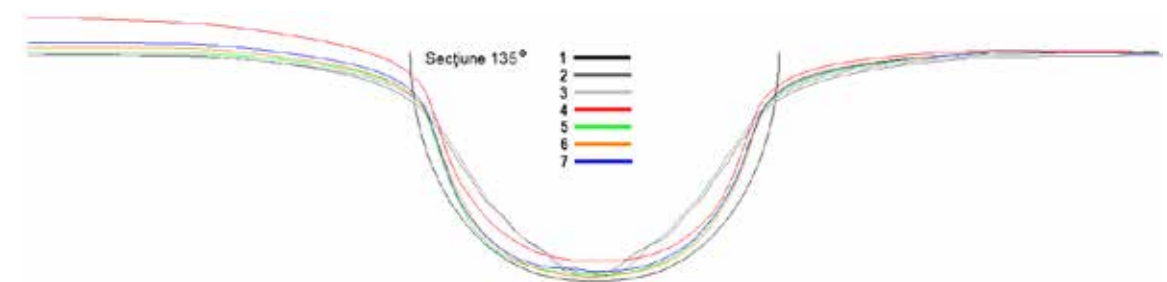
a.



b.



c.



d.

Fig. 4.84. Secțiuni: a. la  $0^\circ$ , b. la  $45^\circ$ , c. la  $90^\circ$ , d. la  $135^\circ$

## 4.7. Studiul rugozității pieselor

Pentru piesele studiate au fost determinate experimental diferite tipuri de rugozități. Cele mai reprezentative dintre acestea sunt prezentate în tabelul 4.20.

Tabelul 4.20.

Tip piesă	Nr. piesă	Codificare piese	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$
			[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]
Piese de tip emisferă	1	2402_E_8_C_240	1.305	7.700	12.800
	2	2401_E_8_SAC_240	1.164	5.330	8.370
	3	2404_E_8_CC90_240	1.534	7.450	10.700
Piese complexe	4	2701_PC_8_WP0_240	0.568	3.670	5.000
	5	2703_PC_8_WP45_240	0.511	3.280	5.580
	6	2702_PC_8_WP90_240	0.445	2.780	4.010
	7	2706_PC_8_WOPTH_240	0.237	1.870	4.140

Dintre criteriile arătate, precizia cea mai ridicată o asigură abaterea medie aritmetică a neregularităților  $R_a$ , evoluția acesteia fiind prezentată în figura 4.88.

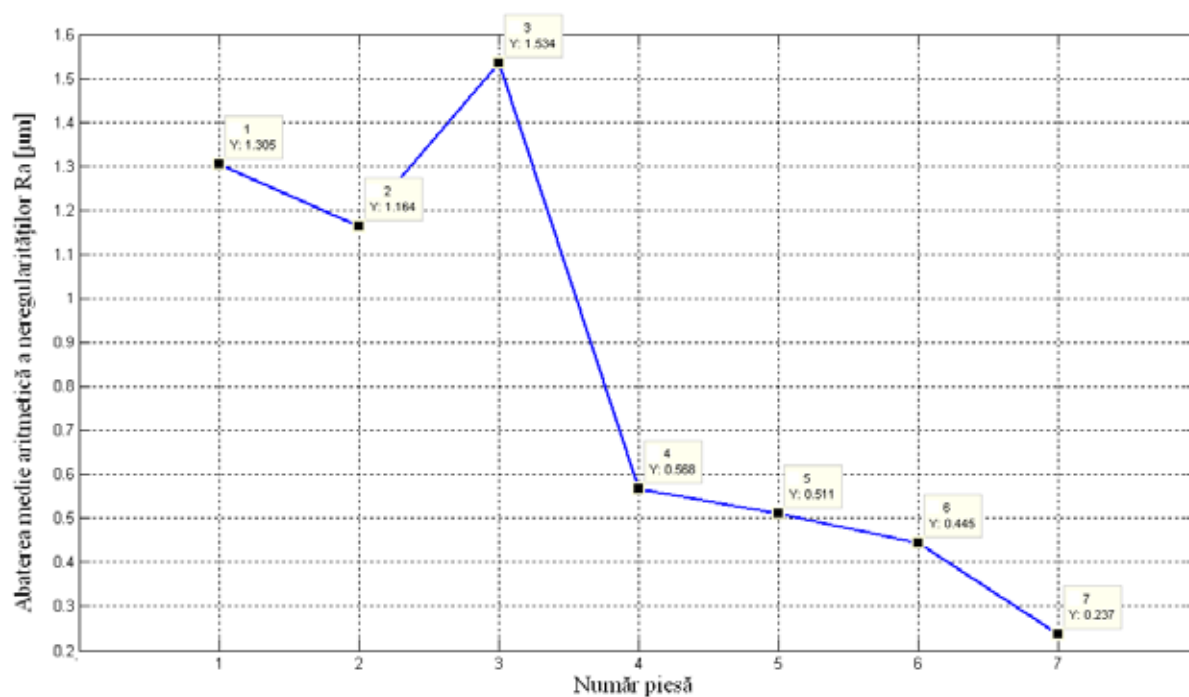


Fig. 4.88. Abaterea medie aritmetică a neregularităților  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ]

## **4.8. Concluzii**

În prima parte a acestui capitol au fost sintetizate informațiile despre cele două materiale utilizate în cadrul cercetărilor. Deoarece datele inițiale au fost insuficiente, a fost necesară determinarea caracteristicilor mecanice prin încercare la tracțiune, a caracteristicilor intrinseci și a curbelor limită de deformare, pentru ambele materiale care intră în componența tablei bimetalice utilizată în cadrul cercetărilor experimentale.

În cadrul cercetărilor experimentale s-au propus diverse variante ale procedurii de prelucrare prin ambutisare incrementală, bazate pe diferite traiectorii de deplasare ale poansonului. De asemenea, au fost luate în considerare variante ale procedurii care implică generarea piesei în două etape de prelucrare.

Au fost astfel realizate, utilizând diferite variante ale procedurii de prelucrare prin ambutisare incrementală, trei tipuri de piese: de tip trunchi de con, de tip emisferă și piese de formă complexă.

În urma prelucrărilor, au fost determinate experimental deformațiile pieselor realizate prin ambutisare incrementală. A fost analizat modul de evoluție a acestora, în funcție de varianta utilizată a procedurii, precum și influența unor parametri geometrici și tehnologici asupra valorii deformațiilor.

În etapa următoare a cercetărilor experimentale a fost realizată o analiză comparativă a rezultatelor teoretice obținute prin simulare numerică și a celor experimentale, în urma căreia au fost validate modelele utilizate.

Pentru evidențierea avantajelor variantelor de prelucrare prin ambutisare incrementală propuse, a fost analizată precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate.

În ultima etapă a cercetărilor experimentale prezentate în cadrul acestui capitol, a fost realizat un studiu comparativ al rugozității pieselor în funcție de varianta procedurii de prelucrare prin ambutisare incrementală utilizată.

## 5. CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND FORȚELE ȘI MOMENTELE DIN PROCESUL DE AMBUTISARE INCREMENTALĂ

Pentru determinarea experimentală a solicitărilor la nivelul mașinii apărute în procesul de ambutisare incrementală s-au utilizat în paralel două metode:

- măsurarea forței rezistente tehnologice pe fiecare axă de mișcare cu ajutorul unei mese dinamometrice și a unui sistem de achiziții de date. S-a utilizat o placă de achiziție internă Keitley Metrabyte KPCI 3018, conectată prin interfață PCI, pe având o frecvență de eșantionare maximă de 333 kHz;

- măsurarea momentelor rezistente statice utilizând informațiile afișate de către traductoarele montate pe mașină.

Pentru aceasta, s-a prelucrat un segment de dreaptă de lungime de 40 mm pe direcția axei X, pe o adâncime finală de 6 mm, în trei treceri, fiecare trecere având un pas de 2 mm pe direcția axei Z.

Indicațiile traductoarelor de pe mașină (traductoare de poziție și traductoare de cuplu) au fost citite utilizându-se următoarea metodologie:

- a fost realizat un fișier video în timpul procesului de ambutisare incrementală, cu ajutorul unui aparat foto digital;

- fișierul video a fost convertit din format mpeg în format avi, utilizându-se un program de conversie cu utilizare liberă (freeware);

- fișierul video a fost descompus în cadre (frame-uri), fiecare cadru fiind capturat la interval de o secundă. Pentru descompunerea fișierului video în cadre a fost realizat un program Matlab prezentat în anexe.

În figura 5.3 este prezentat un exemplu de cadru obținut prin procesul de captură și prelucrare de imagini.

S-au efectuat două determinări, una pentru mers în gol (fără prelucrare) și una pentru mers în sarcină. Valorile determinate sunt prezentate în tabelul 5.1.

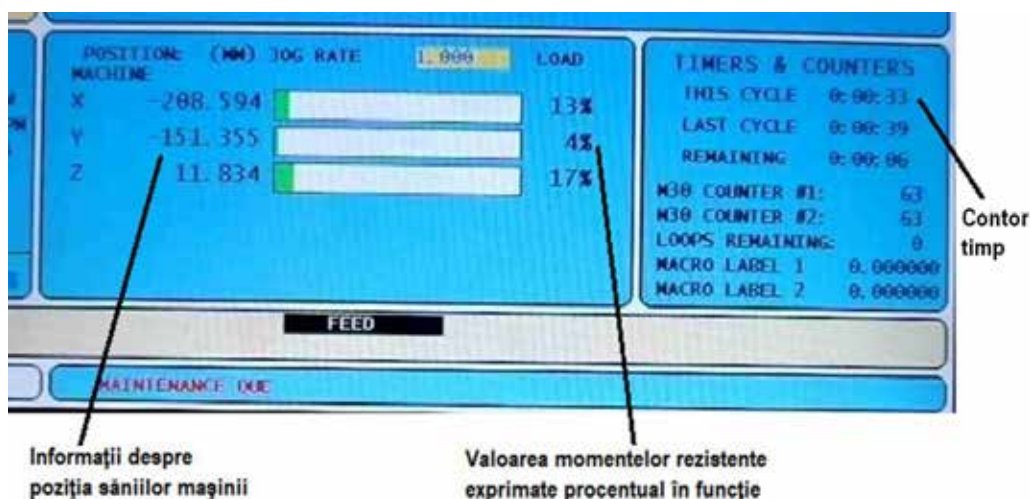


Fig. 5.3. Cadru obținut prin procesul de achiziție de imagini

Din figura 5.3 se pot observa zonele din care se extrag informațiile de interes:

- în partea stângă a cadrului sunt afișate informații provenind de la traductoarele de deplasare/poziție ale mașinii, care indică poziția instantanee a săniilor mașinii;
- în partea dreaptă a cadrului sunt afișate informații provenind de la traductoarele de cuplu ale mașinii, care afișează valoarea momentelor rezistente, exprimate procentual în funcție de momentul rezistent maxim;
- în extremitatea dreaptă a cadrului sunt afișate informații legate de timp, raportat la momentul de început al prelucrării.

În figura 5.15 este prezentat rezultatul măsurării forțelor rezistente tehnologice, obținut cu ajutorul sistemului de achiziții de date asistat de calculator.

Se observă că există o corespondență foarte bună între valorile determinate prin procedeul analitico-experimental și cele măsurate, pe axa Z.

În cazul axei X însă, se observă că cele două seturi de valori diferă. Acest lucru se explică prin faptul că senzorii mașinii nu discern schimbarea sensului de mișcare, înregistrând pe axa X numai valorile absolute ale forței. În figura 5.16 este prezentată forța rezistentă tehnologică pe axa X, corectată.

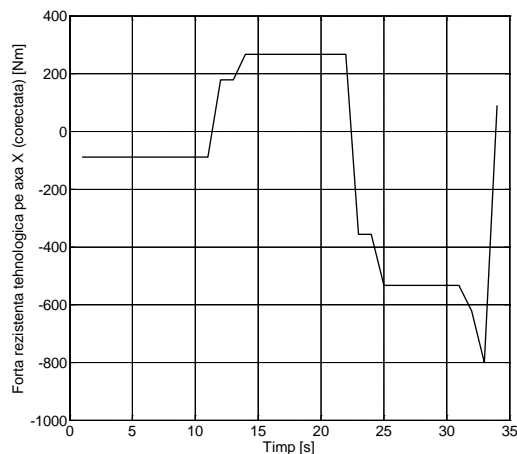
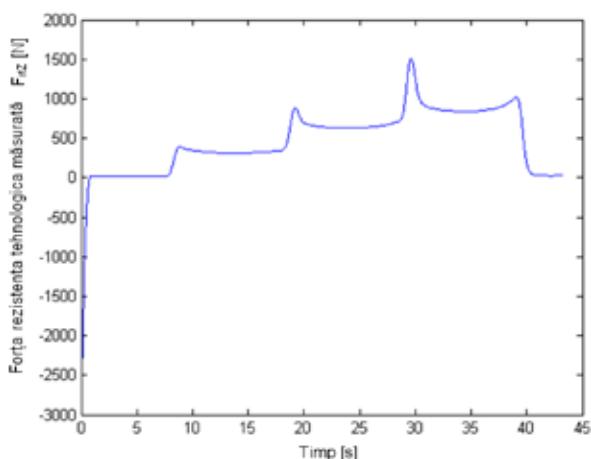


Fig. 5.15. Forța rezistentă tehnologică  $F_{rz}$  măsurată

Fig. 5.16. Forța rezistentă tehnologică pe axa X, corectată

## 5.5. Concluzii

În acest capitol s-a prezentat o metodă de determinare a momentelor rezistente care acționează asupra echipamentelor utilizate în procesele de ambutisare incrementală. Metoda se bazează pe o abordare combinată, analitică și experimentală.

S-au prezentat relațiile analitice de calcul pentru momentele rezistente statice și dinamice care apar în cazul unor prelucrări pe mașină. S-a arătat că momentele rezistente maxime care pot apărea în timpul prelucrării nu sunt egale cu momentele maxime dezvoltate de motoarele de acționare, ci le depășesc.

S-a elaborat o metodă care permite determinarea evoluției forțelor rezistente tehnologice, care utilizează numai echipamentele de pe mașină, fără a fi necesară utilizarea unor sisteme complexe de achiziții de date.

Rezultatele obținute prin aplicarea metodei propuse au fost comparate cu cele obținute prin măsurare. Concordanța dintre valorile obținute a condus la validarea rezultatelor.

## **6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII**

### **6.1. Concluzii finale**

Cercetările întreprinse pe parcursul elaborării acestei lucrări au avut ca principal obiectiv studierea comportării tablelor bimetalice la prelucrarea prin procedeul de ambutisare incrementală.

Rezultatele raportate în literatura de specialitate au relevat faptul că unul dintre cele mai bune compromisuri între costurile asociate cu obținerea semifabricatului și avantajele utilizării unui semifabricat bimetalic este oferit de combinația de materiale oțel – aliaj de aluminiu. Astfel, în urma concluziilor rezultate din analiza stadiului actual în domeniu, s-a selectat ca material pentru cercetări un semifabricat bimetalic compus dintr-un strat de oțel DC04 și un strat de aliaj de aluminiu AA6016. Astfel, s-a urmărit îmbinarea proprietăților mecanice superioare ale oțelului, cu greutatea redusă a aliajului de aluminiu. De asemenea, aliajul de aluminiu a fost luat în considerare și datorită proprietăților specifice care îl recomandă pentru utilizare în industria biomedicală și în cea alimentară.

Atât analiza bibliografică, cât și cercetările experimentale preliminare au indicat faptul că, în scopul obținerii unor rezultate cât mai bune, la prelucrarea semifabricatului bimetalic prin procedeul de ambutisare incrementală, orientarea acestuia trebuie făcută astfel încât stratul de aliaj de aluminiu să se afle în contact cu poansonul în timpul prelucrării. Orientarea alternativă, astfel încât contactul poansonului să se facă cu stratul de oțel a condus, în repetate rânduri la fisurarea semifabricatului.

***Cercetările teoretice desfășurate pe parcursul elaborării lucrării au permis formularea următoarelor concluzii:***

- există numeroase aplicații industriale care necesită realizarea de piese prin procedee de deformare plastică prin utilizarea unui semifabricat compozit, care să îmbine proprietățile materialelor componente, eliminând sau reducând dezavantajele fiecăruia;
- cel mai bun compromis între proprietăți și costuri (atât cele asociate cu obținerea semifabricatului, cât și cele asociate cu prelucrarea piesei) este oferit de semifabricatul bimetalic, la care unul dintre straturi are proprietăți mecanice superioare, iar celălalt are o greutate redusă;
- este posibilă modelarea, simularea și analiza prin metoda elementului finit a comportării semifabricatului bimetalic la deformare prin ambutisare incrementală, în condițiile în care sunt determinate caracteristicile materialelor prin încercarea la tracțiune și sunt determinate curbele limită de deformare, pentru fiecare dintre cele două materiale din componența semifabricatului bimetalic.

***Cercetările experimentale desfășurate pe parcursul elaborării lucrării au permis formularea următoarelor concluzii:***

- semifabricatul bimetalic compus dintr-un strat de oțel DC04 și un strat de aliaj de aluminiu AA6016 poate fi prelucrat cu rezultate favorabile prin procedeul de

ambutisare incrementală, în condițiile în care contactul dintre poanson și semifabricat se face cu stratul de aliaj de aluminiu;

- nu este necesară fixarea prealabilă a celor două straturi de material (prin procedee mecanice sau elemente intermediare de tip strat de adeziv), prelucrarea prin procedeul de ambutisare incrementală conducând ea însăși la fixarea acestora;
- în condițiile în care semifabricatul este orientat conform celor afirmate anterior, măsurarea deformațiilor se poate face numai pe stratul exterior, cel din oțel DC04;
- rezultatele obținute experimental privind valorile și distribuțiile deformațiilor maxime și a subțierii relative pentru stratul din oțel DC04 au fost similare cu cele obținute din simularea numerică prin metoda elementului finit, fapt care condus la validarea modelului elaborat în etapa cercetărilor experimentale;
- valorile și distribuțiile deformațiilor maxime, a deformațiilor Von Mises și a subțierii relative sunt puternic dependente de varianta procedeeului de deformare incrementală utilizat. Astfel, s-a demonstrat că pentru piesele cu geometrie simplă (trunchi de con și sferă), varianta optimă a procedeeului de prelucrare este cea care utilizează ca traiectorie principală a poansonului spirala arhimedică;
- pentru piesele de forme complexe, o variantă a procedeeului de prelucrare în două etape, degroșare și finisare, poate conduce la obținerea unor rezultate semnificativ mai bune din punct de vedere a valorilor și distribuțiilor deformațiilor maxime, a deformațiilor Von Mises și a subțierii relative. Cu toate acestea, rezultatele sunt dependente de selectarea unor combinații de traiectorii optime;
- abaterile dimensionale și de formă în cazul pieselor din semifabricat de tip tablă bimetalică, realizate prin procedeul de ambutisare incrementală sunt mai mari decât a celor realizate din semifabricate omogene (dintr-un singur material);
- abaterile dimensionale și de formă sunt de asemenea puternic influențate de varianta procedeeului de ambutisare incrementală utilizată. În cazul pieselor cu forme simple, precizia dimensională și de formă cea mai bună a fost obținută în cazul procedeeului de prelucrare care utilizează ca traiectorie principală a poansonului spirala arhimedică. În cazul pieselor cu forme complexe, prelucrarea în două etape, degroșare și finisare, a condus la îmbunătățirea semnificativă a preciziei de formă și dimensionale, comparativ cu prelucrările într-o singură etapă;
- calitatea suprafeței pieselor prelucrate (rugozitatea) este și ea influențată de varianta procedeeului de prelucrare, prelucrările în două etape fiind justificate și din acest punct de vedere, cercetările indicând o scădere semnificativă a rugozității în acest caz.

## **6.2. Principalele contribuții ale lucrării**

Pe parcursul elaborării acestei lucrări, s-au adus o serie de contribuții la studiul prelucrării prin procedeul de ambutisare incrementală a materialelor bimetalice, cele mai semnificative dintre acestea fiind enumerate în continuare.

***Din punct de vedere al cercetărilor teoretice:***

- a fost realizată o sinteză a principalelor rezultate din literatura de specialitate aferentă domeniului abordat, referitoare la principalele tehnologii de prelucrare prin deformare incrementală, utilizarea semifabricatelor compozite în deformarea plastică, echipamentele tehnologice de prelucrare prin deformare incrementală și tehnicile CAD/CAM utilizate pentru acest procedeu;
- pe baza analizei critice a stadiului actual în domeniu au fost stabilite principalele direcții de cercetare precum și principalele obiective ale cercetării;
- a fost elaborat un model care permite analiza și studiul prin simulare, prin metoda elementului finit, a procedurii de ambutisare incrementală. Modelul a luat în considerare natura particulară a semifabricatelor utilizate, de tip tablă bimetalică, compuse dintr-un strat de oțel DC04 și un strat de aliaj de aluminiu AA6016;
- pe baza modelului elaborat au fost realizate o serie de simulări numerice ale procedurii de ambutisare incrementală a pieselor din semifabricat de tip tablă bimetalică, pentru diferite configurații geometrice ale pieselor și pentru diferite variante ale procedurii de prelucrare;
- au fost determinate prin simulare valorile și distribuțiile deformațiilor maxime și a subțierii relative pentru fiecare dintre cele două materiale care compun semifabricatul de tip tablă bimetalică;
- s-au elaborat relații analitice de calcul care permit determinarea momentelor și forțelor tehnologice rezistente care acționează asupra echipamentului utilizat în procesul de ambutisare incrementală.

***Din punct de vedere al cercetărilor experimentale:***

- s-au efectuat teste de încercare la tracțiune uniaxială în vederea identificării caracteristicilor de material și a capacității de deformare a materialelor componente din structura semifabricatului de tip tablă bimetalică;
- s-au determinat curbele limită de deformare pentru cele două materiale utilizate (oțel DC04 și aliaj de aluminiu AA6016);
- s-a realizat un stand experimental de prelucrare prin ambutisare incrementală, prin adaptarea și echiparea specifică a unui centru de prelucrare prin frezare CNC;
- s-au adaptat și implementat pentru procedeu studiat sisteme de achiziții de date și sisteme de achiziții și prelucrare de imagini asistate de calculator;
- s-au realizat diagrame și programe pentru achiziția, filtrarea și prelucrarea datelor experimentale achiziționate;
- au fost realizate programe pentru descompunerea seriilor de imagini achiziționate în cadre, în scopul analizei și extragerii de informații din acestea;
- au fost realizate, utilizând diverse variante ale procedurii de prelucrare prin ambutisare incrementală, piese de forme simple (trunchiuri de con și emisfere) și de formă complexă;
- s-a propus un set de curbe complexe, ca alternativă la traiectoriile elementare de tip curbă de nivel pe contur, descrise de poanson în scopul îmbunătățirii stării pieselor obținute;



- s-a propus prelucrarea în două etape, degroșare și finisare, a pieselor realizate prin ambutisare incrementală și s-au propus diverse strategii de lucru pentru finisare;
- au fost determinate experimental valorile și distribuțiile deformațiilor maxime și a subțierii relative pentru fiecare dintre cele două materiale care compun semifabricatul de tip tablă bimetalică. Rezultatele obținute au indicat faptul că strategiile de lucru propuse sunt superioare strategiilor utilizate în prezent;
- a fost evaluată precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate și a fost confirmată și din acest punct de vedere eficiența noilor strategii propuse în lucrare față de strategiile actuale;
- eficiența noilor strategii de prelucrare a fost validată și prin evaluarea calității suprafețelor (rugozitatea) pieselor prelucrate;
- s-a propus și validat o metodologie mixtă bazată pe relații analitice, achiziția de date de la blocul de senzori ai echipamentului utilizat, și achiziția și prelucrarea de imagini, care permite determinarea forțelor rezistente tehnologice apărute în procesul de ambutisare incrementală.

### **6.3. Direcții de cercetare ulterioare**

Având în vedere durata și resursele limitate ale unei astfel de cercetări, există desigur posibilitatea de dezvoltare a cercetărilor ulterioare, pe direcții sugerate de rezultatele obținute în această teză.

Dintre acestea se pot aminti:

- realizarea prin ambutisare incrementală a unor piese de dimensiuni medii și mari;
- realizarea prin ambutisare incrementală a unor piese cu forme de complexitate ridicată;
- dezvoltarea unei metodologii pentru determinarea unor curbe limită de deformare particularizate pentru procedeul de deformare incrementală;
- dezvoltarea unor pachete software CAM specifice pentru prelucrările prin ambutisare incrementală, care să țină cont de particularitățile acestui procedeu;
- studiul mărimii forțelor de coeziune dintre cele două straturi ale semifabricatului de tip tablă bimetalică și modul de variație al acestora în funcție de parametrii procedeuului de ambutisare incrementală;
- realizarea prelucrărilor prin ambutisare incrementală pe echipamente tehnologice cu posibilități de generare a traiectoriilor superioare celui utilizat în această lucrare (centre de prelucrare CNC cu patru sau cinci axe comandate numeric și roboți industriali seriali cu până la șase grade de libertate);
- studiul influenței utilizării diferitelor strategii și traiectorii de prelucrare asupra proprietăților mecanice (duritate) ale pieselor ambutisate;
- proiectarea și realizarea unor echipamente tehnologice dedicate procesului de ambutisare incrementală.

## BIBLIOGRAFIE

2. Allwood, J. M., Houghton, N. E., Jackson, K. P. *The design of an Incremental Forming machine*, 11th Conference on Sheet Metal, Erlangen, 2005, pp. 471 -478, 2005
3. Ambrogio, G, Costantino, I, Napoli, L.D. et al., *Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation*, J. Mater Process Technol 153–154, pp. 501–507, 2004
4. Amino, H., et al., *Dieless NC Forming, Prototype of Automotive Service Parts*, Proceedings of the 2nd International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing (ICRPM), Beijing, 2002
8. Attanasio, A, Ceretti, E., Giardini, C., *Optimization of tool path in two points incremental forming*, Journal of Materials Processing Technology 2006, 177(1\_3), pp. 409-412, 2006
9. Bagger, C., Gong, H., Olsen, F.O., *Formability of Stainless Steel Tailored Blanks*, Proceedings of the 4th LANE 2004, Erlangen, September 21 - 24, 2004, Meisenbach Bamberg, 2004
10. Bambach, M., Hirt, G., Junk, S. *Modeling and experimental evaluation of the incremental CNC sheet metal forming process*. In: Proceedings of the VII-th International Conference on Computational Plasticity, pp. 1–15, 2003
12. Bambach M., Taleb Araghi, B., Hirt, G., *Strategies to Improve the Geometric Accuracy in Asymmetric Single Point Incremental Forming*, Production Engineering Research Development, 3, pp. 145-156, 2009
15. Banabic, D., et al., *An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets*, International Journal of Plasticity, Volume 21, Issue 3, March 2005, pp. 493–512, 2005
17. Bayraktar, E. Isac, N., Arnold, G., *An experimental study on the forming parameters of deep-drawable steel sheets in automotive industry*, Journal of Materials Processing Technology 162–163, pp. 471–476, 2005
20. Biriș, C., **Tera, M.**, Șerb, S., *Considerations on the Precision of NC Machine-tools used for Non-conventional Cutting Operations*, Proceedings of the International Conference on Manufacturing Systems ICMAS 2008, Editura Academiei Române, București, pp. 139-142, 2008
21. Biriș, C., **Tera, M.**, et al., *Improving the Manufacturing Accuracy of the Profiling Machines*, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Federation of automatic Control (IFAC) Conference on Management and Control of Production and Logistics MCPL, Coimbra, Portugal, September 8-10, 2010
29. Breaz, R. E., **Tera, M.** et al., *Low-cost Motion Control Solution for Industrial Manufacturing Systems*, Proceedings of IEEE 9th International Conference on Industrial Informatics, Lisbon, Portugal, 26-29 July, pp. 280-285, 2011
32. Ceretti, E., Giardini, C., Attanasio, A., *Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines*, Journal of Materials Processing Technology 2004, 152(2), pp. 176-184, 2004
36. Deac, C., Biriș, C., **Tera, M.**, *Aspects of Modern Procedures for thermal cutting and Welding of Small-Sized Titanium-Based Parts*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Supplement Nr. 2/2007, Editura Politehnica Timișoara, pp.21-25, 2007
37. Deac, C., **Tera, M.**, et al., V., *Aspects of Improving the Cost-Performance Ratio for the Manufacturing of Small-Size Cast Parts*, 5th Conference on Management and Control of Production Logistics - MCPL 2010, Coimbra, Portugalia, ISBN 978-3-902661-81-4, 2010

38. Decultot, N., *Formage incrémental de tôle d'aluminium : étude du procédé à l'aide de la mesure de champs et identification de modèles de comportement*, PhD Thesis, Université de Toulouse, 2009
43. Duflou, J., et al., *Experimental study on force measurements for single point incremental forming*, Journal of Materials Processing Technology 2007, 189(1\_3), pp. 65-72, 2007
45. Duflou, J. R., et al., *Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 57, pp. 253–256, 2008
48. Filice, L., Fantini, L., Micari, F., *Analysis of Material Formability in Incremental Forming*, Annals of the CIRP, vol. 51/1/2002, pp. 199-202, 2002
49. Fratini, L. et al., *Influence of mechanical properties of the sheet material of formability in single point incremental forming*, Annals of the CIRP vol. 53 (1), pp. 207–210, 2004
54. Göttmann, A. et al., *Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts*, Prod. Eng. Res. Devel., vol. 5, pp. 263–271, 2011
55. Gresham, J., et al., *Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures*, Composite Structures, Science Direct, 2006
56. Hagan, E., Jeswiet, J., *A review of conventional and modern single point sheet metal forming methods*, Journal of Engineering Manufacture, 217, pp. 213–225, 2003
59. Hirt, G., et al., *Forming Strategies and Process Modelling for CNC incremental Sheet Forming*, Annals of CIRP vol. 53/1/2004; pp. 203, 2004
60. Hirt, G., *Tools and Equipment used in Incremental Forming*, 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrücken, 9 June 2004, on CD-ROM, 2004
72. Jackson, K.P., Allwood, J.M., Landert, M., *Incremental forming of sandwich panels*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 204, pp. 290-303, 2008
73. Jadhav, S., *Basic Investigations of the Incremental Sheet Metal Forming Process on a CNC Milling Machine*, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Germany, 2004
75. Jeswiet, J., *Recent results for SPIF. Seminar on Incremental Forming*, Cambridge University, CD-ROM, 2004
84. Kopac, J., Kampus, Z., *Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool*, Journal of Materials Processing Technology 2005, 162\_163, pp. 622-628, 2005
89. Lee, J.E. et al., *Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 187-188, pp. 546-549, 2007
95. Liu, C., Li, M., Fu, W., *Principles and apparatus of multi-point forming for sheet metal*, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, vol. 35, pp.1227–1233, 2008
99. Meier, H., Dewald, O., Zhang, J., *Development of a Robot-Based Sheet Metal Forming Process*, Steel Research International, Issue 1/2005, Dusseldorf: Verlag Stahleise, pp. 167-170, 2005
100. Meier, H., et al., *Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, pp. 233–238, 2009
103. Morovvati, M.R., Fatemi, A., Sadighi, M., *Experimental and finite element investigation on wrinkling of circular single layer and two-layer sheet metals in deep drawing process*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, published online 30 september 2010, Springer-Verlag London, 2010
115. Petek A. et al., *Comparison of alternative approaches of single point incremental forming processes*, Journal of Materials Processing Technology vol. 209, pp. 1810–1815, 2009

120. Rauch, M., et al., *Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications*, Computer-Aided Design 41, pp. 877-885, 2009
132. Skjoedt M., et al., *Multi-stage strategies for single point incremental forming of a cup*, 11th ESAFORM conference on metal forming – ESAFORM 2008
140. Tera, M., *Multiple layer sheets for industrial applications*, Acta Universitatis Cibiniensis, Vol. LII, Tehnical series, Sibiu, pp. 97–102, 2005
141. Tera, M., Biriș, C., Deac C., *Considerations on the Selection of Materials for the Realising of Deep-Drawn Bimetallic Parts*. 17th International Metallurgical and Materials Conference "METAL 2008", Ostrava, Cehia, 2008
142. Tera, M., Bologa, O., Oleksik, V., *Aspects and results of the numerical simulation of the deep-drawing of tailor-welded parts*, Tehnologia Inovativă Revista Construcția de Mașini, Anul 60 Nr. 3 - 4/ 2008, Ed. ICTCM – CITAf - OID.ICM, București, pp. 113-116, 2008
143. Tera, M., Deac, C., *Computer-Aided Selection of Steels for the Realising of Bimetallic Deep-Drawn Parts*, Proceedings of the International Conference on Manufacturing Systems ICMAS 2008, Editura Academiei Române, București, pp. 313-316, 2008
144. Tera, M., Bologa, O., Deac., C., *Study of deep-drawn tailor welded parts used in automotive industry*, Proceedings of the 4rd International Conference on Manufacturing Science and Education MSE 2009, Sibiu, pp. 95-98, 2009
145. Tera, M., et al., *Study Regarding the Numerical Simulation of the Deep Drawing Process for Tailor Welded Blanks*, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, pp. 63-64, 2009
146. Tera, M., et al., *Simulations Regarding a CNC Milling Machine Feed Drive used in Forming Processes*, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași, Vol. LVII(LXI), Fascicle 4, Machine Constructions, pp. 242-249, Iași, 2011
147. Tera, M., et al., C., *Comparative Study by Numerical Analysis on the Formability of Deep-Drawn Tailor-Welded Blanks*, Advanced Materials Research II, Vols. 463-464, Published by Trans Tech Publications, pp 582-586, Switzerland, 2012
148. Tera, M., et al., *Researches Regarding the Use of Complex Trajectories and Two Stages Processing in Single Point Incremental Forming of Two Layers Sheet*, Metal Forming 2012, 14-th International Conference, Krakow, Poland, acceptată pentru susținere la conferință și pentru publicare în revista Steel Research International (scor relativ de influență 1.34), 2012
154. Verbert, J, Duflou, J.R., Lauwers, B., *Feature based approach for increasing the accuracy of the SPIF process*, Proceedings of the 12th international conference on sheet metal (SheMet), TransTech Publications, CH-Zürich, pp. 615–620, 2007
155. Vihtonen, L., Puzik, A., Katajarinne T., *Comparing Two Robot Assisted Incremental Forming Methods: Incremental Forming by Pressing and Incremental Hammering*, International Journal of Materials Forming, Supplement 1, pp. 1207 –1210, 2008
158. Yanagimoto, J. et al., *Enhancement of bending formability of brittle sheet metal in multilayer metallic sheets*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 59, pp. 287-290, 2010
159. Yilamu, K., et al., *Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, pp. 272-278, 2010
164. Zhang P, Guo B, Shan D-B, Ji Z, *FE simulation of laser curve bending of sheet metals*. J Mater Process Technol vol. 184, pp.157–162, 2008
165. \*\*\* *Abaqus v6.8 – Documentation Collection*, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2008
166. \*\*\* *ARAMIS User Manual – Software. FLC Computation v6*, GOM GmbH, Germany, 2007