Universitatea
Transilvania
din Brașov

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial

Ing. Marius-Daniel NĂSULEA

Cercetări privind deformarea incrementală a pieselor din tablă de oțel DC05

Research Regarding the Incremental Forming of DC05 Steel Sheet Parts

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător ştiinţific

Prof.dr.ing. Gheorghe OANCEA

BRAȘOV, 2019

D-lui (D-nei) .....

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov
Nr. ..... din .....

PREŞEDINTE:	prof. univ. dr. ing Ramona CLINCIU Universitatea Transilvania din Brașov
CONDUCĂTOR ŞTIINȚIFIC:	prof. univ. dr. ing Gheorghe OANCEA Universitatea Transilvania din Brașov
REFERENȚI:	prof. univ. dr. ing Cristian-Vasile DOICIN Universitatea Politehnica din București
	prof. univ. dr. ing Valentin-Ștefan OLEKSIK Universitatea Lucian Blaga din Sibiu
	prof. univ. dr. ing Cristin-Olimpiu MORARIU Universitatea Transilvania din Brașov

Data, ora şi locul susținerii publice a tezei de doctorat:
Data 15.07.2019, ora 12:00, sala VIII6.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vă rugăm să le transmiteți în timp util, pe adresa nasulea.marius.daniel@unitbv.ro

Totodată vă invităm să luați parte la şedința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim !

CUPRINS (lb. română)

	Pg. teză	Pg. rezumat
LISTA DE NOTAȚII	6	7
LISTA DE ABREVIERI	9	9
INTRODUCERE	10	10
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL DEFORMĂRII INCREMENTALE A PIESELOR DIN TABLĂ	13	11
1.1 Principiul de lucru al deformării incrementale	13	11
1.2 Scurt istoric. Apariția și evoluția deformării incrementale	15	12
1.3 Aplicații industriale ale deformării incrementale	19	12
1.4 Configurații ale deformării incrementale	21	13
1.5 Mașini și echipamente utilizate pentru deformarea incrementală	22	13
1.6 Scule utilizate pentru deformare	25	14
1.7 Traiectoria sculelor de deformare	28	15
1.8 Materiale utilizate în deformarea incrementală	31	15
1.9 Calitatea și precizia dimensională a pieselor obținute prin deformare incrementală	32	16
1.9.1 Rugozitatea suprafețelor obținute prin deformare incrementală	32	16
1.9.2 Variația grosimii pereților obținuți prin deformare incrementală	36	16
1.9.3 Precizia dimensională a pieselor obținute prin deformare incrementală	39	17
1.10 Deformabilitatea materialului în procesele de deformare incrementală	43	18
1.11 Tensiunile și deformațiile în cadrul procedeelor de deformare incrementală	47	19
1.12 Forțe în cadrul procesului de deformare incrementală	49	20
1.13 Avantajele și dezavantajele deformării incrementale a tablelor	50	20
1.14 Concluziile referitoare la stadiul actual al cercetărilor privind deformarea incrementală a pieselor din tablă	52	21
2. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT	53	22

3. SIMULAREA PROCESULUI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ UTILIZÂND METODA ELEMENTELOR FINITE 55 23

3.1 Introducere în metoda elementelor finite 55 23

3.2 Etapele simulării numerice a procesului de deformare incrementală într-un punct de contact 57 23

3.3 Determinarea experimentală a proprietăților materialului DC05 65 27

3.4 Dezvoltarea unui instrument software destinat generării datelor necesare în ANSYS APDL pentru descrierea traiectoriei sculei 77 31

3.4.1 Necesitatea unui nou instrument software 77 31

3.4.2 Descrierea instrumentului software 81 32

3.4.3 Integrarea instrumentului software TMPG în etapa de simulare numerică a procesului SPIF 87 34

3.5 Simularea numerică a unei piese de dimensiuni reale 89 35

3.6 Concluzii referitoare la simularea numerică a procesului SPIF 91 36

4. PROIECTAREA SCULELOR ȘI A DISPOZITIVULUI DE FIXARE A TABLEI 92 37

4.1 Proiectarea și fabricarea dispozitivului de fixare a tablei 92 37

4.1.1 Proiectarea constructivă a dispozitivului de fixare a tablei 93 37

4.1.2 Simularea numerică a dispozitivului de fixare 95 38

4.1.3 Optimizarea constructivă a dispozitivului de fixare a tablelor 97 39

4.2 Fabricarea și asamblarea dispozitivului de fixare 99 41

4.3 Proiectarea și fabricarea sculelor de deformare 101 41

4.4 Validarea rezultatelor obținute în procesul de simularea numerică a dispozitivului de fixare 103 43

4.5 Concluzii privind proiectarea sculelor și a dispozitivului de fixare a tablei 105 44

5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE REFERITOARE LA PRECIZIA PIESELOR FABRICATE PRIN DEFORMARE INCREMENTALĂ, DIN TABLĂ DC05 106 45

5.1 Identificarea limitărilor procesului SPIF pentru materialul DC05 106 45

5.1.1 Strategia de deformare a pieselor de forma unui trunchi de con 106 45

5.1.2 Deformarea unui lot de piese de probă care au formă de trunchi de con 109 45

5.1.3 Prezentarea metodei de măsurare prin scanare 3D 120 50

5.1.4 Măsurarea preciziei dimensionale a pieselor deformate în cadrul lotului de probă 124 50

5.2 Fabricarea unei serii de piese utilizând scula specială 128 51

5.2.1 Deformarea unei serii de piese utilizând scula specială 128 51

5.2.2 Compararea preciziei dimensionale a pieselor deformate 130 52

5.3 Proiectarea unui plan experimental pentru determinarea preciziei dimensionale a pieselor fabricate utilizând scula specială 135 54

5.4 Fabricarea pieselor și măsurarea abaterilor obținute 139 55

5.5 Interpretarea rezultatelor și obținerea modelelor matematice 143 57

5.6 Validarea practică a modelelor matematice pentru determinarea preciziei dimensionale 146 58

5.7 Concluzii privind cercetările experimentale referitoare la precizia pieselor fabricate prin deformare incrementală, din tablă DC05 149 59

6. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE. 150 60

6.1 Concluzii generale 150 60

6.2 Contribuții personale 151 61

6.3 Diseminarea rezultatelor 152 62

6.4 Direcții viitoare de cercetare 153 63

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ 154 64

REZUMATUL TEZEI 190 69

CURRICULUM VITAE 191 70

CUPRINS (lb. engleză)

	Pg. teză	Pg. rezumat
NOTATION LIST	6	7
ABBREVIATION LIST	9	9
INTRODUCTION	10	10
1. STATE OF THE ART IN THE FIELD OF SHEET METAL PARTS INCREMENTAL FORMING	13	11
1.1 The working principle of incremental forming process	13	11
1.2 Short history. Incremental forming appearance and evolution	15	12
1.3 Industrial applications of incremental forming	19	12
1.4 Incremental forming configurations	21	13
1.5 Machine tools and equipments used for incremental forming	22	13
1.6 Tools used for deformation	25	14
1.7 Deformation tool trajectory	28	15
1.8 Materials used in incremental forming	31	15
1.9 The quality and the dimensional precision of the parts obtained by incremental forming processes	32	16
1.9.1 Surface roughness obtained by incremental forming processes	32	16
1.9.2 Wall thickness variation obtained by incremental forming processes	36	16
1.9.3 Dimensional precision of the parts obtained by incremental forming processes	39	17
1.10 Material formability in incremental forming processes	43	18
1.11 Stress and strain incremental forming processes	47	19
1.12 Forces in incremental forming processes	49	20
1.13 Advantages and the disadvantages of incremental forming processes	50	20
1.14 Conclusions on the state of the art regarding the sheet metal parts incremental forming	52	21

2. PHD THESIS OBJECTIVES 53 22

3. SIMULATION OF THE INCREMENTAL FORMING PRECESS USING THE FINITE ELEMENT METHOD 55 23

3.1 Introduction in finite element method 55 23

3.2 Steps of the single point incremental forming numerical simulations 57 23

3.3 Experimental determination of the DC05 mechanical properties 65 27

3.4 Development of a software tool to generate the data needed in ANSYS APLD to describe the tool trajectory 77 31

3.4.1 Necessity of a software tool 77 31

3.4.2 Software tool description 81 32

3.4.3 TMPG software tool integration in the SPIF numerical simulation process 87 34

3.5 Numerical simulation of a part with real dimensions 89 35

3.6 Conclusions regarding the SPIF numerical simulation 91 36

4. THE DESIGN OF THE FORMING TOOLS AND THE SHEET FIXING DEVICE 92 37

4.1 Design and manufacturing of the sheet fixing device 92 37

4.1.1 Constructive design of the sheet fixing device 93 37

4.1.2 Numerical simulations of the sheet fixing device 95 38

4.1.3 Constructive optimization of the sheet fixing device 97 39

4.2 Manufacturing and assembly of the sheet fixing device 99 41

4.3 Design and manufacturing of the forming tools 101 41

4.4 Validation of the results obtained through numerical simulation of the sheet fixing device 103 43

4.5 Conclusions regarding the design of the forming tools and the sheet fixing device 105 44

5. EXPERIMENTAL RESEARCH REGARDING THE DIMENSIONAL PRECISION OF THE DC05 SHEET METAL PARTS MANUFACTURED BY INCREMENTAL FORMING PROCESS 106 45

5.1 Identification of the SPIF process limitations for DC05 material 106 45

5.1.1 Forming strategy of the cone frustum parts 106 45

5.1.2 Deforming a batch of test parts that have a cone frustum shape 109 45
5.1.3 Presentation of the 3D scanning measuring method 120 50
5.1.4 Dimensional accuracy measurments of the parts deformed in the test parts batch 124 50
5.2 Manufacturing of a series of part using the special tool 128 51
5.2.1 Deformation of a series of part using the special tool 128 51
5.2.2 Dimensional accuracy comparison of the deformed parts 130 52
5.3 Designing of an experimental plan to determine the dimensional accuracy of the parts manufactured using the special tool 135 54
5.4 Parts manufacturing and the deviations measurments 139 55
5.5 Results interpretation obtaining the mathematical models 143 57
5.6 Practical validation of the mathematical models for dimensional accuracy prediction 146 58
5.7 Conclusions regarding the experimental research of the DC05 sheet metal parts accuracy manufactured by incremental forming process 149 59
6. GENERAL CONCLUSIONS. PERSONAL CONTRIBUTIONS. RESULTS DISEMINATIONS. FUTURE RESEARCH DIRECTIONS 150 60
6.1 General conclusions 150 60
6.2 Personal contributions 151 61
6.3 Results Diseminations 152 62
6.4 Future research directions 153 63
SELECTED BIBLIOGRAPHY 154 64
PHD THESIS ABSTRACT 190 69
CURRICULUM VITAE 191 70

LISTA DE NOTAȚII

A1 – abaterea dimensională a pieselor măsurată în poziția 3/4xH;

A2 - abaterea dimensională a pieselor măsurată în poziția 1/2xH;

A3 - abaterea dimensională a pieselor măsurată în poziția 1/4xH;

CONF – configurația pieselor;

D - diametrul bazei mari a trunchiului de con;

d - diametrului sculei de deformare;

Dextpl - parametrul asociat diametrului exterior al plăcii suport, în fișierul de intrare ANSYS;

Dintpl - parametrul asociat diametrului interior al plăcii suport, în fișierul de intrare ANSYS;

Dp - parametrul asociat diametrului sculei, în fișierul de intrare ANSYS;

E - modulul de elasticitate longitudinal;

E_{real} - modulul de elasticitate longitudinal real;

f - parametrul asociat forței de reținere a semifabricatului, în fișierul de intrare ANSYS;

FRET - parametrul de tip mulțime pentru indicarea pentru forței de reținere f, a semifabricatului;

Fx / Fr – componenta radială a forței de deformare;

Fy / Ft – componenta tangențială a forței de deformare;

Fz / Fa – componenta axială a forței de deformare;

g - grosimea foii de tablă;

g_f – grosimea finală a suprafeței deformate;

g_i - grosimea inițială a semifabricatului;

H - înălțimea trunchiului de con;

Hpl - parametrul asociat grosimii plăcii suport, în fișierul de intrare ANSYS;

k - reprezintă numărul de poziții sau puncte de interpolare pe care scula le parcurge;

k_1, k_2, k_3 – coeficienți ai modelelor matematice obținute în urma aplicării analizei de regresii;

L_0 - lungimea inițială a epruvetei ramase libere între bacurile mașinii;

L_i - lungimea instantanee a epruvetei ramase libere între bacurile mașinii;

n - turația sculei;

R^2 – coeficientul de determinație;

r2 – replica 2 pentru piesele deformate în cadrul planului de experimente;

Rpl - parametrul asociat razei de racordare a găurii plăcii suport, în fișierul de intrare ANSYS;

S – deviația standard;

Sp - spațiu dintre placa suport și peretele piesei;

S spec. - sculă specială;

S_0 - aria secțiuni inițială a epruvetei;

S_i - aria secțiunii instantanee a epruvetei;

SN - sculă normală;

timp - parametrul individual necesar descrierii traiectoriei sculei în ANSYS APDL;

TTime - parametrul de tip mulțime pentru indicarea timpului fiecărei poziții a sculei;

UUX - parametrul de tip mulțime pentru indicarea poziției sculei pe coordonata X;

UUY - parametrul de tip mulțime pentru indicarea poziției sculei pe coordonata Y;

UUZ - parametrul de tip mulțime pentru indicarea poziției sculei pe coordonata Z;

v - viteza de avans a sculei;

V_0 – volumul inițial de material dintre bacurile mașinii de încercat;

V_i – volumul instantaneu de material dintre bacurile mașinii de încercat;

Δl – alungirea epruvetei;

μ - coeficient de frecare;

α - unghiul de deformare;

α_{max} - valoarea maximă a unghiului de deformare;

Δz - pas incremental;

ε – deformație convențională;

ε_1 / ε_{min} - deformație limită minima;

ε_2 / ε_{max} - deformație limită maximă;

ε_{real} - deformație reală;

ν - coeficientul lui Poisson;

ρ - densitate

σ - tensiune convențională;

σ_c - limita de curgere convențională;

$\sigma_{c\text{-}real}$ - limita de curgere convențională reală;

σ_r - rezistența la rupere convențională;

σ_r - tensiune radială sau normală;

σ_{real} - tensiune reală;

$\sigma_{r\text{-}real}$ - rezistența la rupere convențională reală;

σ_θ - tensiune circumferențială;

σ_φ - tensiune meridională;

$\tau_{r\theta}$ - tensiune de forfecare de-a lungul direcției θ;

$\tau_{r\varphi}$ - tensiune de forfecare de-a lungul direcției r;

$\tau_{\theta\varphi}$ - tensiune de forfecare de-a lungul direcției φ.

LISTA DE ABREVIERI

AISF - Asymmetric Incremental Sheet Forming;

APDL - ANSYS Parametric Design Language;

CAD - Computer Aided Design;

CAM - Computer Aided Manufacturing;

CATIA - Computer Aided Three-dimensional Interactive Application;

CNC - Computer Numerical Control;

DOE - Design of experiments;

DSIF - Double Side Incremental Forming;

FEM - Finite Element Method;

FLC - Forming Limit Curve;

FLD - Forming Limit Diagram;

FOSS - Forming One Way Surface to Surface;

ISF - Incremental Sheet Forming;

SIF - Symmetric Incremental Forming;

SLA - Sequential Limit Analysis;

SPIF - Single Point Incremental Forming;

TMPG - Tool Motion Points Generator;

TPIF - Two Point Incremental Forming.

INTRODUCERE

Domeniul presării la rece se ocupă cu studiul proceselor și al procedeelor de prelucrare ale metalelor prin deformare plastică, tăiere sau combinații ale acestora, fără obținere de așchii așa cum este cazul procedeelor de prelucrare prin așchiere [BOL14]. Procedeele convenționale de presare la rece permit fabricarea de piese în serie mare și de masă, fiind foarte bine proiectate și dezvoltate, având un nivel ridicat de mecanizare și automatizare, deci o productivitate ridicată, dar un nivel de flexibilitate scăzut. Există însă și procedee de presare la rece care au un grad mai mare sau mai mic de flexibilitate. În domeniul presării la rece au fost dezvoltate și sunt îmbunătățite mai multe procedee flexibile de prelucrare, unul dintre cele mai flexibile fiind deformarea incrementală a tablelor (Incremental Sheet Forming - ISF). Acesta este un procedeu relativ nou pe piață, folosit pentru deformarea pieselor din tablă metalică și nu numai, ce permite fabricarea de piese în serie mică și mijlocie, prototipări rapide și producția de unicate. În timp ce procedeele convenționale de prelucrare a tablelor sunt dependente de seturi de scule dedicate (dispozitive și matrițe) pentru fiecare piesă în parte, deformarea incrementală este un procedeu de prelucrare *fără matriță*, utilizând pentru deformare o sculă simplă și relativ ieftină, universală, pentru fabricarea mai multor tipuri diferite de produse [NAS17a]. Utilizând acest procedeu de prelucrare, costurile și timpul de dezvoltare de la proiectare până la fabricația efectivă a pieselor, sunt semnificativ diminuate în comparație cu utilizarea procedeelor convenționale de presare la rece, în cazul prelucrării unui lot mic sau mediu de piese.

Deformarea incrementală presupune o deformare plastică locală a semifabricatului din tablă, pe o suprafață mică de contact dintre o sculă de deformare și tabla care este fixată într-un dispozitiv de prindere. Scula de deformare este, în cele mai multe cazuri, o tijă de secțiune circulară având partea activă de forma semisferică, aceasta executând o deplasare stabilită și deformând tabla după o traiectorie comandată numeric, urmărind conturul exterior al piesei finale. Dacă este necesară deformarea unui alt tip sau dimensiune de piesă, în cele mai multe cazuri este nevoie doar de schimbarea programului de conducere numerică a traiectoriei sculei după conturul piesei noi, dispozitivul de fixare rămânând neschimbat dacă gabaritul noului reper permite acest lucru. Deformarea incrementală folosește principiul prelucrării pe straturi sau niveluri. Piesa este împărțită virtual, în mai multe niveluri în direcția axei sculei, urmând ca la fiecare nivel în parte, scula să urmeze un traseu programat numeric (CNC – Computer Numerical Control), reprezentând conturul exterior al piesei. Pe traseul parcurs de sculă, aceasta va realiza deformații plastice locale, pe o suprafață mică, la contactul cu foaia de tablă care este fixată în dispozitivul de prindere. Distanța, în direcția de deformare, dintre două niveluri succesive se numește increment sau pas incremental. După ce deformarea pe un nivel a fost terminată, scula coboară la nivelul următor și operația se repetă, până când rezultă piesa finală. În consecință, adaptarea acestui procedeu pentru producția de noi piese este facilă și mult mai rapidă decât în cazul procedeelor convenționale de presare la rece, având în același timp un cost substanțial mai mic comparativ cu acestea [NAS17a].

Înaintea apariției procedeului de deformare incrementală a tablelor, în domeniul presării la rece, au fost utilizate alte două procedee: deformarea prin întindere sau tragerea pe calapod și deformarea rotativă. Noul procedeu combină o serie de avantaje ale celor două procedee predecesoare, cu tehnologia CNC (mașini și traiectorii ale sculelor conduse numeric), devenind unul dintre cele mai flexibile și ușor de implementat procedee în domeniul industriei de deformare plastică la rece [NAS17a].

1 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL DEFORMĂRII INCREMENTALE A PIESELOR DIN TABLĂ

1.1 Principiul de lucru al deformării incrementale

În deformarea incrementală a tablelor, forma sculelor și echipamentelor necesare aplicării deformării este foarte simplă și totodată având un cost redus de materializare. După cum a fost specificat în introducere, pentru implementarea acestui procedeu în producție, sunt necesare următoarele elemente: tabla ce urmează să fie deformată, sculă care realizează deformarea denumită deseori și poanson, dispozitivul de fixare a tablei în poziția de deformare. După cum se poate observa în figura 1.1, tabla de deformat este prinsă în dispozitivul de fixare între placa de așezare sau, după caz, placa suport dacă aceasta există, și inelul de reținere sau placa de prindere [JES08]. Deformarea tablei este realizată de o sculă cilindrică ce are o formă semisferică a parții active, aflată în contact cu semifabricatul. Scula este montată în arborele principal al mașinii-unelte și poate efectua trei translații după cele trei direcții x, y, z, și o rotație în jurul axei proprii [NAS17a]. Deformarea este realizată local, în zona de contact dintre sculă și semifabricat, dar și în imediata apropiere a acesteia. Scula se deplasează după o traiectorie programată numeric cu ajutorul unui soft CAM dedicat (Computer Aided Manufacturing). Parametrii tehnologici ai procedeului sunt: turația sculei n exprimată în [rot/min], viteza de avans a sculei v, exprimată în [mm/min] și distanța între două niveluri succesive denumită pas incremental Δz, exprimat în [mm]- figura 1.1.

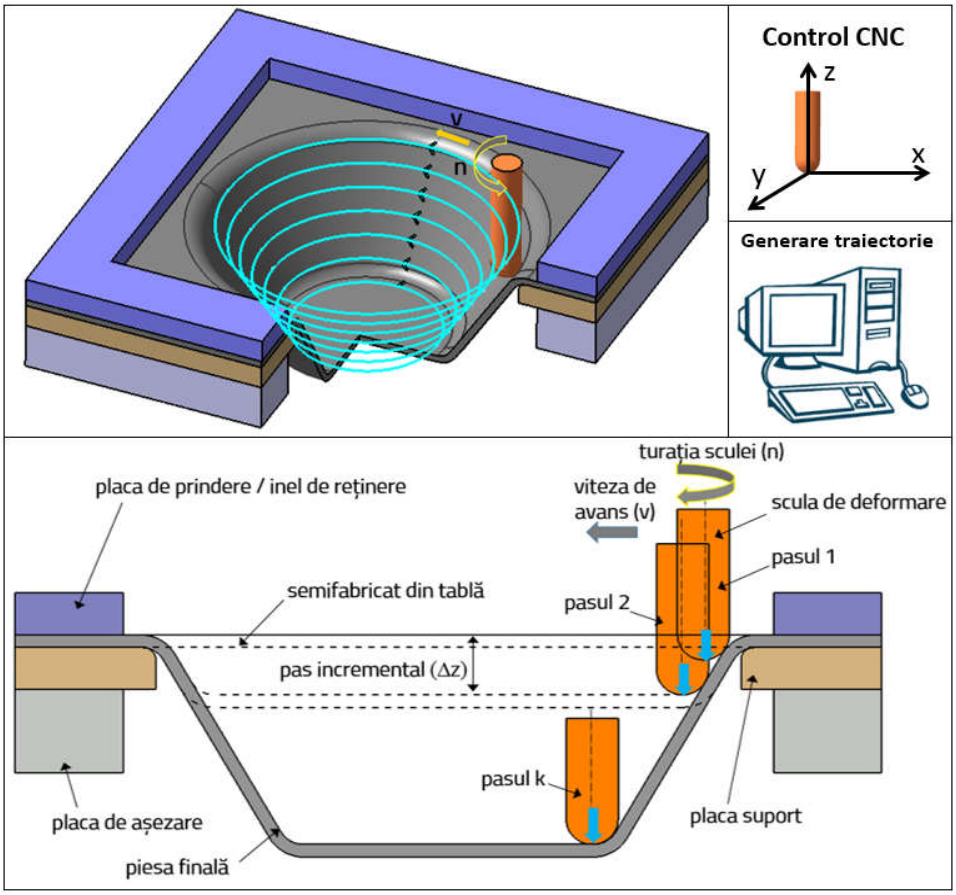


Figura 1.1 Principiul de lucru al deformării incrementale [NAS17a]

1.2 Scurt istoric. Apariția și evoluția deformării incrementale

Deformarea incrementală face parte dintr-o serie de procedee de presare la rece similar cu alte două procedee cunoscute, deformarea rotativă și deformarea prin întindere [NAS17a, GAT16], considerate a fi precursoarele deformării incrementale. În continuare sunt prezentate câteva date reprezentative în evoluția deformării incrementale [EMM10]:

1967 – sunt brevetate ideile lui Edward Leszak și a lui Walter G. Berghahn, considerate a fi începuturile deformării incrementale [LES67, BER67]. Ideile brevetate sunt descrise ca noi abordări ale deformării plastice la rece a semifabricatelor din tablă metalică ductilă, folosind seturi de scule simple, pentru fabricația pieselor de revoluție axial-simetrice, piese în formă de disc sau cupă [EMM10].

1978 - Courtesy Mason propune un procedeu care să utilizeze o rolă sferică pentru deformarea tablelor, fiind ușor de aplicat utilizând un strung, eventual cu comandă numerică [EMM10, MAS78].

1989-1993 - utilizarea mașini-unelte de frezat (convenționale și cu conducere numerică) pentru a deforma incremental piese cave asimetrice [EMM10, ISE89, ISE93].

1995 – se prezintă o variantă a procedeului ISF [MAT95], în care tabla se deplasează în direcția verticală împreună cu dispozitivul de prindere, fiind susținută în centrul piesei de un poanson fix sau de un suport pozitiv care copiază forma piesei (Two Point Incremental Forming - TPIF) [EMM10].

2002 - Timo Tuominen de la compania Twincam OY (Finlanda) [TUO04], a prezentat modalități de utilizare a roboților industriali pentru implementarea deformării incrementale [EMM10].

2002 - brevet de invenție a deformării prin ciocănire. Acestă idee, deformarea prin ciocănire, a fost adusă în discuție încă din 1997, în Japonia [EMM10, DAI98].

1.3 Aplicații industriale ale deformării incrementale

Flexibilitatea procedeului de deformare incrementală, permite să fie implementat cu succes în fabricația de serie mică a unor produse, prototipuri și produse de test din mai multe domenii industriale: [JES05a, JES08, NAS17a, TAN05]:

- industria aerospațială, pentru fabricarea de: instrumente de bord, panouri din tablă pentru învelișul exterior al avioanelor, capace de acoperire din structurile scaunelor etc.;
- industria automobilelor, pentru fabricarea de: capote, panouri de uși interioare și exterioare, capace din tablă pentru motoare, carcase pentru faruri, reflectoare etc.;
- industria electronică, pentru fabricarea de componente pentru telefoane mobile sau calculatoare;
- industria navală, pentru fabricarea de panouri exterioare;
- industria motor-sport și industria pieselor de schimb;
- industria produselor unicate sau serie mică, produse personalizate, prototipuri;
- industria medicală pentru crearea de: plăci dentare, proteze pentru gleznă sau genunchi etc. ;
- în arhitectură pentru crearea de confecții și panouri personalizate, colectoare solare etc.;
- produse pentru securitatea și apărarea națională, produse de dimensiuni foarte mici.

1.4 Configurații ale deformării incrementale

Diferite tipuri și configurații ale procedeului de deformare incrementală au fost identificate în literatura de specialitate. În funcție de forma și tipul pieselor finale ce rezultă în urma deformării, acest procedeu se poate clasifica în două categorii [NAS17a, JES05a]:

a) deformarea incrementală a pieselor axial-simetrice (*symmetric incremental forming* - SIF);

b) deformarea incrementală a pieselor asimetrice (*asymmetric incremental sheet forming* - AISF);

Având în vedere numărul punctelor de contact dintre suprafața tablei și scula / sculele care deformează sau oferă suport piesei, deformarea incrementală poate fi [NAS17a, JES05a]:

a) deformare incrementală într-un punct de contact -*SPIF* ;

b) deformarea incrementală utilizând contrapoanson;

c) deformare incrementală cu două puncte de contact – *TPIF* .

1.5 Mașini și echipamente utilizate pentru deformarea incrementală

Cele mai utilizate mașini-unelte în implementarea procedeului de deformare incrementală a tablelor sunt mașinile controlate numeric cu ajutorul calculatorului. Mașinile de frezat CNC sunt cel mai des utilizate în implementarea procedeului de deformarea incrementală a tablelor [BLA11, JES05a] deoarece prezintă numeroase avantaje cum ar fi rigiditatea ridicată, faptul că sunt utilaje flexibile de fabricație, prezintă precizie ridicată și permite deformarea și a pieselor asimetrice [JES05a]. Costul de achiziție a unei astfel de mașini este relativ mare, astfel că amortizarea investiției se face într-o perioadă îndelungată, fiind de preferat utilizarea mașinilor-unelte simple, dedicate pentru deformare incrementală. Astfel de mașini în diferite configurații sunt propuse de unii cercetători și companii [AMI14, ALV14].

În vederea implementării deformării incrementale pot fi utilizate, de asemenea, și strunguri CNC, având avantaje evidente în cazul pieselor de revoluție. Roboții industriali reprezintă o altă opțiune utilă pentru implementarea deformării incrementale, încă din anul 2002 [TUO04], când au fost pentru prima dată utilizați de cercetătorul Tuominen. Utilizarea roboților industriali prezintă avantajul flexibilității și a mobilității specifice, dar și un spațiu relativ mare de lucru.

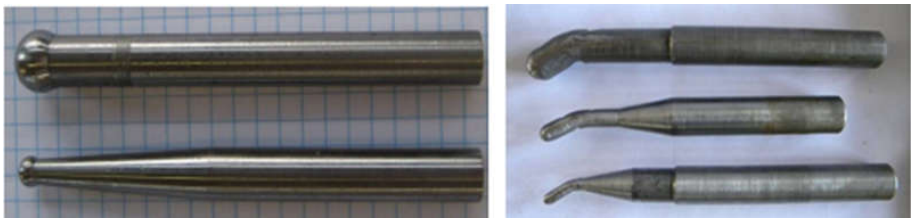
Platformele Stewart prezintă un mare potențial de dezvoltare, acestea putând fi utilizate pentru implementarea procedeului de deformare incrementală. Utilizări recente ale platformelor Stewart în domeniul deformării incrementale au fost identificate în literatura de specialitate [ALV14, TOR15, BEH17]. O analiză a mașinilor-unelte și a echipamentelor folosite pentru implementarea deformării incrementale a tablelor a fost prezentată în anul 2014 [ALV14], de către Ricardo Alves și grupul său de cercetători, într-o lucrare în care a fost prezentat inclusiv un nou concept de mașină-unealtă pentru deformarea incrementală într-un punct de contact, bazat pe platforme Stewart.

1.6 Scule utilizate pentru deformare

În cadrul sistemului tehnologic necesar implementării procedeului de deformare incrementală a tablelor, unul dintre cele mai importante roluri îl are scula folosită pentru deformare. Aceasta intră în contact direct cu semifabricatul care se deformează, fiind elementul activ al procedeului. Pentru procedeul de deformare SPIF, s-a constatat că se folosesc mai multe tipuri de scule [NEA15, BLA11]:

- scule *rigide* de deformare - confecționate dintr-un material solid: de tip rolă sau de tip poanson;
- scule *flexibile* de deformare: jetul de apă, fasciculul laser sau jetul de bile.

Printre cele mai folosite scule în deformarea incrementală atât a pieselor asimetrice, cât și a pieselor axial-simetrice sunt sculele rigide de tip poanson, având forme diverse [NEA13, VAN09]: scule drepte (figura 1.2a) sau scule îndoite (figura 1.2b) utilizate de unii cercetători pe strunguri CNC.



a) scule drepte și conice *b) scule îndoite la capăt*

Figura 1.2 Configurații de scule rigide pentru deformare incrementală [VAN09, NEA13]

La rândul lor, sculele rigide pot fi și ele clasificate în: scule monobloc sau scule compuse din două sau mai multe componente. Sculele monobloc sunt sculele confecționate dintr-o singură componentă, de obicei o tijă simplă având partea activă racordată (figura 1.2a). La contactul dintre aceste tipuri de scule si tabla de deformat există o forță de frecare de alunecare. Au fost identificate și scule care transformă această frecare de alunecare în frecare de rostogolire (figura 1.3), obținându-se astfel rezultate mai bune comparativ cu situația în care se utilizează scule monobloc.

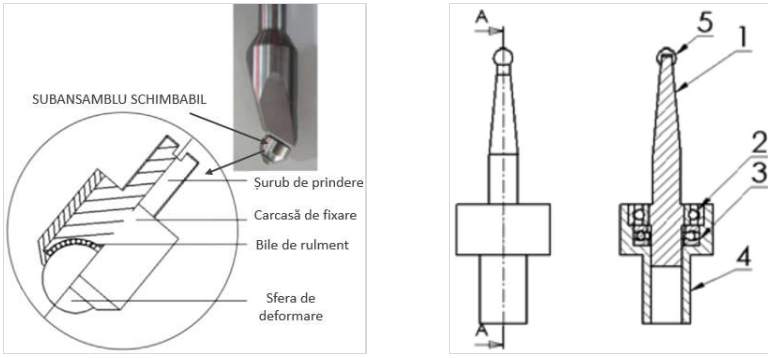
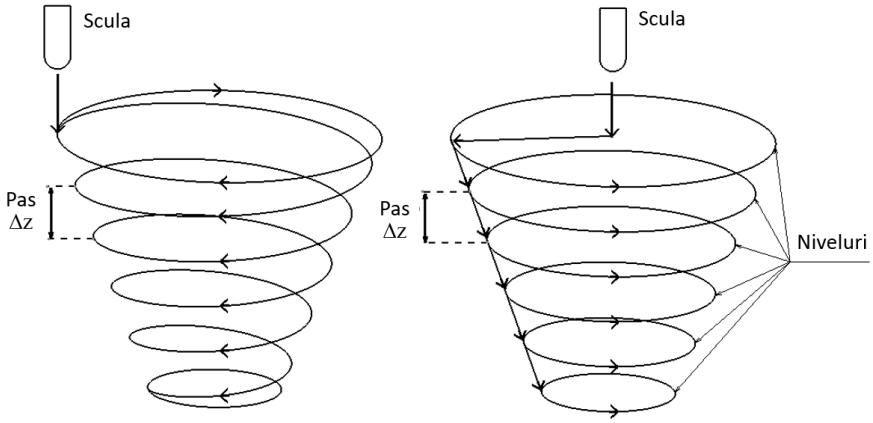


Figura 1.3 Scule care transformă frecarea de alunecare în frecare de rostogolire [LU14, BHA11]

Un alt tip de scule rigide utilizate în deformarea incrementală sunt sculele care deformează prin ciocănire verticală, întâlnită mai ales în cazul tablelor mai groase [OLE05, BLA11]. Materialul cel mai frecvent utilizat pentru confecționarea sculelor rigide de deformare este oțelul. Acesta este materialul identificat în cele mai multe aplicații, având avantajul flexibilității din punctul de vedere a tratamentelor termice care pot fi aplicate. În practică se utilizează o plajă mare de valori pentru diametrul sculelor, începând cu 6 mm, până la 100 mm, cele mai utilizate valori pentru diametrul sculelor fiind 12mm și 12.5mm [JES05a, NIM13, FIL02].

1.7 Traiectoria sculelor de deformare

O etapă importantă în vederea utilizării procedeului de deformare incrementală este stabilirea traiectoriei sculei, care este de cele mai multe ori, comandată numeric. Sunt folosite mai multe tipuri de traiectorii / strategii de deformare, cele mai des întâlnite fiind traiectorie pe niveluri (figura 1.4a) și traiectorie elicoidală (figura 1.4b) [NAS17a, LIU13].



a) traiectoria elicoidală *b) traiectoria pe niveluri*

Figura 1.4 Tipuri de traiectorii ale sculelor [NAS17a, LIU13]

Traiectoria pe niveluri se caracterizează prin aceea că piesa este împărțită în mai multe plane paralele sau niveluri de deformare, pe direcție verticală, având distanța între două plane consecutive egală cu un pas incremental *Δz*. În fiecare plan, scula urmărește o curbă reprezentând conturul exterior al piesei. În cazul traiectoriei elicoidale, scula de deformare nu urmărește o succesiune de curbe plane, ci o singură curbă în formă de elice pornind de la nivelul semifabricatului nedeformat până la capătul piesei. Pasul incremental *Δz*, va fi parametrul de bază al generării acestui tip de traiectorie, aceasta fiind distanța dintre două spire succesive ale curbei, în direcția de deformare.

1.8 Materiale utilizate în deformarea incrementală

În acest subcapitol sunt prezentate, pe scurt, cele mai des materiale utilizate pentru procesul de deformare incrementală:

- cele mai utilizate materiale - aluminiul și aliajele sale [LEH15, MUG14b, NAS17a];
- cuprul, alama și aliajele sale [FRI17, LEH15];
- oțelurile de ambutisare începând cu DC01 până la DC06 [KUR14, NEA13, LEH15];
- materiale greu deformabile în condiții normale, cum ar fi sunt aliajele de titan sau magneziu [DAL13, HIN14, BAO15, YOG18];
- metale prețioase precum aurul, platina sau argintul [JES05a];
- materiale plastice / polimeri [SIL10, DAV18, DUR18];
- panouri de tip sandwich, laminate compozite din tablă de aluminiu și tablă din poliamidă, sau materiale de tip spumă cu memorie [JAC08, DAV18, MOH15].

1.9 Calitatea și precizia dimensională a pieselor obținute prin deformare incrementală

Indiferent de procedeul prin care produsele de pe piață sunt fabricate, calitatea și precizia acestora sunt unii din cei mai importanți factori analizați de către consumatori. O calitate și o precizie dimensională bună a produselor, conduce la satisfacerea cerințelor clienților și menținerea produselor respective pe piață. În cazul deformării incrementale, aceste caracteristici ale pieselor obținute sunt, de asemenea, atent studiate. Cele mai importante aspecte din punctul de vedere a calității și acurateții produselor obținute prin deformare incrementală: calitatea și rugozitatea suprafețelor, distribuția grosimii pereților și efectele fenomenului de revenire elastică asupra preciziei dimensionale.

1.9.1 Rugozitatea suprafețelor obținute prin deformare incrementală

Unul dintre cele mai importante aspecte în industria presării la rece în general, deci și a pieselor obținute prin deformare incrementală în particular, este calitatea suprafețelor care se reflectă, în special, prin rugozitatea suprafețelor obținute. O înălțime mică a neregularităților obținute pe suprafețele deformate oferă o suprafață finală uniformă, în concluzie o calitate bună a acestora [GAT16]. Se urmărește cu prioritate analiza suprafețelor piesei aflate în contact direct cu scula, adică a celor de pe partea pe care s-a realizat efectiv deformarea. Rugozitatea suprafețelor obținute prin deformare incrementală este direct influențată de următorii factori [CAV10, GAT16, JES05a]:

- pasul incremental - Δz;
- valoarea diametrului sculei de deformare - d;
- unghiul de înclinare al peretelui piesei sau unghiul de deformare - α;
- turația sculei - n;
- traiectoria urmată de sculă;
- rugozitatea suprafeței părții active a sculei;

1.9.2 Variația grosimii pereților obținuți prin deformare incrementală

În cadrul procedeului de deformare incrementală, fenomenul propriu-zis de deformare are loc prin întinderea și redistribuirea materialului rămas liber între plăcile dispozitivului de fixare. Astfel, volumul de material al piesei finale este identic cu volumul inițial al semifabricatului din tablă [NAS17a]. Neajunsul deformării incrementale, din acest punct de vedere, constă în faptul că grosimea pereților rezultați nu este uniformă. Pentru aproximarea subțierii și a grosimii pereților obținuți prin deformare rotativă dar și incrementală, este folosită o relație matematică, denumită legea sinusului [NEA14]:

$$g_f = g_i \sin(\alpha) \tag{1.1}$$

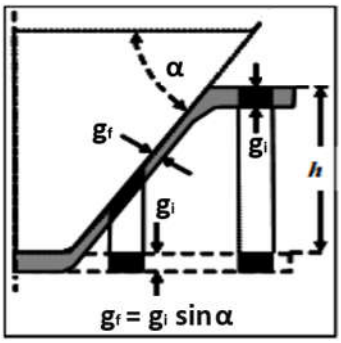
în care:

g_f – grosimea finală a suprafeței deformate;

g_i - grosimea inițială a semifabricatului;

α – unghiul de deformare.

Pe scurt, interpretarea acestei relații (conform figurii 1.5) este aceea că, o unitate din volumul semifabricatului nedeformat reprezintă proiecția aceleiași unități pe suprafața înclinată la unghiul α al piesei [BAM10]. Nu este dovedit însă, că această lege a sinusului poate prezice o valoare apropiată de valoarea reală a subțierii sau a distribuției grosimii pereților obținuți prin deformare incrementală.



g_f – grosimea finală a peretelui piesei;

g_i – grosimea inițială a tablei;

α - unghiul de deformare;

Figura 1.5 Legea sinusului și parametrii acesteia [JES05a]

De-a lungul cercetărilor desfășurate în domeniul deformării incrementale, s-au făcut eforturi mari în vederea identificării factorilor care influențează fenomenul de subțiere a pereților pieselor, cu scopul de a anticipa și a reduce amplitudinea acestuia. Doi cercetători, Han și Mo [HAN08], au ajuns la concluzia că reducerea pasului incremental Δz și creșterea unghiului de deformare și a diametrului sculei, poate conduce la reducerea subțierii materialului, și se poate obține o distribuție mai omogenă a grosimii pereților. O altă metodă dovedită a fi utilă în vederea micșorării subțierii pereților este deformarea utilizând mai multe treceri ale sculei. În lucrarea [VER08], se prezintă modul în care s-au prelucrat piese în formă de trunchi de con executate din mai multe treceri, fiecare trecere având o diferență a unghiului de deformare (α) de 10º. Utilizând o traiectorie din mai multe treceri, se poate obține o subțiere mai mică a pereților comparativ cu utilizarea unei singure trecere.

Noi metode de îmbunătățire a distribuției grosimii pereților sunt cercetate și dezvoltate, una dintre acestea fiind realizarea deformării incrementale simultan pe ambele părți ale tablei (procedeul DSIF). Folosind această metodă, se poate controla mai ușor deformarea materialului, din punctul de vedere al uniformizării grosimii pereților. A fost demonstrat că această soluție poate îmbunătăți atât distribuția grosimii cât, și acuratețea pieselor obținute [LU15, ZHA15a].

1.9.3 Precizia dimensională a pieselor obținute prin deformare incrementală

Unul dintre cele mai mari neajunsuri ale procedeelor de deformare incrementală este precizia dimensională a pieselor obținute. Efectul de revenire elastică, cunoscut în literatura de specialitate sub numele de *springback effect*, este una din cauzele principale ale problemelor de obținere a unei bune precizii dimensionale utilizând deformarea incrementală. Au fost identificate mai multe soluții pentru îmbunătățirea preciziei pieselor prin reducerea efectului de revenire elastică și nu numai:

- utilizarea unei plăci suport (figura 1.1) care să susțină flanșa semifabricatului până în imediata apropiere a suprafeței pereților înclinați [ESS11];
- extinderea traiectoriei urmate de scula de deformare, inclusiv pe fundului piesei, va reduce așa numitul *efect de pernă* (pillow effect) [ISI16, ESS11];

- utilizarea unui diametru mic al sculei, și o valoare mică a pasului incremental Δz [AMB03, OLE10];
- utilizarea unei strategii de deformare din mai multe treceri [DUF05a, DUF07b];
- corectarea traiectoriei parcurse de sculă și compensarea abaterilor dimensionale prin reluarea procesului cu noua traiectorie corectată;
- utilizarea analizelor cu elemente finite (Finite Element Method - FEM) pentru definirea abaterilor dimensionale și corectarea acestora [ESS11, HAN11];
- utilizarea a două scule care să acționeze pe ambele părți ale piesei [OTS18];
- utilizarea ca suport al tablei pe partea opusă deformării, a unui set de bolțuri filetate care pot fi amplasate în diferite poziții și la diferite înălțimi, într-o placă prevăzută cu o rețea de găuri [PAN17];
- încălzirea semifabricatului pentru a îmbunătății plasticitatea materialului, cu scopul reducerii abaterilor piesei finale [JES08].

În aplicațiile reale ale deformării incrementale, majoritatea pieselor sunt supuse unei operații de tundere a flanșei piesei, cu ajutorul căruia acestea au fost fixate în dispozitivul de prindere [BEH17]. În urma acestei operații, apare o abatere semnificativă a geometriei piesei, datorate unei reveniri elastice globale și a unor tensiuni de compresiune acumulate în timpul procesului de deformare [BEH17]. Aceste abateri pot fi micșorate aplicând piesei un tratament termic de detensionare [BEH16].

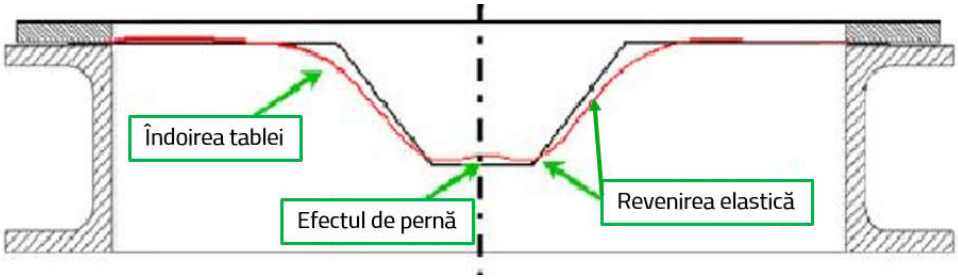


Figura 1.6 Principalele erori cu influențe asupra preciziei dimensionale [MIC07]

În concluzie, precizia pieselor obținute prin deformare incrementală este în general influențată de [MIC07]: apariția fenomenului de revenire elastică, îndoirea tablei (deformație plastică nedorită) în apropierea razei superioare a pieselor, și de apariția efectului de pernă care se remarcă printr-o bombare a tablei pe fundul piesei, atunci când scula nu deformează și această zonă (figura 1.6).

1.10 Deformabilitatea materialului în procesele de deformare incrementală

Deformabilitatea reprezintă capacitatea unui material de a fi deformat plastic, pentru a lua o formă dată, fără să apară defecte în piesă [BAN90]. În timpul deformării incrementale, semifabricatul este solicitat la întindere atât pe direcție radială cât și pe direcție circumferențială [NEA15]. Este bine cunoscut faptul că atât comportarea materialului cât și deformabilitatea, în cazul procedeelor de deformare incrementală, pot fi descrise prin valoarea maximă a unghiului de deformare α_{max}, până la care procesul de deformare se poate efectua în bune condiții, fără să apară ruperea materialului [NAS17a, FIL02, JES05a, JES05c]. In deformarea incrementală a tablelor, valoarea maximă unghiului de

deformare al pereților înclinați este influențat de valoarea pasului incremental – Δz, turația sculei – n, valoarea diametrului sculei – d și grosimea foii de tablă - g [JES05a].

O altă modalitate a descrierii deformabilității materialelor este consultarea diagramelor limită de deformare (forming limit diagram - FLD) care conțin curbe limită de deformare (forming limit curve - FLC). Curbele limită de deformare descriu valorile maxime ale deformațiilor pe care le suportă materialul, fără apariția fenomenului de rupere [TER12]. Aceste curbe se determină pe cale experimentală prin trasarea de puncte de coordonate ε_1 și ε_2 sau ε_{min} și ε_{max}, acestea fiind deformațiile limită, minime și maxime. În literatura de specialitate se precizează că diagramele limită de deformare ce conțin curbe limită de deformare în forma literei V folosite pentru procedeele convenționale de presare la rece sunt inutilizabile în cazul deformării incrementale [GAT18]. Mai mulți cercetători au dezvoltat curbe limită de deformare dedicate acestor procedee [FIL02, JES05c]. Curba limită de deformare poate fi trasată măsurând cele două componente ale deformațiilor, deformația minimă ε_{min} și maximă ε_{max} [MUG14b]. Analizând curbele limită de deformare pentru aplicațiile deformării incrementale, se poate concluziona că utilizând acest procedeu pot fi obținute deformații ale materialelor, net superioare celor obținute utilizând procedee convenționale de prelucrare a tablelor.

1.11 Tensiunile și deformațiile în cadrul procedeelor de deformare incrementală

În cadrul procedeelor de deformare incrementală, scula urmează o traiectorie definită de utilizator, parcurgând conturul exterior al piesei și deformând pas cu pas materialul semifabricatului din tablă. În timpul deformării, în material apar tensiuni urmate de deformații, acestea reprezentând unul dintre cele mai importante criterii în anticiparea eventualelor ruperi ale materialului [NAS17a].

În urma experimentelor realizate de o serie de cercetători [JAC09], s-a ajuns la concluzia că materialul este supus la întindere și forfecare într-un plan orizontal, perpendicular pe direcția de deformare, și doar la forfecare într-un plan paralel cu direcția de deformare. Cel mai semnificativ efect, dintre componentele deformațiilor, îl are forfecarea în direcția de acțiune a sculei. În același timp, toate componentele deformațiilor cresc, se acumulează cu fiecare nivel parcurs de sculă, până la obținerea piesei finale. Sunt definite trei componente ale tensiunilor: tensiunea radială sau normală σ_r, tensiunea circumferențială σ_θ și tensiunea meridională σ_φ, de-a lungul direcțiilor lor de acțiune r, θ și respectiv φ [LU14]. Experimentele au arătat că tensiunile de forfecare $\tau_{r\theta}$ cauzează fisurarea peretelui piesei, în direcție circumferențială, fiind considerat efectul dominant de forfecare. Celelalte două componente ale forfecării, $\tau_{r\varphi}$ și $\tau_{\theta\varphi}$ sunt neglijate deoarece nu au un efect evident asupra deformațiilor plastice ale materialului. Tensiunea aplicată de sculă asupra grosimii piesei, σ_r, este distribuită egal de-a lungul direcției circumferențiale în punctul de contact cu semifabricatul [LU14]. De asemenea, s-a dedus că ruperea apare mai întâi pe suprafața exterioară a peretelui piesei, acolo unde tensiunile de întindere sunt mai mari, la trecerea dintre zona de contact și zona de non-contact cu scula.

1.12 Forțe în cadrul procesului de deformare incrementală

Forțele dezvoltate în cadrul procedeele de deformare incrementală au fost și sunt în continuare cercetate, datorită influențelor acestora asupra limitărilor procedeului [NAS17a]. Cercetări teoretice asupra forțelor au fost întreprinse [BLA11], pe baza unor studii anterioare publicate [ISE01b, OLE05], fiind prezentate relații matematice pentru calcularea acestora, pentru fiecare pas incremental [BLA11].

Componentele forței ce acționează asupra tablei sunt [JES05a, AER10] (figura 1.7):

- *Fx* sau *Fr* – componenta radială ce acționează pe direcție perpendiculară cu direcția de deformare;
- *Fy* sau *Ft* –componenta tangențială ce acționează pe o direcție perpendiculară cu axa piesei;
- *Fz* sau *Fa* – este componenta axială a forței ce acționează în direcția de deformare (axa piesei).

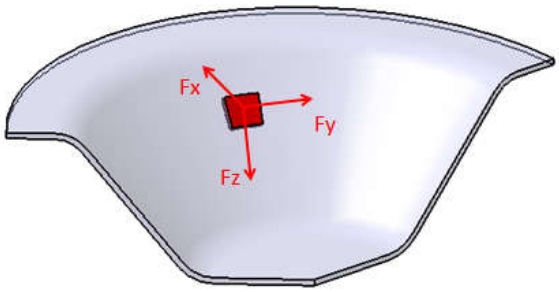


Figura 1.7 Componentele forțelor care acționează pe suprafața de contact

Un grup de autori [DUF05b], au efectuat o cercetare experimentală, deformând incremental într-un punct de contact, piese de forma unor trunchiuri de con. În urma măsurătorilor forțelor dezvoltate în timpul procesului, au fost elaborate următoarele concluzii privind parametrii sau factorii de influență:

- creșterea diametrului sculei are ca efect creșterea forțelor de deformare necesare;
- dacă unghiul pereților înclinați crește, forțele necesare deformării au valori mai mari;
- crescând valoarea pasului incremental și valorile forțelor de deformare vor crește.

Cele precizate anterior sunt confirmate și de alte cercetări [AER10], care, în plus, scot în evidență și influența grosimii semifabricatului asupra forțelor dezvoltate. Cu cât grosimea foii de tablă utilizată este mai mare, cu atât crește și amplitudinea forțelor necesare deformării.

1.13 Avantajele și dezavantajele deformării incrementale a tablelor

Ca oricare alt procedeu de prelucrare, deformarea incrementală prezintă o serie de avantaje dar și câteva dezavantaje, identificate în urma unei comparații cu procedee similare din domeniul presării la rece, cum ar fi ambutisarea sau deformarea rotativă. Cele mai importante avantaje sunt următoarele [EMM10, JES05a, KUM14, NAS17a, ORA10]:

- prin deformare incrementală pot fi deformate piese pornind direct de la modelul 3D al acesteia, utilizând un minim de scule și echipamente;
- procedeul nu necesită semi-matriță superioară sau inferioară fiind un *procedeu fără matriță;*
- modificările de dimensiune sau de formă ale pieselor pot fi ușor și rapid implementate în fabricație;
- utilizând acest procedeu, fabricarea rapidă a prototipurilor din tablă este facilă;

- deformarea plastică locală a tablei, realizată pas cu pas, contribuie la creșterea deformabilității materialului, fiind un procedeu potrivit pentru prelucrarea tablelor greu deformabile;
- cu ajutorul acestui procedeu se pot obține alungiri mai mari ale materialului;
- procedeul poate fi implementat folosind ca mașină-unealtă orice mașină de frezat sau strung CNC;
- gabaritul pieselor care se pot deforma este limitat doar de spațiu de lucru al mașinii-unelte utilizate;
- forțele necesare deformării tablei sunt relativ constante, indiferent de dimensiunile piesei;
- este un procedeu silențios, având un nivel de zgomot foarte scăzut;
- utilizând o mașină de frezat CNC, pot fi deformate incremental inclusiv piese asimetrice.

Dintre dezavantaje, se pot menționa [JES05a, KUM14, NAS17a, ORA10]:

- timpul mare de deformare cauzat de traiectoria lungă și complicată a sculei de deformare;
- procesul este pretabil sau chiar limitat la producția unor loturi mici de fabricație;
- deformarea pieselor cu pereți înclinați la 90° nu pot fi realizați dintr-o singură trecere;
- fenomenul de revenire elastică influențează precizia dimensională a pieselor.

1.14 Concluziile referitoare la stadiul actual al cercetărilor privind deformarea incrementală a pieselor din tablă

În acest capitol au fost prezentate noțiunile de bază din domeniul deformării incrementale, cât și cele mai importante subiecte studiate în literatura de specialitate, legate de acest procedeu de deformare.

Având în vedere numeroasele avantaje oferite, deformarea incrementală a fost cercetată intens în ultimii ani, făcându-se astfel pași mari în evoluția procedeului. La acest moment, acesta nu este suficient de stabil și precis ca procedeele clasice de deformare a tablelor, pentru a fi utilizat, de către marii producători din industrie. Așadar, viitoare investigații și cercetări sunt necesare.

În urma parcurgerii literaturii de specialitate (220 de surse bibliografice, dintre care 210 au legătură directă cu procedeul ISF, prezentate în secțiunea Bibliografie) se conturează ca posibile direcții de cercetare în domeniul deformării incrementale, următoarele [NAS17a]:

- identificarea de noi soluții pentru compensarea abaterilor și îmbunătățirea preciziei dimensionale;
- dezvoltarea unor diagrame limită de deformare pentru diferite tipuri de materiale;
- identificarea unor noi metode de creștere a deformabilității materialului;
- determinarea de modele matematice între parametrii de proces și calitatea sau precizia dimensională a pieselor deformate;
- utilizarea de noi metode în urma cărora să rezulte o distribuție cât mai uniformă a grosimii;
- standardizarea sculelor sau chiar dezvoltarea de noi modele de scule;
- îmbunătățirea analizelor FEM în sensul diminuării timpilor de analiză și a complexității de aplicare;
- studiul efectului aplicării unor tratamente termice, pentru reducerea tensiunilor reziduale sau a efectului de revenire elastică, cu îmbunătățirea preciziei dimensionale.

2 OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Deformarea incrementală este un procedeu de fabricație a pieselor din table metalice, dar nu numai, din ce în ce mai utilizat în domeniul industrial. Implementarea acestuia în fabricația de produse, este avantajoasă în special pentru producția de serie mică și unicate. Deformarea incrementală nu este încă foarte atractivă pentru marile companii industriale, performanțele acestui procedeu de deformare fiind mai scăzute comparativ cu alte procedee de fabricație din domeniul presării la rece. Din acest motiv, un număr mare de cercetători încearcă să aducă procedeului, o serie de îmbunătățiri în vederea creșterii performanțelor ce pot fi obținute prin aplicarea acestuia.

În urma analizei efectuate asupra literaturii de specialitate din domeniul deformării incrementale, prezentate în capitolul anterior, autorul și-a stabilit următorul obiectiv principal al investigațiilor științifice:

Desfășurarea unor cercetări referitoare la îmbunătățirea preciziei dimensionale a pieselor cave fabricate din tablă de oțel pentru ambutisare DC05, prin procedeul de deformare incrementală într-un punct de contact.

În vederea îndeplinirii obiectivului principal, se urmărește realizarea următoarelor obiective derivate:

a) Cercetări referitoare la simularea numerică a procesului de deformare incrementală într-un punct de contact:
   - analiza cu elemente finite în ANSYS/LS-DYNA a procesului de deformare incrementală, pentru piese în formă de trunchi de con, utilizând fișiere de date parametrice;
   - elaborarea unui instrument software care să permită generarea rapidă a datelor necesare descrierii traiectoriei sculei în ANSYS APDL în vederea simulării procesului de deformare incrementală;
b) Cercetări experimentale privind îmbunătățirea preciziei pieselor fabricate prin deformarea incrementală într-un punct de contact:
   - determinarea proprietăților reale ale tablei din oțel pentru ambutisare DC05, din care se fabrică piesele pentru cercetarea experimentală;
   - proiectarea, simularea, îmbunătățirea și fabricarea unui dispozitiv de fixare a semifabricatelor din tablă, astfel încât acesta să poată fi utilizat cu rezultate bune în procesul de deformare incrementală;
   - stabilirea limitărilor procedeului de deformare incrementală, pentru materialul oțel de ambutisare DC05, în condițiile utilizării unei scule normale de deformare;
   - conceperea și realizarea practică a unei scule speciale pentru deformare incrementală, care folosește principiul de lucru al ciocănirii circumferențiale, cu efecte pozitive asupra preciziei pieselor fabricate;
   - efectuarea unor cercetări utilizând *Design of experiments – DOE*, în vederea determinării unor modele matematice prin care să se poată calcula precizia obținută utilizând scula specială, în funcție de viteza de avans și turația sculei.

3 SIMULAREA PROCESULUI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ UTILIZÂND METODA ELEMENTELOR FINITE

3.1 Introducere în metoda elementelor finite

Tendințele privind studiul teoretic al fenomenelor, proceselor, procedeelor de prelucrare și nu numai, în domeniul științelor inginerești, sunt realizate prin intermediul analizelor în mediul virtual utilizând metode cu elemente finite (FEM), acestea fiind metode de calcul și analiză a comportamentului materialelor, produselor, ansamblurilor de produse, a procedeelor de fabricație și nu numai, sub influența anumitor date de intrare, cu luarea în considerare a unor factori perturbatori. În industrie sunt simulate și analizate o serie de aspecte, de la probleme simple sau complicate de mecanică și rezistență a structurilor, până la probleme de termodinamică, curgerea fluidelor, vibrații, simularea deformării la rece sau la cald a materialelor, simularea injectării maselor plastice sau a altor materiale [DEN17, NAS18a, TRZ17]. Domeniul larg în care pot fi aplicate analizele FEM, le transformă în instrumente potrivite pentru a fi utilizate în vederea îmbunătățirii performanțelor produselor, încă din faza de proiectare [NAS18a]. Așa cum și în cazul altor procedee de prelucrare a pieselor se folosesc metode de analiză cu elemente finite pentru simularea numerică a procedeului în vederea optimizării acestuia, și în cazul deformării incrementale, având în vedere diversitatea pieselor care se pot realiza prin acest procedeu, se utilizează preponderent simulările numerice pentru a studia comportarea materialului în timpul deformării sau analiza performanțelor ce vor fi obținute, concomitent cu implementarea unor eventuale îmbunătățiri. Având în vedere beneficiile metodei elementelor finite, în cadrul cercetărilor efectuate asupra diferitelor aspecte referitoare la procedeul de deformare incrementală a tablelor, s-a utilizat această metodă virtuală, urmărind îndeplinirea obiectivele propuse în capitolul 2.

3.2 Etapele simulării numerice a procesului de deformare incrementală într-un punct de contact

În cele ce urmează sunt prezentați pașii parcurși pentru implementarea simulării FEM a procesului de deformare incrementală a tablelor, cu precădere, pentru deformarea incrementală într-un singur punct de contact. Pentru realizarea procesului de simulare efectivă, s-au parcurs trei etape [OLE05, BLA11]:

- pregătirea modelului pentru analiza FEM, în softul ANSYS APDL (etapa de preprocesare);
- analiza numerică a modelului creat anterior, în softul LS-DYNA Explicit (soluționarea problemei);
- vizualizarea și interpretarea rezultatelor în modulul Ls-PrePost (etapa de postprocesare).

Pregătirea modelului pentru analiză (modelul FEM)

În această etapă toate elementele componente ale ansamblului implicat în simulare, au fost modelate în softul ANSYS APDL (figura 3.1): semifabricatul din tablă, placa suport a semifabricatului, placa de prindere a semifabricatului și scula de deformare simbolizată sub forma unei sfere. Piesa deformată nu face parte din ansamblul de elemente componente implicat în analiza FEM, dar este ilustrată și ea în figura 3.1 pentru a face legătura cu forma pieselor pentru care este discutat și exemplificat acest subiect și anume, simularea FEM a procesului de deformare pentru piese de forma unui trunchi de con. Materialul pieselor deformate este tablă din oțel de ambutisare DC05, cu grosimea inițială de 1mm.

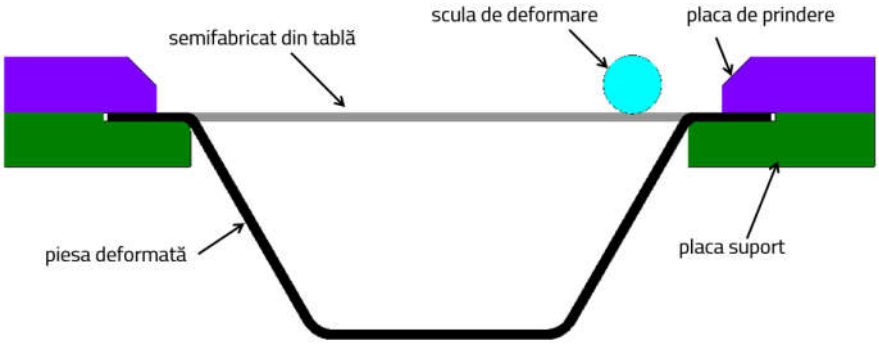


Figura 3.1 Elementele componente implicate în simulare

Pentru ca în cazul unor eventuale modificări ale dimensiunilor părților componente ale dispozitivului de fixare, sau de formă și gabarit al pieselor deformate, modelul pentru analiză să fie modificat cât mai ușor, s-a apelat la utilizarea unor parametri care conțin valori ale dimensiunilor componentelor implicate în simulare: *g* - grosimea tablei, *f* - forța de reținere, *Dp* - diametrul sculei de deformare, *Dextpl* – diametrul exterior al plăcii suport, *Dintpl* – diametrul interior al plăcii suport, *Hpl* – grosimea plăcii suport, *Rpl* – raza de racordare a găurii circulare a plăcii suport. Utilizând această pregătire parametrică a modelului FEM, utilizând parametrii și legături de dependență între componentele implicate în simulare, se creează un fișier de intrare parametrizat pentru ANSYS APDL. Pentru pregătirea fiecărei componente implicate în simulare s-au parcurs, pe rând, următorii pași:

- modelarea elementelor geometrice care definesc componentele implicate în sumulare;
- definirea a unui tip de element de tip *Thin Shell 163* pentru fiecare componentă în parte [ANS19];
- crearea *real constantelor* asociate fiecărei componente [ANS19];
- definirea materialelor pentru fiecare componentă în parte. Pentru componentele placă suport, placă de prindere și sculă de deformare, deoarece sunt declarate ca și corpuri rigide nedeformabile, au fost definite materiale având proprietățile specifice oțelurilor: densitatea ρ=7850Kg/m^3, modulul de elasticitate longitudinal E =210000 MPa și coeficientul de contracție transversală (coeficientul lui Poisson) v=0.3 [OLE05]. Pentru componenta care se deformează, aceasta fiind semifabricatul din tablă DC05, tipul de material ales este material transversal anizotropic elasto-plastic, căruia i se asociază pentru primele simulări FEM, proprietățile de material adoptate conform standardului SR EN 10130:2007 după cum urmează: limita de curgere σ_c =180 Mpa și rezistența la rupere σ_r =300 MPa, la care se adaugă densitatea ρ=7850Kg/m3, modulul de elasticitate E=210000 MPa, coeficientul lui Poisson v=0.3 [PET08];
- alocarea atributelor de discretizare pentru fiecare componentă în parte;
- discretizarea suprafețelor pentru fiecare componentă - mesh controlat, de tip *mapped* [ANS19];
- rafinarea mesh-ului doar pentru componenta *semifabricat din tablă* [ANS19];
- crearea *part-urilor* pentru fiecare din cele patru componente implicate în simulare;
- crearea parametrilor de tip mulțime (array), care descriu mișcările sculei și forța de reținere aplicată de placă de prindere asupra semifabricatului din tablă. Traiectoria sculei este descrisă, pentru fiecare poziție pe care aceasta o ocupă, de trei perechi de puncte: coordonata pe axa X în funcție de timp, coordonata pe axa Y în funcție de timp și coordonata pe axa Z în funcție de timp [NAS18a]. Descrierea forței de reținere se face prin perechi de puncte formate de parametrul *f* în funcție de

timp. În continuare, se scriu cei cinci parametri într-un format specific softului ANSYS APDL pentru ca aceștia să poată fi folosiți pentru descrierea mișcării sculei și pentru aplicarea forței de reținere:

- *UUX*, *UUY* și *UUZ* pentru poziția sculei pe coordonatele X, Y și Z;
- *TTime* pentru timp;
- *FRET* pentru forța de reținere *f*.

- aplicarea încărcărilor sculei și a plăcii de prindere. Sculei i se asociază perechi de parametri *UUX* versus *TTIME*, *UUY* versus *TTIME* și *UUZ* versus *TTIME*, aceste perechi descriind traiectoria pe care scula o parcurge, iar plăcii de prindere i se asociază perechea de parametri *FRET* versus *TTIME;*
- crearea contactelor dintre componentele implicate în simulare. Tipul de contact ales este *Form/1-way (FOSS)* sau explicit *forming one way surface to surface*, acesta fiind tipul de contact recomandat de ANSYS APDL pentru procedeele de presare la rece [NAS18a]. Coeficienții de frecare utilizați au valorile: μ=0.08 pentru contactul dintre semifabricat și sculă, respectiv placa suport [OLE05], și μ=0.15 pentru contactul dintre semifabricat și placa de prindere [PET08, STE13];
- aplicarea scalării de masă;
- selectarea tipurilor de rezultate ce se doresc a fi generate;
- generarea fișierului de ieșire, având structura *nume_ fișier.k.*

Analiza modelului pregătit anterior, în softul LS-DYNA

Fișierul de ieșire rezultat din ANSYS APDL *(nume_ fișier.k)* devine fișier de intrare pentru LS-DYNA Explicit, soft în care se va soluționa întreaga analiză în urma căreia se obțin rezultatele necesare.

Etapa de descriere a traiectoriei sculei în ANSYS APDL este o etapă mare consumatoare de timp deoarece parametrii de tip mulțime necesari sunt dificil de obținut pe cale manuală. Cu cât traiectoria sculei este mai lungă, conținând un număr mare de poziții parcurse, cu atât etapa de prelucrare a parametrilor de tip mulțime este mai greoaie și mai îndelungată. Din acest motiv, primele simulări ale procesului de deformare incrementală într-un punct de contact au fost realizate pe o serie de piese de dimensiuni reduse, scopul acestora fiind validarea metodei de implementare a traiectoriei sculei în simularea FEM, întocmai așa cum a fost ea programată numeric pentru deformările reale.

Au fost simulate șase configurații dimensionale ale piesei din figura 3.2 având valori ale unghiului de deformare α de 35°, 45° și 55°, utilizând câte două valori ale pasului incremental Δz, de 0.5 și 1.5mm.

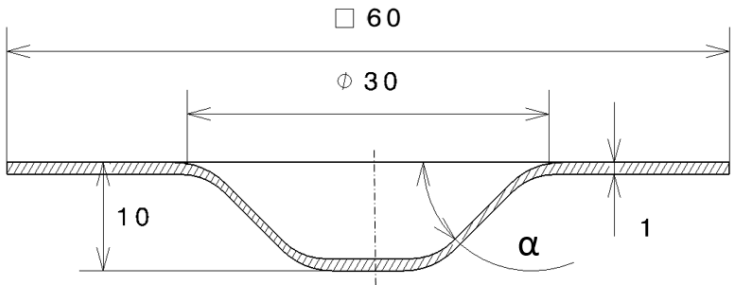


Figura 3.2 Dimensiunile și forma pieselor simulate inițial

Configurațiile de piese la care se face referire în lucrare, sunt denumite și identificate după următoarea regulă (figura 3.3): denumirea formei de piesă, *CON-*, la care se adaugă simbolul *D* urmat de valoarea

diametrului bazei mari al acestuia în [mm], alături de simbolul *H* urmat de valoarea înălțimii piesei în [mm], apoi simbolul *α* urmat de valoarea unghiului de deformare, în grade, și de simbolul *Δz* urmat de valoarea pasului incremental folosit, în [mm]. Folosind această regulă, primele configurații dimensionale ale pieselor pentru care au fost realizate simulările cu elemente finite, sunt codificate astfel:

- CON-D30H10α35Δz0.5;
- CON-D30H10α35Δz1.5;
- CON-D30H10α45Δz0.5;
- CON-D30H10α45Δz1.5;
- CON-D30H10α55Δz0.5;
- CON-D30H10α55Δz1.5.

Ansamblul de susținere și fixare a tablei prezentat în figura 3.3, este alcătuit din placa suport și placa de prindere. A fost adoptat un spațiu *Sp* de 7.5mm între placa suport și zona de început al peretelui piesei, pentru a evita eventuala rupere a semifabricatului în zona flanșei, datorate îndoirii acestuia pe zona racordată a plăcii suport. Traiectoriile folosite pentru deformarea tuturor configurațiilor sunt de formă elicoidală, având distanța dintre două spire consecutive, egală cu pasul incremental *Δz* și considerând diametrul sculei egal cu 8mm, iar turația arborelui principal al mașinii de 200 rot/min.

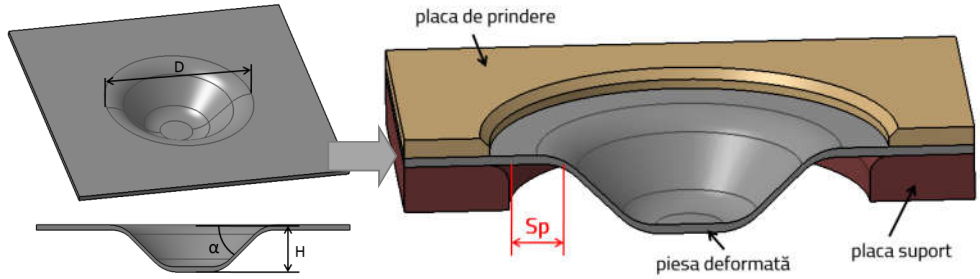
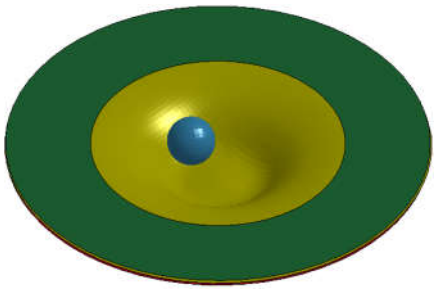
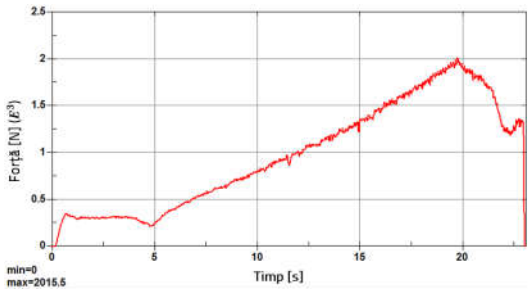


Figura 3.3 Parametrii utilizați în codificarea pieselor și spațiul Sp dintre placa suport și peretele piesei

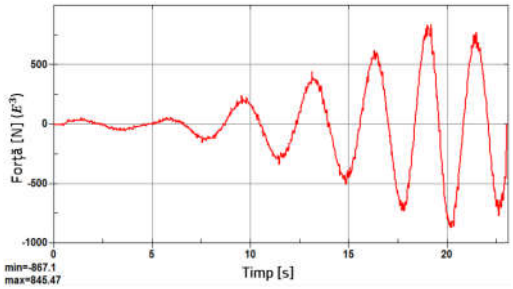
În figura 3.4 sunt prezentate rezultatele obținute în urma simulării cu elemente finite, vizualizate în modulul LS-PrePost pentru configurația CON-D30H10α55Δz1.5, iar în tabelul 3.1 sunt centralizate rezultatele obținute în urma simulării tuturor celor șase configurații de piese enumerate anterior.



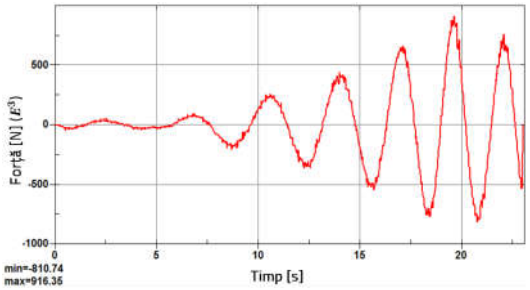
a) modelul FEM al piesei deformate



b) graficul forței axiale (Fz)



c) graficul forței radiale (Fx)



d) graficul forței tangențiale (Fy)

Figura 3.4 Rezultate FEM obținute pentru piesa de configurație CON-D30H10α55Δz1.5

Tabelul 3.1 Rezultatele forțelor obținute în urma simulărilor numerice pentru piesele de dimensiuni reduse

Configurația pieselor	Posibilitatea de a fi deformată	Valoarea forței axiale Fz [N]	Valoarea forței radiale Fx [N]	Valoarea forței tangențiale Fy [N]
CON-D30H10α35Δz0.5	Da	1521	409	394
CON-D30H10α35Δz1.5	Da	1655	520	526
CON-D30H10α45Δz0.5	Da	1785	645	668
CON-D30H10α45Δz1.5	Da	1926	756	769
CON-D30H10α55Δz0.5	Da	1929	783	832
CON-D30H10α55Δz1.5	Da	2015	857	916

În urma analizei datelor obținute prin simulările numerice, se validează metoda de descriere a traiectoriei sculei în ANSYS APDL, utilizând parametrii de tip mulțime. Însă, pentru a obține o acuratețe cât mai mare a rezultatelor, simularea numerică trebuie implementată pentru piese de dimensiuni reale, piese ce vor fi ulterior deformate în practică. De aici rezultă necesitatea micșorării timpului consumat pentru descrierea traiectoriei în ANSYS APDL și implicit a micșorării timpului necesar întregii etape de preprocesare a modelului FEM pentru analiză. Aceste neajunsuri pot fi eliminate prin intermediul unui instrument software care să convertească fișierul de conducere numerică al traiectoriei, într-un fișier care să conțină cei cinci parametrii de tip mulțime necesari descrierii mișcărilor sculei în ANSYS APDL. Acest instrument software, conceput de autor, este prezentat în detaliu în subcapitolul 3.4. Pentru a obține o precizie cât mai mare a rezultatelor, în analizele FEM se folosesc proprietățile reale ale materialului utilizat, oțel de ambutisare DC05, ce au fost determinate pe cale experimentală, rezultatele fiind prezentate în subcapitolul următor.

3.3 Determinarea experimentală a proprietăților materialului DC05

Materialul din care este confecționată tabla ce va fi folosită în procesul de deformare incrementală a unor piese în formă de trunchi de con, este oțel de ambutisare DC05, a cărui proprietăți utilizate în cadrul simulărilor numerice au fost prezentate în subcapitolul anterior, conform standardului SR EN 10130:2007. Proprietățile reale ale materialului studiat sunt foarte importante, deoarece au o mare influență asupra rezultatelor obținute în urma simulării numerice a procesului SPIF.

Furnizorul materialului DC05 oferă informații cu privire la proprietățile mecanice ale acestuia, valorile oferite fiind identice cu cele din standardul SR EN 10130:2007. În realitate, există diferențe mai mici sau mai mari ale proprietăților mecanice de la un lot la altul al aceluiași material, și chiar de la un producător la altul. S-a decis să se determine pe cale experimentală principalele proprietăți reale ale materialului DC05 pentru a asigura o acuratețe mărită a rezultatelor obținute în urma analizelor FEM.

Proprietățile de rezistență și plasticitate ale materialului DC05 sunt determinate utilizând testul de încercare la tracțiune uniaxială în conformitate cu standardul SR EN ISO 6892-1:2016. În acest sens, din foaia de tablă au fost realizate epruvete de tip halteră 1B având dimensiunile conform standardului menționat. Pentru a evita apariția erorilor și pentru a obține rezultate cât mai aproape de media proprietăților reale, au fost încercate epruvete decupate după trei direcții ale foii de tablă: în lungul direcției de laminare sau direcție longitudinală, perpendicular pe direcția de laminare sau direcție

transversală și la 45º față de direcția de laminare sau direcție oblică [ZEI18]. Vor fi încercate un număr total de 15 epruvete, câte cinci din fiecare categorie. Obținerea epruvetelor din foaia de tablă a fost realizată prin procedeul de tăiere cu jet de apă și abraziv utilizând mașina-unealtă MAXIEM 1530 disponibilă la centrul de cercetare C05A - Tehnologii și sisteme avansate de fabricație, Departamentul Ingineria fabricației, din cadrul Universității Transilvania. Cele 15 epruvete au fost numerotate în funcție de direcția în care acestea au fost decupate din foaia de tablă (figura 3.5), după cum urmează:

- E1.1, E1.2,.....,E1.5 pentru cele decupate în lungul direcției de laminare;
- E2.1, E2.2,....., E2.5 pentru cele decupate în direcție perpendiculară față de direcția de laminare;
- E3.1, E3.2,....., E3.5 pentru cele decupate la 45º față de direcția de laminare.

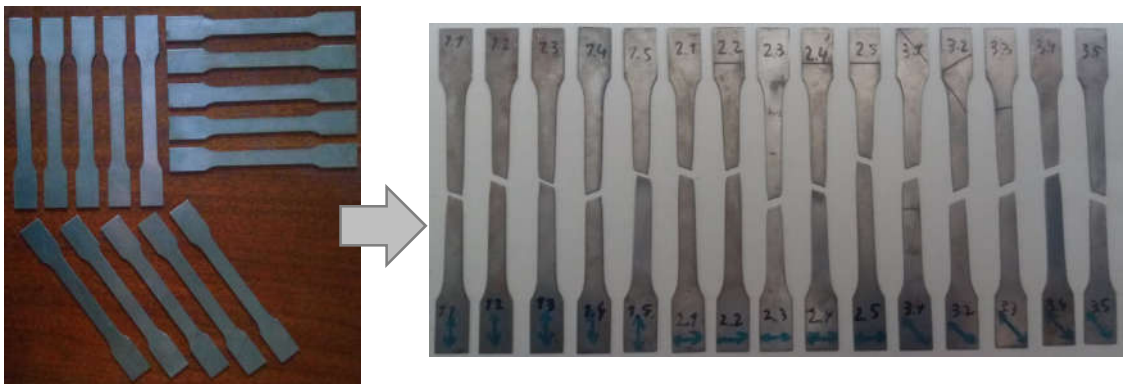


Figura 3.5 Cele 15 epruvete încercate la tracțiune uniaxială

Pentru încercările la tracțiune a epruvetelor a fost utilizată mașina LLOYD LS100 Plus împreună cu sistemul software NEXYGEN Plus, pentru gestionarea datelor obținute. După testarea celor 15 epruvete, rezultatele obținute au fost prelucrate în Microsoft Excel pentru a obține principalele date necesare introducerii în ANSYS APDL, printre care și curba caracteristică a materialului sau, mai exact, graficul tensiunilor reale versus deformații reale ale acestuia. Atât ANSYS APDL, software-ul folosit pentru pregătirea modelului FEM, cât și LS-DYNA Explicit, solverul care rulează efectiv analiza cu elemente finite, oferă posibilitatea de a utiliza ca date care caracterizează materialul, chiar curba caracteristică a acestuia, prin perechi de puncte tensiune – deformație (σ, ε). Prin urmare se utilizează în analizele FEM ale procedeului SPIF, chiar curba tensiune reală σ_{real} - deformație reală ε_{real}, obținerea acestor date de material fiind principalul obiectiv al încercării la tracțiune uniaxială efectuate.

Pentru fiecare epruvetă în parte s-au obținut un set de date, printre care și o serie de perechi de valori ale deformațiilor materialului epruvetelor, în funcție de valoarea tensiunilor la un moment dat. În urma fiecărei încercări la tracțiune, s-au generat câte 1000 de perechi de valori tensiune - deformație (σ, ε) pentru fiecare încercare în parte, valori pe baza cărora se trasează curba caracteristică a materialului pentru fiecare epruvetă încercată. După reprezentarea celor 15 curbe de material s-a ales epruveta E1.3, ca fiind cea mai aproape de media rezultatelor obținute, ale cărei proprietăți vor fi procesate în continuare. Pentru această epruvetă, pe baza datelor generate de mașina de încercare la tracțiune, au fost calculate tensiunile reale σ_{real} și deformațiile reale ε_{real}, rezistența la rupere reală $\sigma_{r\text{-}real}$ și limita de curgere reală $\sigma_{c\text{-}real}$, dar și modulul de elasticitate real E_{real}. Pe baza acestor date se realizează curba reală a materialului, curba tensiune reală σ_{real} - deformație reală ε_{real} care urmează a fi introdusă, ca perechi de puncte tensiune-deformație, pentru descrierea curbei materialului în simularea numerică a procesului de deformare.

Valoarea tensiunilor și a deformațiilor oferite de mașina de încercat sunt calculate luând în considerare o arie constantă a secțiunii S_0 a epruvetei și aceeași lungime L_0 rămasă liberă între bacurile mașinii de încercat. În timpul aplicării forței de tracțiune, atât lungimea epruvetei L_0, cât și secțiunea S_0 se modifică. Prin urmare, în fiecare moment al tracțiunii cele două mărimi vor avea valori diferite, fiind denumite în continuare, lungime instantanee L_i și suprafață instantanee S_i. Pe baza acestor valori instantanee, fiind valorile reale ale celor două mărimi, au fost calculate tensiunile și deformațiile reale ale materialului în timpul încercării la tracțiune uniaxială, fiind parcurse următoarele etape [OLE05]:

- din relația de calcul a tensiunii convenționale rezultă relația de calcul a tensiunii reale [OLE05, CIU07]:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{real} = \frac{F}{S_i} \tag{3.1}$$

- din legea volumului constant rezultă [BOL14] :

$$V_0 = V_i \quad \Rightarrow \quad S_0 L_0 = S_i L_i \tag{3.2}$$

- lungimea instantanee Li se calculează cu relația [OLE05]:

$$L_i = L_0 + \Delta l \tag{3.3}$$

- în urma relațiilor (3.2) și (3.3), rezultă că secțiunea instantanee a epruvetei S_i devine:

$$S_i = \frac{S_0}{1+\frac{\Delta l}{L_0}} \tag{3.4}$$

- deformațiile reale se calculează cu relația [CIU07]:

$$\varepsilon_{real} = \frac{\Delta l}{L_0} \tag{3.5}$$

- relația de calcul a tensiunii reale devine:

$$\sigma_{real} = \frac{F}{S_0}(1 + \varepsilon_{real}). \tag{3.6}$$

În relațiile de mai sus, simbolurile utilizate au următoarele semnificații:

σ – tensiunea convențională;

σ_{real} – tensiunea reală;

F – forța de tracțiune care solicită epruveta;

S_0 – aria secțiunii initiale a epruvetei;

S_i – aria secțiunii instantanee a epruvetei;

V_0 – volumul inițial de material dintre bacurile mașinii de încercat;

V_i – volumul instantaneu de material dintre bacurile mașinii de încercat;

L_0 – lungimea inițială a epruvetei ramase libere între bacurile mașinii;

L_i – lungimea instantanee a epruvetei ramase libere între bacurile mașinii;

Δl – alungirea epruvetei;

ε_{real} – deformația reală a materialului.

Folosind valorile calculate ale tensiunilor și deformațiilor reale ale materialului, a fost trasată curba reală a materialului (curba tensiune reală σ_{real} - deformație reală ε_{real}), prezentată în figura 3.6.

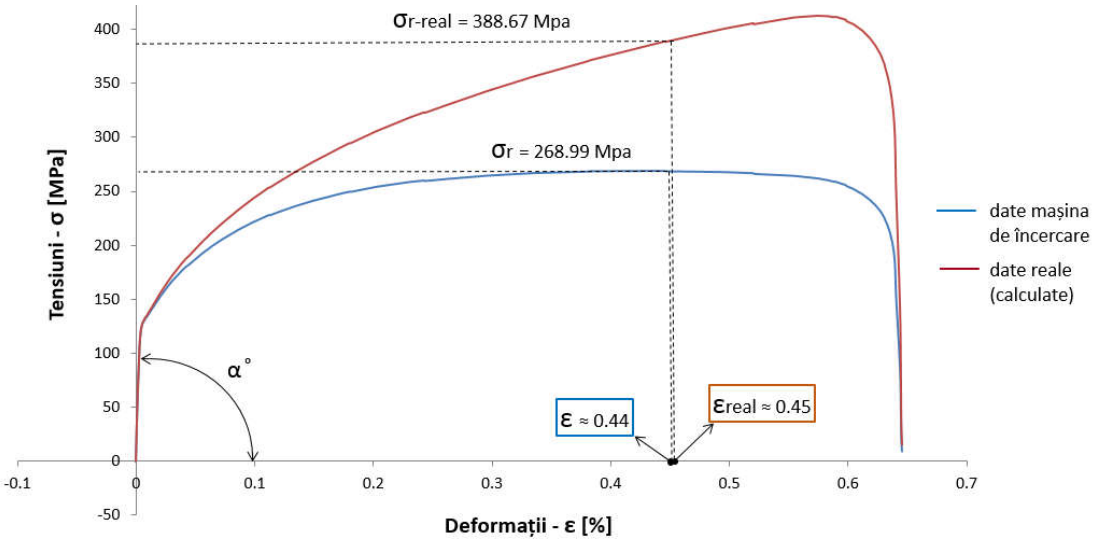


Figura 3.6 Curba materialului pentru epruveta E1.3: date furnizate de mașină și datele reale

Pentru curba materialului construită cu datele reale calculate, la valoarea tensiunii $\sigma_{r\text{-}real}$ =388.67 MPa, deformația reală calculată a materialului este ε_{real} ≈0.45, adică o alungire de 45% a lungimii L_0. Deși pe curba reală a materialului, după valoarea de 388.67 Mpa a tensiunilor, acestea continuă să crească, forța de tracțiune începe să scadă simbolizând practic începutul gâtuirii materialului. Astfel, tensiunea maximă înainte de rupere este considerată tensiunea corespunzătoare forței maxime de tragere a epruvetei. Valoarea obținută prin calcularea tensiunilor reale pentru limita reală de curgere a materialului este $\sigma_{c\text{-}real}$ =190.59 MPa. Pe lângă valoarea rezistenței reale la rupere și a valorii limitei reale de curgere, descrierea proprietăților de material în softul FEM este realizată și prin introducerea unor perechi de puncte tensiune reală - deformație reală (σ_{real} - ε_{real}) care descriu curba caracteristică a materialului DC05 pornind de la limita de curgere $\sigma_{c\text{-}real}$. Porțiunea curbei caracteristice până la limita de curgere nu este necesară, deoarece aceasta reprezintă zona elastică a caracteristicilor materialului și este descrisă de modulul de elasticitate *E*. Acesta este calculat utilizând relația:

$$E = tg(\alpha) \tag{3.7}$$

unde α este unghiul format de abscisă cu partea elastică din curba materialului (figura 3.6).

Valoarea reală calculată pentru epruveta E1.3, a modulului de elasticitate este E=87952 MPa.

Tabelul 3.2 Proprietățile materialului DC05 prezentate comparativ

Material DC05					
Conform cu :	Densitatea [Kg/m³]	Modulul de elasticitate [MPa]	Coeficientul lui Poisson	Limita de curgere [MPa]	Rezistența la rupere [MPa]
SR EN 10130:2007	7850	210000	0.3	180	270...330
Date reale calculate	7850	87952	0.3	190.59	388.67

În tabelul 3.2 sunt prezentate comparativ proprietățile materialului DC05 conform standardului SR EN 10130:2007 și cele reale calculate în urma încercării la tracțiune a acestuia. Pentru analiza cu elemente finite vor fi folosite datele din ultimul rând al acestui tabel, dar și curba tensiune reală – deformație reală, ce va fi descrisă prin intermediul unor perechi de puncte (σ_{real} - ε_{real}).

3.4 Dezvoltarea unui instrument software destinat generării datelor necesare în ANSYS APDL pentru descrierea traiectoriei sculei

3.4.1 Necesitatea unui nou instrument software

După cum s-a prezentat anterior (subcapitolul 3.2), implementarea analizei cu elemente finite cuprinde trei etape: pregătirea modelului pentru analiza FEM (etapa de preprocesare), soluționarea problemei (rezolvarea analizei) și interpretarea rezultatelor (etapa de postprocesare). În cazul simulărilor numerice în care modelele au un număr mare de elemente finite sau sunt necesare un număr mare de iterații, timpul de calcul necesar analizei este, de asemenea mare. Simularea numerică a procesului de deformare incrementală nu este o excepție din acest punct de vedere. Timpul mare de calcul al analizei pentru acest proces de deformare se datorează multiplelor probleme de neliniaritate [NIM13, OLE05] specifice proceselor de deformare a tablelor, sau din cauza utilizării unei discretizări de dimensiuni mici a suprafețelor componentelor care alcătuiesc ansamblul simulat. Nu în ultimul rând, traiectoria pe care o urmează scula, crește timpul necesar analizei. Traiectoria sculei de deformare este una complexă comparativ cu cele ale altor procedee, fiind alcătuită din mii de puncte sau poziții pe care scula le ocupă pe parcursul întregului traseu de deformare. Pentru fiecare dintre pozițiile atinse de sculă în timpul procesului de deformare, se realizează o reactualizare a condițiilor de analiză, acesta fiind motivul principal pentru care timpul necesar rulării întregii simulări este mare [NAS18a]. În acest sens, mai mulți cercetători sau grupuri de cercetători au încercat să găsească soluții cu ajutorul cărora să se micșoreze timpul necesar rulării unei analize cu elemente finite, în domeniul deformării incrementale. Așadar, foarte multe cercetări s-au concentrat asupra principalei probleme care apare în domeniul simulării numerice a procesului de deformare incrementală, și anume, timpul mare de calcul al analizei FEM. În concluzie, etapa de calcul a analizei FEM în cazul procesului de deformare incrementală este o etapă mare consumatoare de timp, identificându-se diverse soluții pentru micșorarea acestuia.

În afară de timpul mare de calcul necesar rulării unei simulări numerice pentru procesul ISF, și etapa de pregătire a modelului pentru analiza FEM este și ea, o etapă consumatoare de timp. Aceasta se datorează în special necesității de descriere a traiectoriei sculei în sistemul software FEM, în aceeași formă și poziție în care aceasta a fost generată în vederea fabricării pieselor [NAS18a]. Traiectoriile programate utilizând sisteme CAM sunt descrise prin intermediul adreselor specifice codului G, sau pot fi exportate din softul CAM sub forma unor curbe 3D complexe, care urmează traseul sculei. Nici una dintre cele două opțiuni specificate anterior nu este de ajutor în cazul descrierii traiectoriei sculei în software-urile de analiză cu elemente finite. În cadrul prezentei cercetări, pregătirea modelului pentru analiza FEM a fost realizată cu ajutorul softului ANSYS APDL. În această etapă este descrisă și traiectoria sculei de deformare, care presupune un volum mare de muncă pentru pregătirea datelor, fiind o fază mare consumatoare de timp. Traiectoria sculei este descrisă în ANSYS APLD utilizând câte trei de perechi de puncte, coordonatele pe axele X/Y/Z în funcție de timp, pentru fiecare poziție pe care scula de deformare o ocupă de-a lungul deplasării sale [NAS18a]. Datele necesare descrierii mișcărilor sculei trebuie extrase din fișierele de conducere numerică și ulterior procesate utilizând softuri dedicate lucrului cu foi de calcul cum este Microsoft Excel, sau chiar manual pentru traiectoriile simple [NAS18a]. Pentru traiectoriile complicate, care sunt formate din mii de puncte de interpolare ale sculei, procesarea manuală nu este cea mai bună soluție, fiind mare consumatoare de timp, putând apărea erori neintenționate în descrierea mișcărilor sculei pentru softurile FEM. Pentru a elimina aceste posibile

erori, dar mai ales pentru a simplifica și mai mult implementarea acestei etape în procesul de simulare numerică pentru viitorii utilizatori, autorul tezei a dezvoltat un instrument software care reușește, într-un timp foarte scurt, să genereze datele necesare descrierii mișcărilor sculei pentru softul ANSYS APDL, pe baza fișierului de conducere numerică generat folosind sisteme CAM.

3.4.2 Descrierea instrumentului software

Pentru a micșora volumul mare de muncă ce trebuie depus de utilizatorii care pregătesc modelul FEM pentru analiza numerică a procesului de deformare incrementală în ANSYS APDL, a fost dezvoltat instrumentul software denumit Tool Motion Points Generator (TMPG). Acest instrument software a fost conceput utilizând mediul de lucru Borland Delphi care folosește limbajul de programare Object Pascal. Instrumentul conceput, poate fi folosit de orice utilizator, fără a deține cunoștințe de programare și fără să aibă instalat mediul Delphi pe calculatorul personal, fiind o aplicație executabilă, de sine stătătoare [NAS18a]. Acesta are ca scop, convertirea datelor conținute de fișierul de conducere numerică a traiectoriei sculei, într-un fișier care conține datele necesare softului ANSYS APDL pentru descrierea mișcărilor sculei, în aceeași poziție și formă în care acestea au fost programate utilizând sistemul CAM, în vederea fabricării piesei simulate [NAS18a].

Utilizarea instrumentului TMPG presupune rularea fișierului executabil care poartă numele *TMPG.exe*, în urma căruia, pe ecran se deschide interfața de dialog a acestuia. În pasul următor, se alege fișierul de conducere numerică generat anterior cu ajutorul unui sistem CAM. Înainte de a se alege fișierul CNC dorit pentru procesare, utilizatorul este atenționat că în fișierul CNC trebuie să fie specificate, în prima frază care descrie deplasări ale sculei cu avans de lucru, toate cele trei coordonate ale poziției inițiale ale sculei. Dacă această condiție nu este îndeplinită, nu va fi cunoscută poziția inițială din care scula va începe deformarea [NAS18a]. Într-o primă etapă, instrumentul software extrage și afișează coordonatele X, Y și Z ale tuturor punctelor de interpolare conținute de traiectoria sculei, descrise de fișierul de conducere numerică. După această etapă, instrumentul calculează și afișează momentul (timpul) în care scula ajunge în fiecare poziție în parte, pe baza vitezei de avans specificată de utilizator. Urmează etapa de generare a datelor într-un format specific ANSYS APDL, care pot fi apoi introduse, pentru descrierea traiectoriei sculei, în softul FEM. Instrumentul TMPG permite salvarea intermediară a unor fișiere care conțin fie numai coordonatele punctelor, fie coordonatele punctelor și timpul în care scula se află în acele poziții, pentru eventuala utilizare a acestora în crearea datelor necesare descrierii traiectoriei sculei și în alte softuri de analiză cu elemente finite, altele decât ANSYS APDL. Interfața instrumentului software TMPG, prezentată în figura 3.7, este împărțită în patru zone.

Prima zonă a interfeței din figura 3.7, zona de afișare a coordonatelor pe direcțiile X, Y și Z a pozițiilor pe care scula le parcurge de-a lungul traiectoriei, este completată în urma apăsării butonului *Extrage coordonate din fișierul CNC* și a alegerii fișierului de conducere numerică ce descrie traiectoria sculei, utilizând codul G. În cadrul cercetărilor, pentru generarea fișierelor CNC a fost utilizat sistemul software CATIA V5, modulul CAM, denumit *Advanced Machining*. Odată generate și afișate coordonatele pentru fiecare poziție a sculei, se poate salva un prim fișier text intermediar, utilizând butonul *Salvează coordonate*, fișier care va conține doar coordonatele X, Y și Z ale pozițiilor sculei.

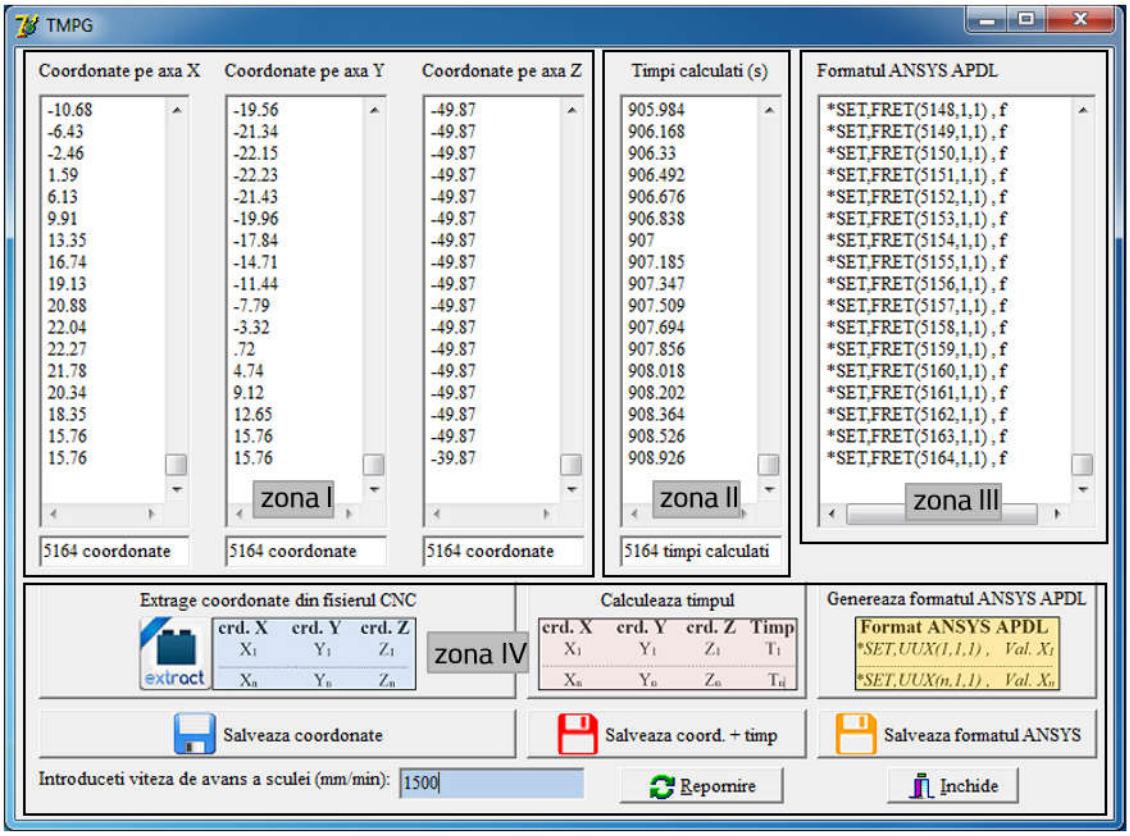


Figura 3.7 Interfața instrumentului software TMPG [NAS18a]

A doua zonă a interfeței prezentate în figura 3.7 reprezintă zona în care sunt afișate valorile aferente timpului în care scula ajunge în fiecare poziție. Calcularea timpului specific pentru fiecare poziție se face ținând cont de viteza de avans a sculei, specificată de utilizator, de distanța dintre două poziții succesive parcurse și de valoarea timpului la care scula a atins poziția anterioară [NAS18a]. Distanța dintre două poziții succesive se calculează cu relația (3.8) [NAS18a] ca fiind distanța dintre două puncte A(xa, ya, za) și B(xb, yb, zb), în spațiul cartezian:

$$AB = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2} \quad (3.8)$$

Înmulțind distanța calculată utilizând relația (3.8) cu viteza de avans introdusă de utilizator, se obține timpul necesar sculei pentru parcurgerea traseului de la o poziție la alta. Acest timp, exprimat în secunde, se însumează cu timpul calculat anterior, având ca rezultat momentul în care scula atinge poziția vizată. După ce calcularea tuturor timpilor, există din nou posibilitatea de a salva un al doilea fișier intermediar, utilizând butonul *Salvează coord. + timp*, fișier care va conține atât coordonatele X, Y și Z a pozițiilor de pe traiectorie, cât și timpul la care scula va ajunge în aceste poziții.

A treia zona a interfeței prezentată în figura 3.7, este zona de afișare a parametrilor de tip mulțime într-un format specific pe care software-ul ANSYS APDL îl poate interpreta, parametrii cu ajutorul cărora vor fi descrise mișcările sculei de deformare și forța de reținere, în etapa de pregătire a modelului FEM. Această zonă a interfeței este completată automat la apăsarea butonului *Generează formatul ANSYS APDL*. Formatul ANSYS APDL specific celor cinci parametrii de tip mulțime generați de instrumentul software TMPG, este prezentat în figura 3.8. După generare, cei cinci parametrii pot fi salvați într-un fișier text, la apăsarea butonului *Salvează formatul ANSYS*.

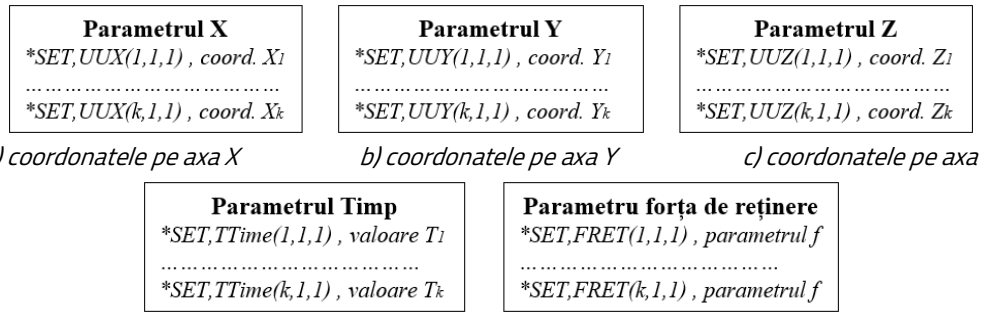


Figura 3.8 Formatul specific ANSYS APDL generat de instrumentul software TMPG pentru fiecare parametru de tip mulțime [NAS18a]

Simbolurile folosite în formatul parametrilor de tip mulțime au următoarele semnificații [NAS18a]:

- *UUX, UUY, UUZ , TTime* și *FRET* - sunt numele parametrilor de tip mulțime;
- *k* - reprezintă numărul de poziții sau puncte de interpolare pe care scula le parcurge;
- *X1…Xk, Y1…Yk, Z1…Zk, T1…Tk* - sunt coordonatele pe direcțiile *X, Y, Z* și timpii în care scula ajunge în pozițiile respectivelor coordonate;
- *f* - este parametrul care conține valoarea forței de reținere a semifabricatului.

A patra zona a interfeței prezentate în figura 3.7 reprezintă zona de introducere a vitezei de avans a sculei și de acționare a butoanelor de comandă. Majoritatea butoanele de comandă și acțiunile pe care acestea le execută au fost deja prezentate anterior. Tot aici sunt poziționate încă două butoane, unul pentru a reporni instrumentul software pentru o utilizare nouă, și unul pentru închiderea acestuia.

Instrumentul software dezvoltat de autor, are scopul de a simplifica implementarea traiectoriei sculei pentru un procedeu de deformare incrementală în pregătirea modelului pentru simularea numerică utilizând ANSYS APDL, dar și de a reduce pe cât posibil timpul consumat în această etapă, eliminând procesarea greoaie a datelor necesare. Generarea facilă a datelor are un efect pozitiv asupra timpului total necesar pregătirii analizei cu elemente finite, în sensul reducerii acestuia. Un alt avantaj este acela că instrumentul software realizat este o aplicație de sine stătătoare, fără ca utilizatorii să fie nevoiți să aibă cunoștințe despre limbaj, și fără să necesite instalarea mediului Delphi pe calculatorul pe care doresc rularea instrumentului TMPG [NAS18a].

3.4.3 Integrarea instrumentului software TMPG în etapa de simulare numerică a procesului SPIF

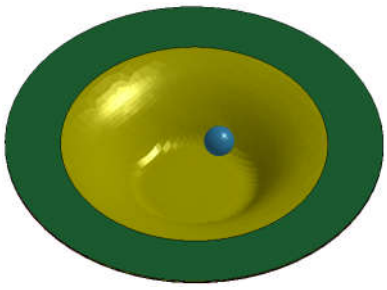
Simularea numerică a procesului de deformare incrementală într-un singur punct de contact (SPIF) a fost realizată utilizând în etapa de pregătire a modelului pentru analiză, softul ANSYS APDL, urmată de rezolvarea analizei utilizând softul LS-DYNA Explicit. Integrarea instrumentului software TMPG, în cadrul procesului de simulare numerică, s-a realizat după ce fișierul de conducere numerică a fost generat în CATIA V5. Fișierul de conducere numerică este procesat utilizând instrumentul software TMPG pentru a obține parametrii necesari descrierii traiectoriei sculei în ANSYS APDL. Parametrii de tip mulțime *UUX*, *UUY, UUZ, TTime* și *FRET*, sunt introduși prin copiere în fereastra *command prompt* din ANSYS APDL. Aceste operații sunt considerate operații pregătitoare simulării numerice a procesului de

deformare incrementală, aceasta fiind etapa de preprocesare în vederea implementării simulării FEM în cadrul procesului de deformare incrementală. Ultimul pas parcurs în ANSYS APDL este generarea fișierului cu extensia **.K*. Acest fișier este folosit mai departe ca fișier de intrare în LS-DYNA Explicit pentru soluționarea analizei. La terminarea rulării analizei, fișierele create de softul LS-DYNA, ce conțin rezultatele obținute vor fi vizualizate și interpretate utilizând modulul LS-PrePost [NAS18a].

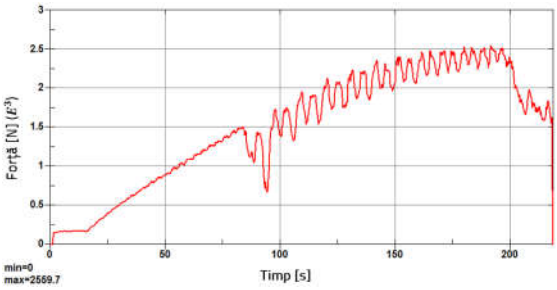
3.5 Simularea numerică a unei piese de dimensiuni reale

Utilizând pașii prezentați anterior, a fost implementată simularea numerică a deformării incrementale într-un punct de contact, pentru o primă piesă având dimensiuni reale. Configurația dimensională a piesei este denumită conform codificării prezentate în subcapitolul 3.2, cu dimensiunile simbolizate în figura 3.3. Dimensiunile piesei, în formă de trunchi de con, sunt D=85mm, H=25mm și unghiul α=55°, procesul de deformare fiind simulat utilizând un pas incremental Δz=1.5mm. Prin urmare, configurația piesei este codificată astfel: CON-D85H25α55Δz1.5. Se menține un spațiu *Sp* de 8mm între placa suport și zona de început al peretelui piesei (figura 3.3), pentru a evita fisurarea semifabricatului în zona flanșei. Proprietățile mecanice ale materialului tablei folosite în simulare sunt cele determinate și prezentate în subcapitolul 3.3, ultima linie a tabelului 3.2. Scula este modelată în ANSYS APDL ca sferă de diametru egal cu diametrul sculei reale ce urmează să fie utilizată în cadrul primelor încercări de deformare, d=12mm. Pentru deformarea pieselor și implicit pentru simularea procesului de deformare a fost utilizată o traiectorie elicoidală, având distanța dintre două spire succesive egală cu pasul incremental Δz=1.5mm, și o viteză de avans a sculei, de 1500 mm/min.

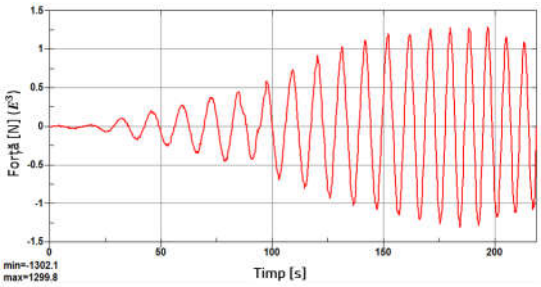
Scopul acestei prime analize pentru o piesă de dimensiuni reale este acela de a obține o serie de valori aproximative ale forțelor dezvoltate în timpul procesului de deformare. Pe baza acestor valori se ia decizia privind posibilitatea utilizării mașinii de frezat Victor VCenter-55, fără a risca deteriorarea acesteia, pentru a deforma incremental piese în formă de trunchi de con.



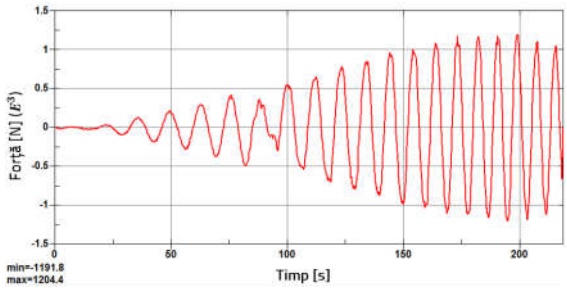
a) modelul FEM ai piesei deformate



b) graficul forței axiale (Fz)



c) graficul forței radiale (Fx)



d) graficul forței tangențiale (Fy)

Figura 3.9 Rezultate FEM obținute pentru piesa CON-D85H25α55Δz1.5 [NAS18b]

În figura 3.9 sunt prezentate rezultatele obținute la simularea FEM a deformării incrementale a piesei codificate CON-D85H25α55Δz1.5, conform cărora această configurație dimensională a piesei se poate deforma în condiții sigure, fără ruperea materialului, iar forțele dezvoltate în timpul procesului de deformare au valorile *Fz*=2559.7N, *Fx*=1302.1N și *Fy* =1204.4N [NAS18b]. Valorile forțelor sunt folosite pentru testarea, tot prin analiză FEM, a rigidității dispozitivului de fixare a tablei, proiectat special pentru procedeul de deformare incrementală, prezentarea acestuia urmând să fie realizată în capitolul 4. De asemenea, tot pe baza valorilor obținute ale forțelor, se confirmă că mașina de frezat Victor VCenter-55 poate fi folosită cu succes pentru deformarea pieselor utilizând procedeul SPIF, fără a risca deteriorarea acestei. Mecanismele de avans ale mașinii de frezat pot rezista la solicitări ale unor forțe de până la 22000N de-a lungul axelor X și Y și până la 33500N de-a lungul axei Z, deplasarea efectuându-se cu ajutorul unor șuruburi cu bile [HIW19, NAS18a]. Pentru utilizarea mașinii de frezat în deformarea incrementală a tablelor, furnizorul acesteia recomandă ca valoarea maximă a forțelor să nu depășească jumătate din valorile specificate anterior. Chiar și luând în considerare această recomandare, concluzia este că forțele dezvoltate în timpul procesului de deformare sunt relativ mici și nu vor afecta în timp, structura și buna funcționare a mașinii-unelte Victor VCenter-55 [NAS18a].

3.6 Concluzii referitoare la simularea numerică a procesului SPIF

În cadrul capitolului 3 au fost prezentate etapele ce se parcug pentru implementarea simulării numerice cu elemente finite în cazul procedeului de deformare incrementală într-un punct de contact. Pentru etapa de preprocesare a fost utilizat sistemul software ANSYS APDL, softul LS-DYNA ca solver matematic și LS-PrePost pentru etapa de postprocesare a rezultatelor obținute.

De asemenea, a fost prezentată metoda de determinare a proprietăților reale ale materialului DC05 ce este utilizat pentru deformarea pieselor, proprietăți necesare pentru introducerea acestora în analizele FEM. Proprietățile utilizate în analizele numerice sunt: densitatea ρ=7850Kg/m^3, modulul de elasticitate longitudinal real E_{real}=87952 MPa, coeficientul de contracție transversală ν=0.3, limita de curgere reală $\sigma_{c\text{-}real}$=190.59 Mpa, rezistența la rupere reală $\sigma_{r\text{-}real}$=388.67 MPa, dar și curba materialului descrisă prin perechi de puncte tensiune reală - deformație reală (σ_{real} - ε_{real}).

Pentru a reduce timpul necesar generării parametrilor necesari descrierii traiectoriei sculei în sistemul software ANSYS APDL, a fost dezvoltat un instrument software denumit TMPG, care, utilizând ca date de intrare fișierul de conducere numerică a traiectoriei programate în softul CATIA V5, modulul CAM, generează toate datele necesare descrierii mișcărilor sculei utilizate în softul ANSYS APDL. Astfel, timpul consumat cu obținerea acestor parametri necesari analizei FEM, a fost micșorat considerabil, de la câteva ore la numai câteva minute. Au fost realizate simulări numerice pentru deformarea incrementală a mai multor configurații dimensionale a unor piese în formă de trunchi de con. Scopul simulărilor prezentate a fost, pe de-o parte acela de a verifica reușita implementării traiectoriei sculei în ANSYS APDL dar și posibilitatea de deformare în bune condiții a configurațiilor dimensionale ale pieselor, fiind cazul pieselor de dimensiuni reduse. Pe de altă parte, scopul simulării piesei de dimensiuni reale CON-D85H25α55Δz1.5 a fost acela de a obține valorile forțelor dezvoltate în timpul procesului de deformare, pentru a putea verifica dacă mașina de frezat CNC în 3 axe Victor Vcenter-55 poate fi utilizată pentru a implementa procedeul SPIF, fără a risca deteriorarea mecanismelor de avans ale mașinii-unelte.

4 PROIECTAREA SCULELOR ȘI A DISPOZITIVULUI DE FIXARE A TABLEI

4.1 Proiectarea și fabricarea dispozitivului de fixare a tablei

În subcapitolul 1.1 al lucrării, au fost prezentate principalele elemente necesare pentru implementarea procedeului de deformare incrementală într-un punct de contact, în vederea fabricării de piese: semifabricatul din tablă, scula de deformare și dispozitivul de fixare al semifabricatului din tablă [NAS17a]. Chiar dacă procesul ISF este denumit și *proces fără matriță*, acest lucru nu este în totalitate adevărat deoarece, pentru implementarea acestui procedeu de deformare, este totuși nevoie de un dispozitiv de prindere al semifabricatului din tablă [JES05a, NAS18b]. Rolul dispozitivului este acela de a fixa tabla pe margini, astfel încât aceasta să fie menținută întinsă pe tot parcursul procesului de deformare. Dispozitivele folosite de către cercetători și nu numai, pentru implementarea procedeului SPIF, au forme și dimensiuni variate, fiind în general simple și relativ ieftine. Acestea sunt dimensionate în funcție de gabaritul pieselor fabricate, de rigiditatea necesară pentru a rezista forțelor dezvoltate în timpul procesului [NAS18b].

4.1.1 Proiectarea constructivă a dispozitivului de fixare a tablei

Proiectarea unui dispozitiv, matriță sau orice alt produs industrial, necesită cunoașterea unor serii de date inițiale de bază, obținute în urma analizei temei de proiectare, informații precum: tipul și forma pieselor ce urmează să fie deformate utilizând acest dispozitiv, valoarea forțelor dezvoltate în timpul procesului de deformare, forțe la solicitarea cărora dispozitivul trebuie să reziste având deformații cât mai mici, și trebuie să fie specificată mașina-unealtă pe care se realizează deformarea.

Tipul pieselor care urmează să fie deformate utilizând dispozitivul de fixare, sunt de forma unui trunchi de con cu posibilitatea de extindere pentru deformarea unor piese în formă de trunchi de piramidă patrulateră, hexagonală sau chiar alte forme mai complexe. Verificarea rigidității dispozitivului, este realizată prin analiză numerică cu elemente finite, după ce modelul 3D al acestuia a fost proiectat. Mașina-unealtă folosită pentru implementarea procesului de deformare incrementală este mașina de frezat cu conducere numerică, în 3 axe, Victor VCenter-55. Montarea elementelor componente ale dispozitivului se realizează utilizând șuruburi cu cap cilindric și locaș hexagonal împreună cu șaibe grower pentru fiecare șurub în parte. Fixarea propriu-zisă a tablei se realizează cu ajutorul plăcii de prindere care aplică presiune pe semifabricat prin strângerea a opt șuruburi M10X40mm care trec prin placa suport și sunt înșurubate în placa de așezare. Întreg ansamblul descris anterior este ridicat cu 60mm față de placa de bază, prin intermediul a patru coloane, pentru a oferi spațiu necesar deformării tablei pe direcție verticală. Dispozitivul are ca baze de așezare, suprafața inferioară și suprafețele laterale ale plăcii de bază, dispozitivul putând fi fixat fie direct pe masa mașinii de frezat, fie în două menghine paralele [NAS18b]. Placa suport a dispozitivului a fost proiectată pentru a permite deformarea incrementală a pieselor în formă de trunchi de con, cu o înălțime de maximum 100mm, având diametrul bazei mari al acestuia tot de maximum 100mm. Aceasta este prevăzută în centru cu un alezaj circular de diametrul 101mm, care permite deformarea materialului pe verticală, menținând în același timp un spațiu *Sp* (figura 3.3) de minimum 0.5mm între peretele pieselor și muchia plăcii suport, evitând astfel îndoirea bruscă a materialului piesei și ruperea acestuia.

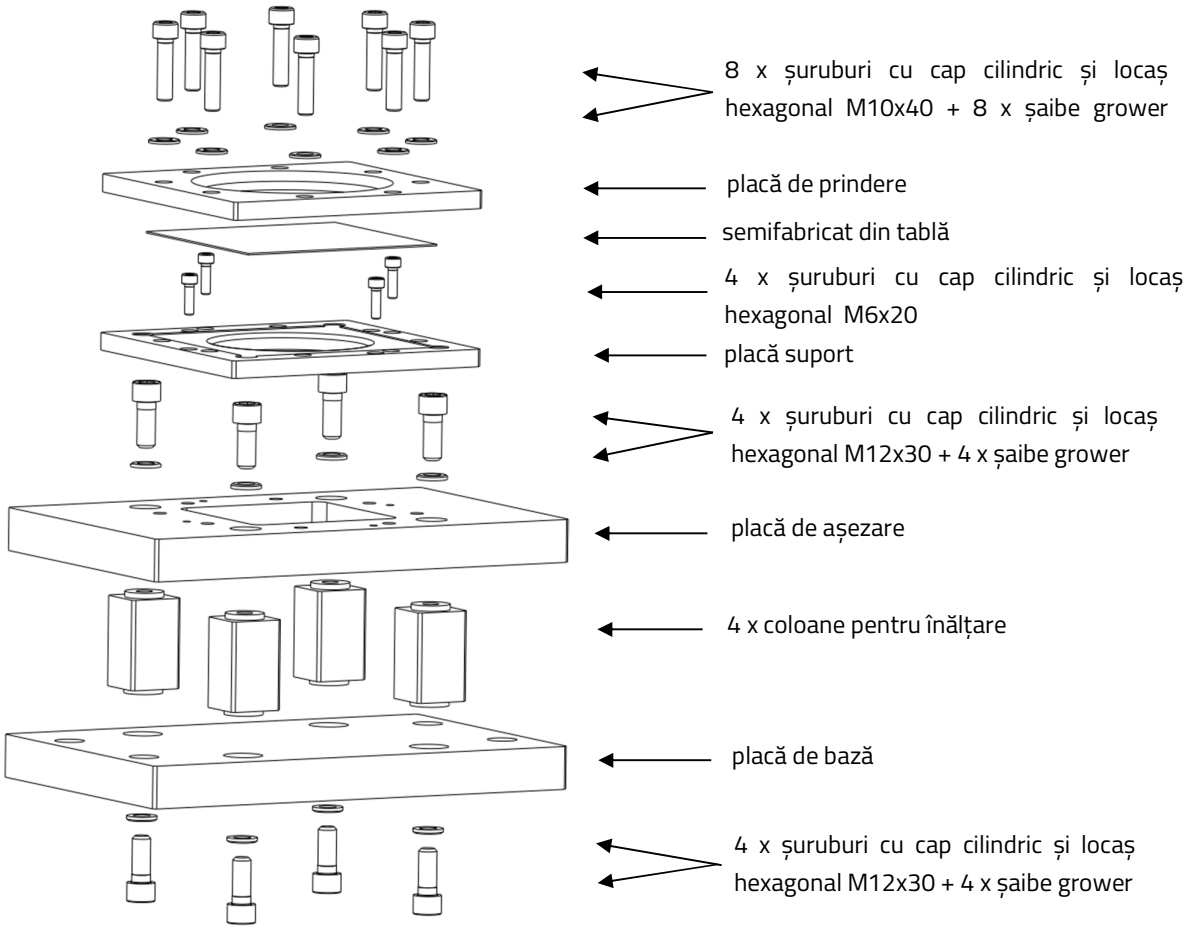
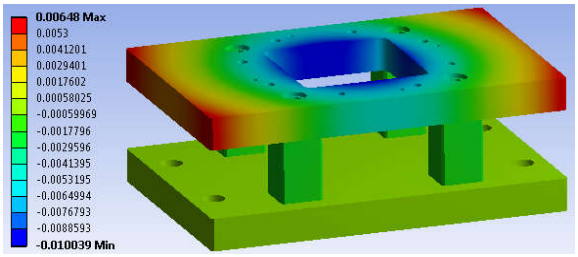


Figura 4.1 Componentele dispozitivului de fixare [NAS18b]

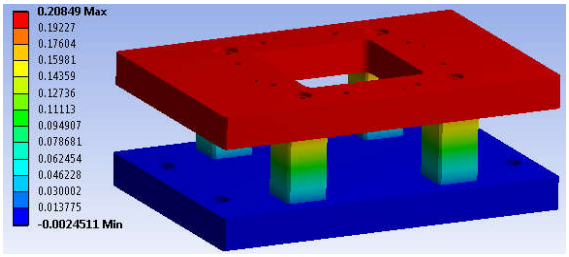
Pentru modelarea 3D a dispozitivului de fixare a fost utilizat softul CAD, CATIA V5, o vedere izometrică în stare explodată a componentelor dispozitivul fiind prezentată în figura 4.1.

4.1.2 Simularea numerică a dispozitivului de fixare

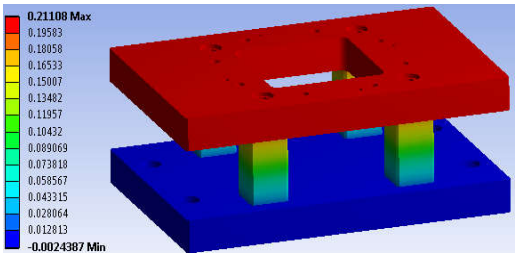
Precizia dimensională a pieselor este influențată de mai mulți factori printre care și rigiditatea dispozitivului de fixare a tablei. Din acest motiv, înainte de a trece la fabricarea componentelor dispozitivului, rigiditatea acestuia este verificată utilizând o simulare numerică. Simularea numerică a fost efectuată folosind softul ANSYS Workbench. În cadrul deformării incrementale, tabla împreună cu dispozitivul de fixare al acesteia sunt solicitate de cele trei componente ale forței dezvoltate în procesul de deformare prezentate în subcapitolul 1.12 (figura 1.7): componenta axială *(Fz),* componenta radială *(Fx)* și componenta tangențială *(Fy)*. Conform rezultatelor prezentate în subcapitolul 3.5, în urma simulării numerice aplicate asupra deformării SPIF a unei piese în formă de trunchi de con, valorile maxime ale forțelor dezvoltate în timpul procesului, pe cele trei direcții sunt: Fz =2559.7 N, Fx=1302.1 N, Fy=1204.1 N. Pentru a asigura o rigiditate crescută a dispozitivului de fixare, la simularea acestuia în ANSYS Workbench au fost utilizate valori aproximativ duble ale forțelor la care acesta este solicitat (F_Z=5000 N, iar F_X=F_Y=3000 N). În figura 4.2 sunt prezentate rezultatele obținute în urma analizei FEM, din punctul de vedere al deformațiilor elastice și al deplasărilor cauzate de acțiunea forțelor de deformare.



a) deformațiile elastice pe direcția axială (Z)



b) deplasarea plăcii de așezare pe direcția radială (X)



c) deplasarea plăcii de așezare pe direcția tangențială (Y)

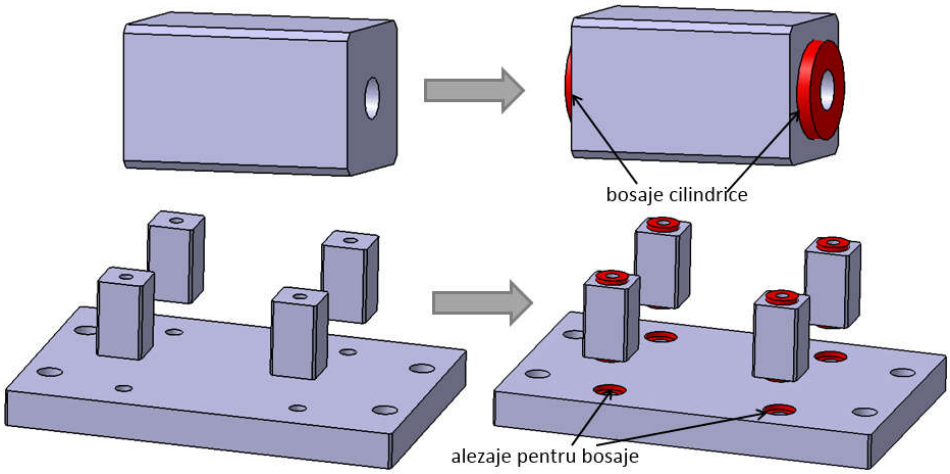
Figura 4.2 Rezultatele simulărilor numerice ale rigidității dispozitivului [NAS18b]

Conform codului de culori prezent în stânga imaginilor, placa de așezare fiind de culoare complet roșie, se consideră că aceasta s-a deplasat în întregime cu aproximativ 0.21mm, la acțiunea ambelor forțe în direcțiile X și Y. Sub influența forțelor axiale, dispozitivul are deformații elastice acceptabile, de aproximativ -0.01mm, în zona muchiilor interioare și de aproximativ 0.007mm în zona colțurilor exterioare. Conform rezultatelor acestor simulării numerice, deplasările plăcii de așezare cauzate de forțele radială și tangențială, ar influența considerabil precizia pieselor deformate, crescând astfel abaterile de execuție a acestora cu ±0.2mm.

4.1.3 Optimizarea constructivă a dispozitivului de fixare a tablelor

Pentru a reduce riscul creșterii abaterilor de execuție ale pieselor deformate, s-a luat decizia ca prima variantă proiectată a dispozitivului de fixare a tablei să fie îmbunătățită în vederea reducerii deplasărilor și a deformațiilor acestuia, sub acțiunea forțelor din timpul procesului de deformare.

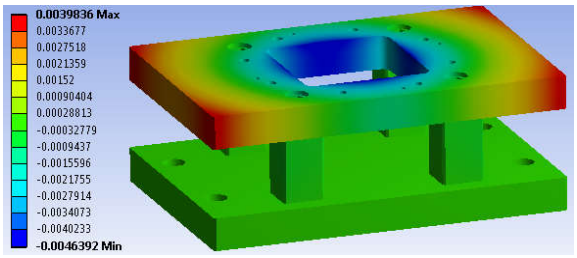
Se consideră că una dintre cauzele majore al deplasărilor nedorite ale plăcii de așezare în direcțiile X și Y, este montajul cu șuruburi dintre aceasta și coloane. În cazul acestui tip de montaj, găurile prin care trec șuruburile de prindere, sunt găuri de trecere având diametrul mai mare cu 1mm decât diametrul șuruburilor. Dacă forțele radiale și tangențiale care acționează asupra dispozitivului, depășesc valoarea forțelor de frecare dintre suprafețele de contact între coloane si plăcile de așezare și de bază, forțe aplicate prin strângerea șuruburilor, găurile de trecere permit deplasarea componentelor în direcțiile X sau Y cu până la jumătate din valoarea jocului dintre găurile de trecere și șuruburile de prindere. Pentru a evita acest lucru, s-a propus ca soluție de îmbunătățire, realizarea unor bosaje cilindrice la ambele capete ale coloanelor pentru înălțare, care să se asambleze cu strângere într-o serie de alezaje create special pentru acestea, în ambele plăci cu care se asamblează coloanele [NAS18b]. Această soluție a fost implementată pentru toate montajele cu șurub dintre placa de bază și placa de așezare cu cele patru coloane. În figura 4.3 sunt prezentate comparativ ambele variante ale componentelor dispozitivului, înainte și după implementarea soluției propuse.



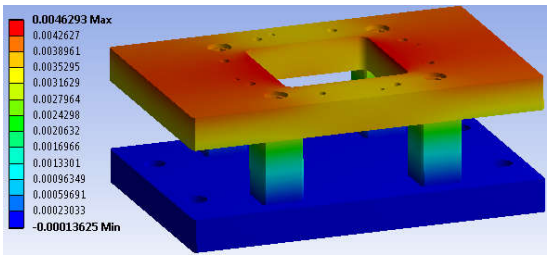
a) varianta inițială a montajului *b) implementarea soluției utilizând bosaje cilindrice*

Figura 4.3 Ambele variante ale componentelor dispozitivului

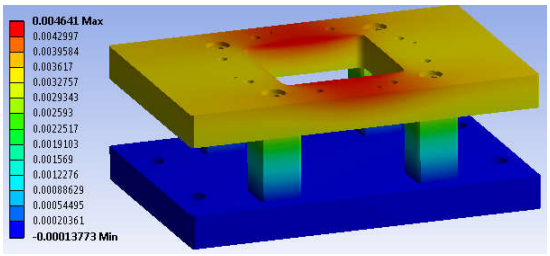
Cea de-a doua variantă îmbunătățită a dispozitivului a fost simulată în ANSYS Workbench, pentru a verifica dacă s-a reușit micșorarea deplasărilor și a deformațiilor elastice apărute la solicitări, în timpul procesului de deformare. Rezultatele noilor simulări sunt prezentate în figura 4.4. Se poate observa o îmbunătățire considerabilă, deformațiile elastice produse la solicitările forțelor în direcțiile X și Y fiind substanțial reduse, iar deplasările componentelor fiind eliminate. Utilizarea bosajelor în geometria componentelor dispozitivului a condus la eliminarea deplasării plăcii de așezare și micșorarea considerabilă a deformațiilor elastice acestuia în timpul desfășurării procesului de deformare, până la mai puțin de 0.01mm. Aceste rezultate au fost validate prin măsurarea deformațiilor reale în timpul deformării, după ce dispozitivul de fixare a fost fabricat.



a) deformațiile elastice pe direcția axială (Z)



b) deformațiile elastice pe direcția radială (X)



c) deformațiile elastice pe direcția tangențială (Y)

Figura 4.4 Rezultatele simulărilor numerice ale variantei îmbunătățite a dispozitivului [NAS18b]

Se poate considera că în urma etapelor realizate în mediul virtual, de proiectare, simulare și îmbunătățire a dispozitivului, s-a obținut o variantă constructivă îmbunătățită a acestuia, care să nu influențeze precizia pieselor prelucrate utilizând procedeul SPIF [NAS18b].

4.2 Fabricarea și asamblarea dispozitivului de fixare

Având în vedere că rezultatele obținute în urma analizei FEM a variantei îmbunătățite a dispozitivului sunt satisfăcătoare, s-a trecut la etapa de fabricație a componentelor dispozitivului. Componentele dispozitivului au fost fabricate din semifabricate laminate de tip tablă groasă și bară laminată din oțel de uz general S 235 JR. Operațiile de prelucrare realizate pentru fabricarea componentelor au fost: debitarea și prelucrarea utilizând un strung convențional, în cazul coloanelor de înălțare, debitarea semifabricatelor de tip plăci utilizând procedeul de tăiere cu jet de apă și abraziv folosind mașina-unealtă MAXIEM 1530 disponibilă la centrul de cercetare C05A - Tehnologii și sisteme avansate de fabricație, Departamentul Ingineria fabricației din cadrul Universității Transilvania din Brașov, urmate de prelucrări finale prin frezare utilizând mașina de frezat cu conducere numerică, Victor VCenter-55, în cazul celor patru plăci. Dispozitivul de fixare este prezentat in figura 4.5, în format 3D (CATIA V5) și în format real asamblat.

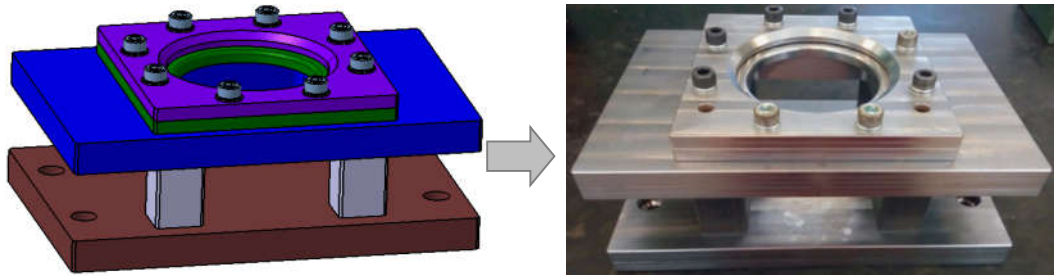


Figura 4.5 Dispozitivul de fixare în format virtual și real [NAS18b]

Dispozitivul de fixare fabricat, este un dispozitiv ce a fost proiectat, simulat și îmbunătățit pentru a avea deformații elastice minime la solicitarea forțelor care apar în timpul procesului de deformare, ce este utilizat pentru implementarea procedeului SPIF, împreună cu mașina-unealtă Victor VCenter-55.

4.3 Proiectarea și fabricarea sculelor de deformare

În cadrul procedeului SPIF, deformarea plastică a tablei este realizată local, de către o scula de deformare, cele mai utilizate fiind sculele din materiale solide [NAS17a]. În cadrul studiului experimental asupra deformării pieselor din oțel de ambutisare DC05, s-a realizat o sculă din oțel carbon de calitate C45 ale cărei formă și dimensiuni sunt prezentate în figura 4.6.

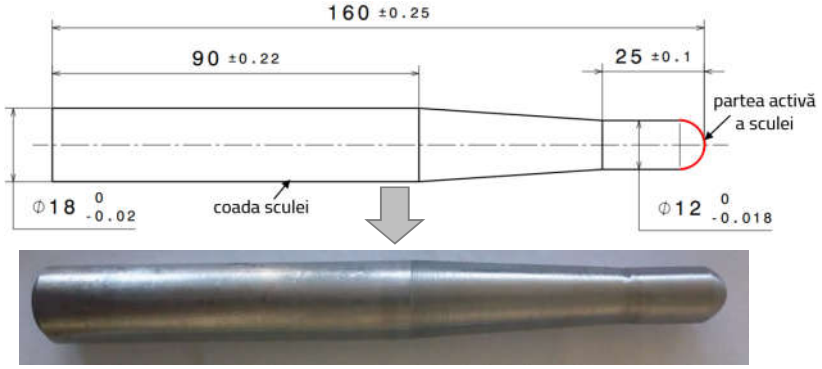


Figura 4.6 Forma și dimensiunile sculei inițiale din oțel C45 netratată termic

Scula a fost folosită doar pentru deformarea inițială a unui număr mic de piese deoarece, nefiind tratată termic, după deformarea a numai nouă piese, partea activă a acesteia s-a deteriorat. Pentru a continua cercetările experimentale a fost prelucrată o a doua sculă la dimensiuni identice cu prima, din același material, dar supusă unui tratament termic de călire, urmată de un proces de revenire înaltă, obținându-se în final o duritate de 269 HB. Pe parcursul lucrării, când se va face referire la utilizarea acestei scule simple de deformare, se folosește terminologia de *sculă normală*.

După cum a fost prezentat în capitolul 2, obiectivul principal al tezei constă în îmbunătățirea preciziei dimensională a pieselor pentru suprafețele pereților înclinați ale acestora. Acest obiectiv va fi îndeplinit utilizând o nouă sculă, prezentată în figura 4.7, ce folosește principiul de lucru prin ciocănire circumferențială. Terminologia utilizată, în lucrare, pentru această sculă este *sculă specială*. Diametrul părții active a sculei speciale este tot de 12mm, iar lățimea suprafeței aplatizate este de 6mm.

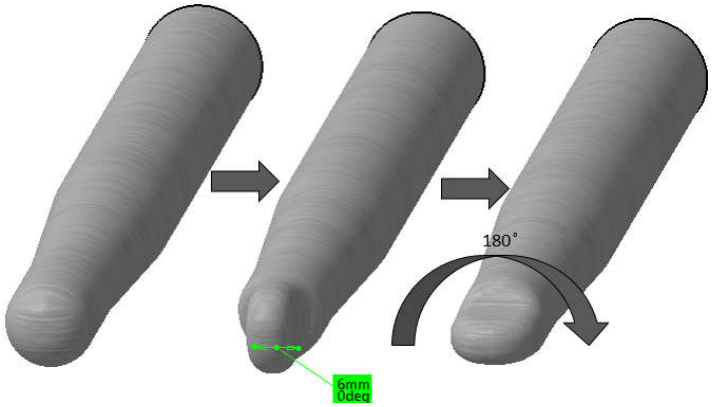
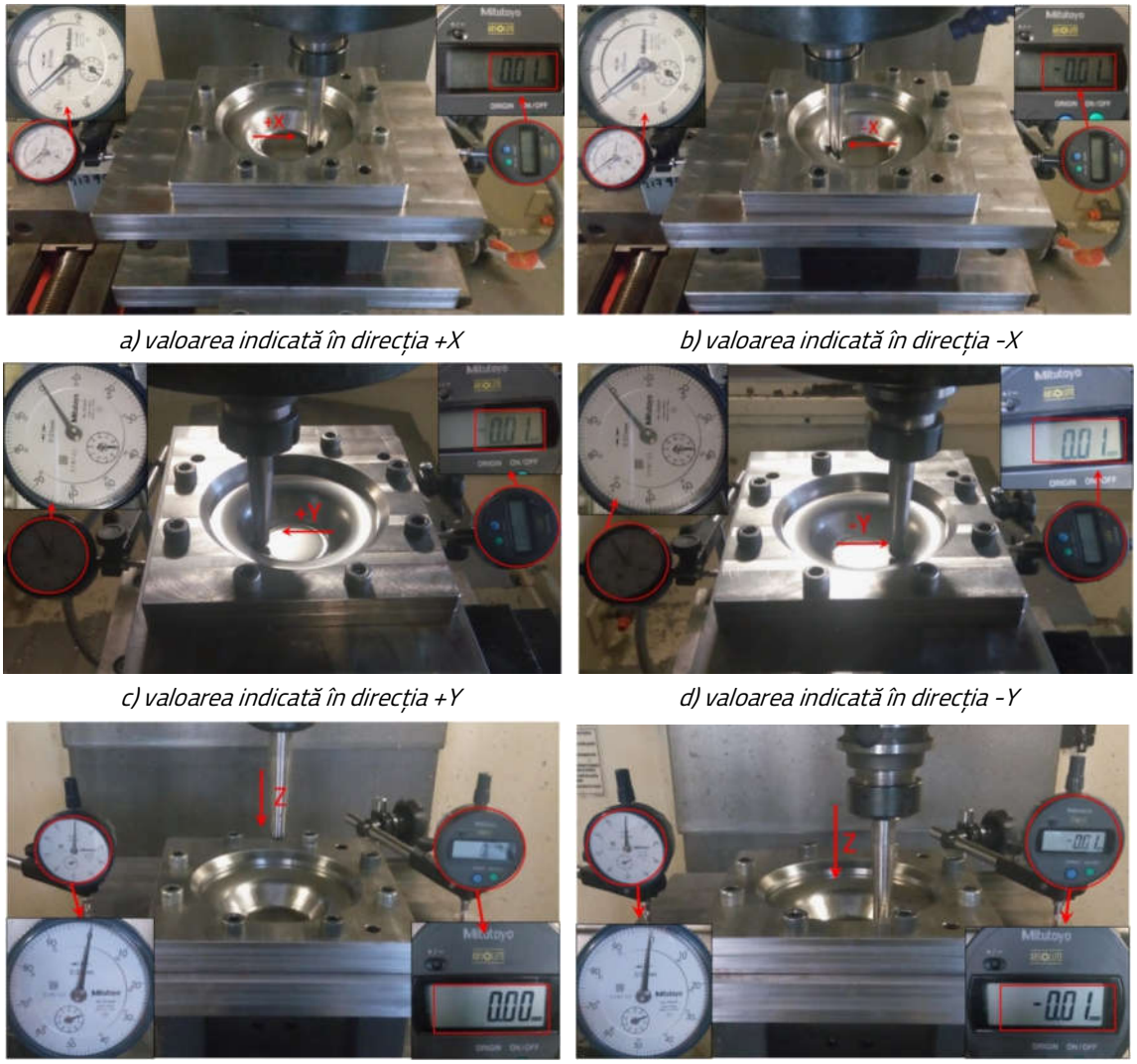


Figura 4.7 Scula specială

După prelucrare, scula specială a fost tratată termic ca și în cazul sculei normale de deformare. Principiul de lucru al acestei scule este următorul: la rotația sculei montate în arborele principal al mașinii de frezat, aceasta nu are contact permanent cu suprafața semifabricatul, la fiecare nou contact, apărând un efect de ciocănire/lovire cu circumferința părții active (ciocănire circumferențială). În consecință, acest tip de sculă lovește semifabricatul la fiecare rotație cu 180° în jurul axei proprii, aceasta însemnând că va ciocăni materialul tablei cu două lovituri la fiecare rotație completă. La fiecare lovire, scula introduce o forța inerțială în semifabricatul piesei, având tendința de a-l împinge brusc către exterior, inducând, în acest mod, o deformație mai mare în material comparativ cu cea a unei scule normale. În acest fel, se compensează din efectul negativ al fenomenului de revenire elastică a materialului, îmbunătățindu-se precizia finală a pieselor în zona pereților deformați.

4.4 Validarea rezultatelor obținute în procesul de simularea numerică a dispozitivului de fixare

Anterior etapei de prelucrare a componentelor dispozitivului, ansamblul acestuia a fost testat prin simulare numerică, pentru a verifica rigiditatea acestuia. Pentru a valida rezultatele obținute prin simulare numerică, se analizează deformația elastică reală a dispozitivului în timpul procesului de deformare, cu ajutorul a două ceasuri comparatoare având rezoluția de 0.01mm (figura 4.8).



a) valoarea indicată în direcția +X *b) valoarea indicată în direcția -X*

c) valoarea indicată în direcția +Y *d) valoarea indicată în direcția -Y*

e) scula nu acționează asupra piesei în direcția Z *f) scula acționează asupra piesei în direcția Z*

Figura 4.8 Valorile deformațiilor indicate de ceasurile comparatoare

Analiza deformațiilor s-a efectuat în timpului procesului de deformare a piesei codificate CON-D85H25α55Δz1.5, pentru care s-a efectuat și analiza FEM pentru testarea dispozitivului. În figura 4.8 sunt prezentate imagini cu deformațiile indicate de ceasurile comparatoare pentru cele trei direcții X, Y și Z. Pentru fiecare din direcțiile analizate s-a deformat incremental câte o piesă distinctă din configurația mai sus amintită. Din aceste imagini, se poate observa că deformațiile elastice ale dispozitivului în timpul deformării pieselor nu depășesc 0.01mm.

Concluzia finală privind dispozitivul de fixare a tablei, este că acesta are rigiditatea necesară și poate suporta solicitările ce apar în timpul procesului de deformare, având deformații foarte mici de la poziția de repaus. În plus, aceste deformații vor avea o influență minimă asupra preciziei finale a pieselor obținute prin deformare incrementală.

4.5 Concluzii privind proiectarea sculelor și a dispozitivului de fixare a tablei

În cadrul capitolului au fost prezentate etapele de la proiectare până la fabricație a principalelor elemente necesare implementării procedeului de deformare incrementală într-un punct de contact, dispozitivul de fixare a tablelor și sculele ce urmează a fi utilizate pentru deformarea semifabricatelor. Mașina-unealtă folosită pentru implementarea procedeului este mașina de frezat cu conducere numerică, în 3 axe simultane, Victor VCenter-55.

Dispozitivul de fixare a fost proiectat utilizând softul CATIA V5, astfel încât să satisfacă următoarele nevoi sau cerințe de proiectare:

- să permită deformarea pieselor de forma unor trunchiuri de con, având diametrul bazei mari a acestuia de până la 100mm, și o înălțime tot de până la 100mm;
- să permită montarea acestuia pe mașina de frezat utilizand mai multe metode de prindere;
- să prezinte deformații elastice cât mai mici, la acțiunea forțelor din timpul procesului de deformare. Dispozitivul a fost simulat numeric, prin analiză cu elemente finite în ANSYS Workbench. În final s-a obținut o rigiditate satisfăcătoare a acestuia, prezentând deformații elastice, de sub o sutime de milimetru, în timpul procesului de deformare incrementală a pieselor din tablă de ambutisare DC05, având grosimea de 1mm.

În cadrul cercetărilor sunt utilizate trei *scule de deformare,* fabricate din oțel carbon de calitate C45:

- o sculă normală netratată termic, având forma și dimensiunile prezentate în figura 4.6;
- o sculă normală având aceleași dimensiuni cu prima, pentru care s-a aplicat un tratament termic de călire și revenire înaltă, obținându-se o duritate de 269 HB;
- o sculă cu o geometrie nouă, denumită sculă specială, prezentată în figura 4.7, ce folosește principiul de lucru prin ciocănire circumferențială.

Dispozitivul de fixare împreună cu scula normală de deformare, netratată termic, au fost folosite pentru deformarea piesei în configurația dimensională CON-D85H25α55Δz1.5, simulate în cadrul subcaptolului 3.5, validându-se rezultatele privind rigiditatea dispozitivului de fixare, obținute în urma simulării numerice a acestuia.

5 CERCETĂRI EXPERIMENTALE REFERITOARE LA PRECIZIA PIESELOR FABRICATE PRIN DEFORMARE INCREMENTALĂ, DIN TABLĂ DC05

5.1 Identificarea limitărilor procesului SPIF pentru materialul DC05

5.1.1 Strategia de deformare a pieselor de forma unui trunchi de con

Cercetările desfășurate vizează, în principal, fabricarea utilizând procedeul de deformare incrementală SPIF, a pieselor din tablă cu grosimea de 1mm, din oțel de ambutisare DC05. Investigațiile experimentale sunt efectuate utilizând mai multe configurații de piese în forma unui trunchi de con. Realizarea primelor seturi de cercetări experimentale au ca scop identificarea limitărilor procedeului SPIF pentru materialul oțel de ambutisare DC05, utilizând scula normală de deformare, din punctul de vedere al unghiului maxim de deformare, până la care se pot fabrica piese fără ruperea materialului, dar și a diametrului maxim al bazei mari al trunchiului de con, pentru care a fost conceput dispozitivul de fixare a tablei. Referirea la această primă serie de piese, se realizează prin serie de probă.

Pentru implementarea procedeului s-a utilizat mașina de frezat CNC Victor VCenter-55 și dispozitivul de fixare a tablei prezentat în capitolul 4, a cărui prindere s-a realizat cu ajutorul a două menghine fixate paralel pe masa mașinii-unelte. Pentru deformarea acestei prime serii de piese, a fost utilizată scula normală confecționată din oțel carbon de calitate C45 netratată termic. Debitarea semifabricatelor, de formă pătrată, din foaia de tablă, s-a realizat utilizând procedeul de tăiere cu jet de apă și abraziv.

Pentru prelucrarea pieselor, se utilizează o strategie de deformare dintr-o singură trecere, scula urmând conturul modelului 3D al piesei utilizând o traiectorie elicoidală denumită *Multi-Axis Tube Machining*, generată utilizând modulul *Advanced Machining* din CATIA V5. Parametrii de proces utilizați sunt viteza de avans v de 1500mm/min și turația sculei n de 200 rot/min. Pentru primele încercări s-au folosit trei valori ale pașilor incrementali Δz, de 0.5mm, 1mm și 1.5mm. Lubrifierea contactului dintre sculă și semifabricat s-a realizat utilizând ulei mineral pentru ghidajele mașinilor-unelte.

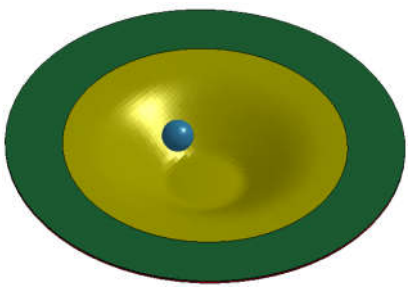
5.1.2 Deformarea unui lot de piese de probă care au formă de trunchi de con

Primele configurații ale pieselor care au fost deformate sunt piese având diametrul bazei mari a conului D=85mm. Pentru a evita ruperea materialului în zona razei superioare, între piesele ce urmează a fi deformate și suprafața racordată a plăcii suport se menține un spațiu Sp de 8mm. Primele investigații experimentale au fost realizate pentru deformarea a patru piese cu diametrul bazei mari D=85mm, având următoarele codificări:

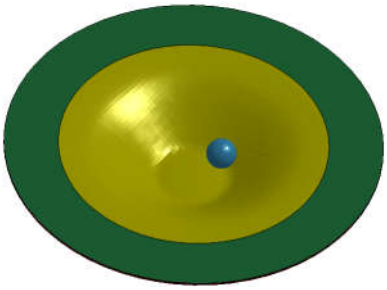
- CON-D85H20α35Δz0.5;
- CON-D85H20α35Δz1;
- CON-D85H35α50Δz0.5;
- CON-D85H25α55Δz1.5.

Anterior deformării efective, fiecare configurație a fost supusă unei analize cu elemente finite, rezultatele fiind prezentate în figura 5.1. Conform simulărilor numerice, cele patru configurații ale pieselor, pot fi deformate incremental, fără ruperea materialului. Toate cele patru configurații ale pieselor au fost deformate în bune condiții, fără ruperea materialului. La o scurtă analiză vizuală a aspectului suprafețelor deformate, după cum era de așteptat, piesa deformată cu pasul incremental

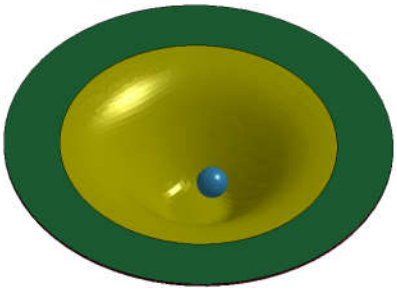
Δz=0.5mm prezintă un aspect vizual al suprafeței mai puțin ruguos, comparativ cu cel al pieselor deformate utilizând pașii incrementali de 1mm și 1.5mm. Din acest motiv, dar și pentru că obiectivul cercetărilor este studiul unor metode de îmbunătățire a preciziei pieselor obținute în urma deformării incrementale, și nu studiul calității suprafețelor, s-a luat decizia ca deformarea pieselor din cadrul cercetărilor experimentale să fie realizate utilizând o valoare unică a pasului incremental, Δz =0.5mm. În figura 5.2 sunt prezentate cele patru piese deformate, având diametrul bazei mari D=85mm.



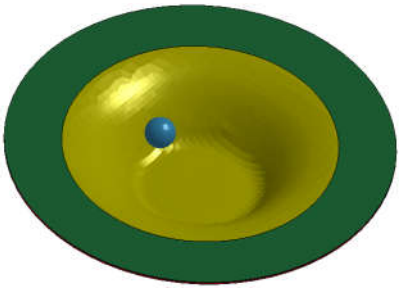
a) Configurația CON-D85H20α35Δz0.5



b) Configurația CON-D85H20α35Δz1



c) Configurația CON-D85H35α50Δz0.5



d) Configurația CON-D85H25α55Δz1.5 [NAS18b]

Figura 5.1 Imagini din cadrul simulărilor numerice a procesului de deformare a pieselor cu D=85mm

a) Configurația CON-D85H20α35Δz0.5

b) Configurația CON-D85H20α35Δz1

c) Configurația CON-D85H35α50Δz0.5

d) Configurația CON-D85H25α55Δz1.5

Figura 5.2 Piese având diametrul bazei mari a trunchiului de con D=85mm

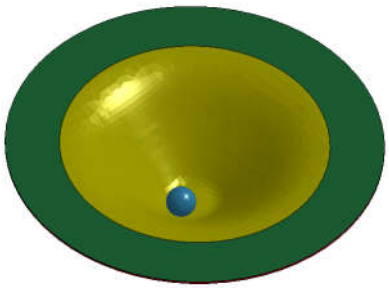
Având în vedere că primele piese s-au deformat în condiții bune, s-a decis creșterea diametrului bazei mari a trunchiului de con la valoarea D=95mm, urmând deformarea unui alt set de piese. În cazul

acestor piese, spațiu dintre pereții acestora și placa suport a dispozitivului de fixare se micșorează până la *Sp*=3mm. Deformările sunt realizate utilizând valoarea unică a pasului incremental, de 0.5mm.

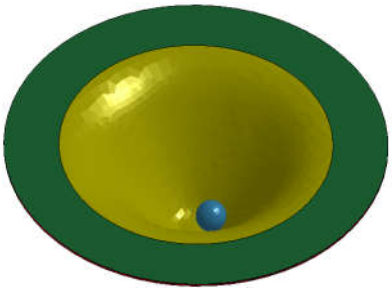
Sunt deformate cinci configurații ale pieselor ce au fost codificate astfel:

- CON-D95H35α40Δz0.5;
- CON-D95H50α60Δz0.5;
- CON-D95H50α70Δz0.5.
- CON-D95H45α50Δz0.5;
- CON-D95H50α65Δz0.5;

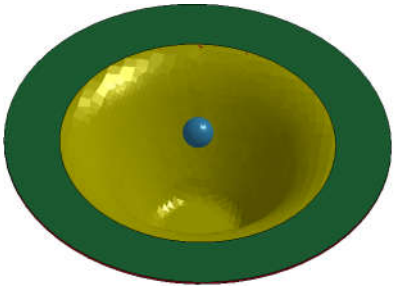
Înainte de fabricarea efectivă a celor cinci configurații de piese anterior enumerate, procesele de deformare ale acestora au fost simulate numeric cu elemente finite. Rezultatele obținute sunt prezentate în figura 5.3. Simulările numerice anticipează că primele patru configurații pot fi deformate fără ruperea materialului, excepție făcând piesa având unghiul de înclinare a pereților de 70°. După cum este prezentat în figura 5.3f, din analiza graficului forței axiale rezultat pentru piesa codificată CON-D95H50α70Δz0.5, pot fi observate o serie de oscilații bruște de valoare mică a forței ce acționează în direcția de deformare. Aceste oscilații pot indica apariția unor fisuri în materialul piesei.



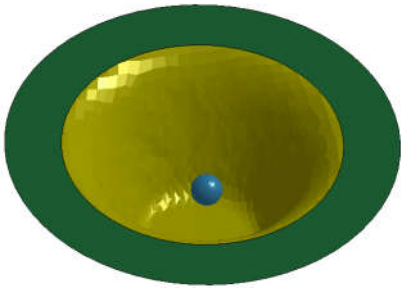
a) Configurația CON-D95H35α40Δz0.5



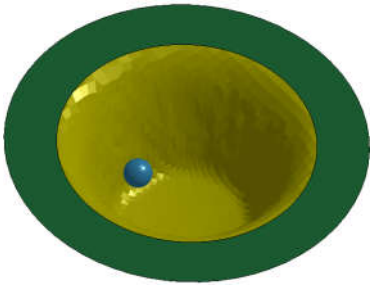
b) Configurația CON-D95H45α50Δz0.5



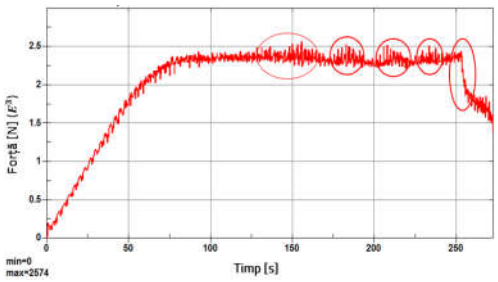
c) Configurația CON-D95H50α60Δz0.5



d) Configurația CON-D95H50α65Δz0.5



e) Configurația CON-D95H50α70Δz0.5



f) graficul forței axiale pentru CON-D95H50α70Δz0.5

Figura 5.3 Imagini din cadrul simulărilor numerice a procesului de deformare a pieselor cu D=95mm

Conform analizelor cu elemente finite efectuate, primele patru configurații ale pieselor au fost prelucrate cu succes, fără ruperea materialului, ultima piesă deformată în bune condiții bune, fiind piesa codificată CON-D95H50α65Δz0.5 (figura 5.4).

a) Configurația CON-D95H35α40Δz0.5

b) Configurația CON-D95H45α50Δz0.5

c) Configurația CON-D95H50α60Δz0.5

d) Configurația CON-D95H50α65Δz0.5

Figura 5.4 Piese având diametrul bazei mari a trunchiului de con D=95mm

În figura 5.5 este prezentată piesa deformată și zona în care peretele acesteia prezintă fisuri în material. Se pot observa în această figură, fisurile și tendințele de fisurare, pe ambele fețe ale piesei, apărute din loc în loc pe aproape toată circumferința acesteia. Odată cu fisurarea peretelui piesei, partea activă a sculei, nefiind tratată termic, a fost deteriorată considerabil. Pentru continuarea cercetărilor experimentale a fost fabricată o sculă de deformare nouă, căreia i-a fost aplicat inclusiv un tratament termic, conform celor prezentate în subcapitolul 4.3. Utilizând cea de-a doua sculă, deformarea configurației CON-D95H50α70Δz0.5 a fost reluată, pentru a stabili cu certitudine dacă pot fi deformate piese având unghiul de deformare α=70º. Și în cazul acestei a două încercări de a fabrica piesa, materialul semifabricatului s-a fisurat în zona peretelui înclinat (figura 5.5).

a) prima încercare

b) a doua încercare

Figura 5.5 Fisuri de material apărute la deformarea piesei CON-D95H50α70Δz0.5

Având în vedere că piesa cu unghiul de deformare de 70º nu a putut fi deformată fără ruperea materialului, s-a luat decizia deformării a încă trei piese intermediare, cuprinse ca valoare a unghiului de deformare între 65º și 70º. Scopul deformării acestor trei piese este acela de a identifica mai precis, unghiul maxim de deformare până la care pot fi fabricate piese de forma unui trunchi de con, pentru materialul DC05. Pentru aceste trei configurații nu au mai fost realizate analize cu elemente finite.

Configurațiile celor trei piese deformate sunt următoarele: CON-D95H50α67Δz0.5, CON-D95H50α68Δz0.5 și CON-D95H50α69Δz0.5.

Cele trei piese au fost deformate fără ruperea evidentă a materialului. În cazul piesei codificată CON-D95H50α69Δz0.5 însă, pot fi observate gâtuiri sau tendințe de fisurare a materialului, prin apariția unor microfisuri în suprafața acesteia. În figura 5.6 sunt prezentate cele trei piese deformate. Se poate concluziona că, din punct de vedere experimental, valoarea maximă sigură a unghiului de deformare pentru tabla de ambutisare DC05, cu grosimea de 1mm, până la care pot fi deformate piese fără ruperea materialului, utilizând procedeul SPIF, este valoarea de 68°.

a) CON-D95H50α67Δz0.5 *b) CON-D95H50α68Δz0.5* *c) CON-D95H50α69Δz0.5*

Figura 5.6 Piese deformate pentru identificarea unghiului maxim de deformare

Dispozitivul de fixare a tablei a fost astfel conceput încât să poată fi utilizat pentru deformarea unor piese în formă de trunchi de con având diametrul bazei mari de maximum 100mm. Pentru a valida posibilitatea deformării acestora, s-a decis încercarea de a deforma o piesă cu diametrul bazei mari al trunchiului de con D=100mm, având un unghi de deformare α=65° și înălțimea H=50mm. Configurația acestei piese, codificată CON-D100H50α65Δz0.5, este deformată menținând între peretele piesei și muchia racordată a plăcii suport, un spațiu minim Sp=0.5mm, fabricarea acesteia decurgând fără ruperea materialului, acest lucru fiind anticipat și prin intermediul simulării numerice (figura 5.7).

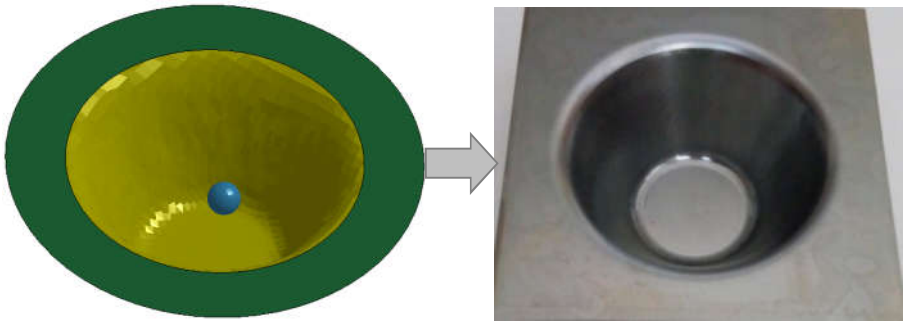


Figura 5.7 Piesa având diametrul D=100mm - simulare numerică și piesa deformată

În cadrul acestui prim lot de probă au fost deformate un număr total de 14 piese având configurații dimensionale diferite. Dintre cele 14 piese, 12 au fost deformate cu succes, iar două piese de aceeași configurație, CON-D95H50α70Δz0.5, au prezentat fisuri de material pe peretele acestora la ambele încercări de deformare. Configurațiile pieselor au fost măsurate utilizând o metodă de scanare 3D.

5.1.3 Prezentarea metodei de măsurare prin scanare 3D

Scanarea 3D este frecvent utilizată în domeniul ingineriei inverse a produselor (Reverse Engineering) [MAN12]. Utilizând această metodă se obține în final un model 3D al suprafețelor piesei scanate, astfel că, piesa reală poate fi măsurată pe orice direcție, în orice secțiune sau profil al acesteia. Metoda de măsurare prin scanare 3D a pieselor, a presupus parcurgerea următoarelor etape [NEA14]:

- pregătirea suprafețelor ce urmează a fi scanate - curățarea acestora și eventuala acoperire a suprafețelor lucioase cu o pulbere de culoare albă și aspect mat;
- scanarea 3D propriu-zisă, utilizând scanerul Comet L3D, și obținerea norului de puncte;
- procesarea norilor de puncte în softul CATIA V5, utilizând modulele *Digitized Shape Editor* și *Quick Surface Reconstruction*. În urma acestei etape au rezultat suprafețele 3D interioare ale pieselor;
- măsurarea abaterilor față de modelul CAD, tot în CATIA V5.

5.1.4 Măsurarea preciziei dimensionale a pieselor deformate în cadrul lotului de probă

Măsurarea abaterilor de la modelul CAD au fost realizate în CATIA V5, pe baza profilului pieselor rezultat în urma intersecției suprafețelor interioare cu un plan perpendicular pe flanșa pieselor, ce trece prin axa de rotație a acestora. În figura 5.8 sunt prezentate, spre exemplificare, abaterile măsurate pentru piesa de configurație CON-D85H25α55Δz1.5. Au fost realizate câte trei măsurători pentru fiecare piesă scanată: o măsurare în zona razei superioare a piesei, o măsurare în zona mediană a peretelui înclinat și o măsurătoare în centrul piesei, pe fundul acesteia. Valorile abaterilor măsurate în cele trei zone, pentru toate piesele scanate, sunt centralizate în tabelul 5.1.

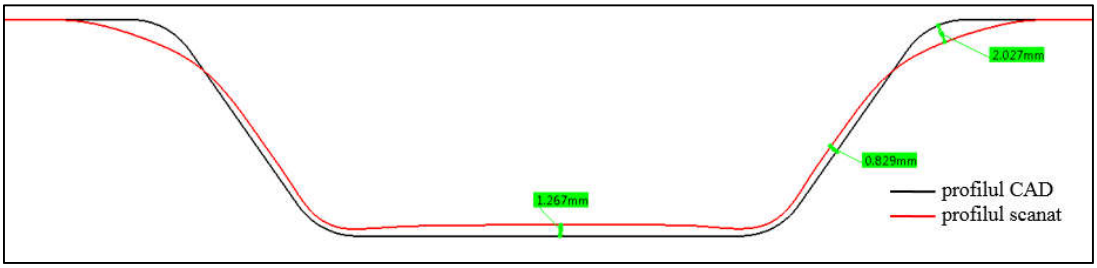


Figura 5.8 Abaterile de la modelul CAD pentru configurația CON-D85H25α55Δz1.5

În urma analizei măsurătorilor realizate prin scanare 3D, se pot desprinde următoarele concluzii:

- precizia în zona razei superioare crește pe măsură ce flanșa piesei are sprijin din partea plăcii suport cât mai aproape de peretele acesteia, concluzie valabilă și pentru alte tipuri de piese [NAS19];
- abaterile dimensionale ale pieselor în zona pereților înclinați depășesc valoarea de 0.8mm. Precizia în această zonă este îmbunătățită odată cu creșterea unghiului de deformare. În același timp, după depășirea valorii de 60° a unghiului de înclinare și odată cu creșterea înălțimii piesei, precizia dimensională în zona pereților se diminuează;
- precizia pieselor în zona fundului piesei este influențată de aria suprafeței acestuia. Cu cât fundul piesei are o suprafață mai mare rămasă nedeformată, cu atât precizia dimensională în această zonă este mai mică, scăderea cauzată de efectul de pernă al materialului.

Tabelul 5.1 Valorile abaterilor măsurate pentru piesele din lotul de probă

Configurația dimensională	Abateri în zona razei superioare [mm]	Abateri în zona pereților înclinați [mm]	Abateri în în zona fundului [mm]
CON-D85H20α35Δz0.5	1.449	0.909	1.11
CON-D85H20α35Δz1	1.451	0.947	1.161
CON-D85H35α50Δz0.5	1.881	0.869	1.082
CON-D85H25α55Δz1.5	2.027	0.829	1.267
CON-D95H35α40Δz0.5	0.803	0.921	1.284
CON-D95H45α50Δz0.5	0.973	0.831	0.988
CON-D95H50α60Δz0.5	0.77	0.918	1.023
CON-D95H50α65Δz0.5	0.739	1.135	1.554
CON-D95H50α67Δz0.5	0.696	1.068	1.192
CON-D95H50α68Δz0.5	0.581	1.049	1.235
CON-D95H50α69Δz0.5	0.503	1.056	1.247
CON-D100H50α65Δz0.5	0.154	1.204	1.49

În urma deformării lotului de piese de probă, au fost identificate limitările procesului pentru tabla de ambutisare DC05, cu grosimea de 1mm, din punctul de vedere al unghiului maxim de deformare și al diametrului maxim al bazei mari al pieselor. Se poate evidenția și faptul că o sculă de deformare netratată termic nu rezistă la deformarea a unui număr mare de piese și cu atât mai puțin la deformarea pieselor cu valori mari ale pereților înclinați.

5.2 Fabricarea unei serii de piese utilizând scula specială

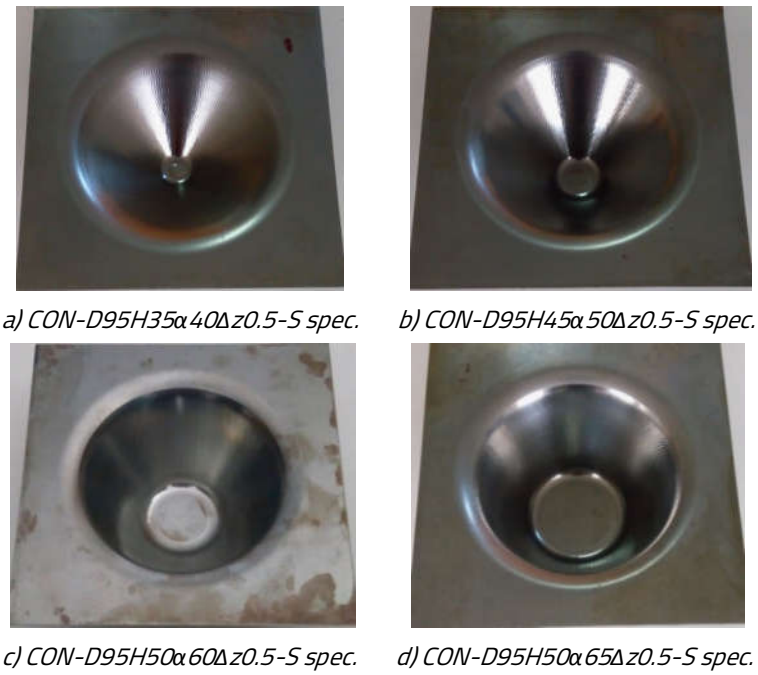
După cum a fost specificat în capitolul 2, obiectivul principal al tezei este: *desfășurarea unor cercetări referitoare la îmbunătățirea preciziei dimensionale a pieselor cave fabricate din tablă de oțel pentru ambutisare DC05, prin procedeul de deformare incrementală într-un punct de contact*, obiectiv ce va fi îndeplinit prin utilizarea unei scule ce utilizează principiul de lucru prin ciocănire circumferențială.

5.2.1 Deformarea unei serii de piese utilizând scula specială

Pentru a valida ipoteza anterioară, aceea că utilizând noua sculă specială se obțin piese cu o precizie mai mare a pereților, decât în cazul utilizării unei scule normale, s-a decis deformarea a patru configurații dimensionale ale pieselor având diametrul bazei mari *D* =95mm ca și în lotul de probă prezentat anterior, dar utilizând scula specială (figura 5.9). Din punct de vedere al parametrilor regimului de deformare, s-a utilizat o turație a sculei de 1000 rot/min și o viteză de avans de 1000mm/min. Se urmărește măsurarea abaterilor peretelui de la modelul CAD asociat, pentru fiecare

piesă în parte, urmând ca la final, acestea să fie analizate comparativ. În codificarea pieselor deformate utilizând scula specială, apare la sfârșit indicativul *S spec.* (de la *Sculă specială*) după cum urmează:

- CON-D95H35α40Δz0.5-S spec.;
- CON-D95H45α50Δz0.5-S spec.;
- CON-D95H50α60Δz0.5-S spec.;
- CON-D95H50α65Δz0.5-S spec.;



a) CON-D95H35α40Δz0.5-S spec. *b) CON-D95H45α50Δz0.5-S spec.*

c) CON-D95H50α60Δz0.5-S spec. *d) CON-D95H50α65Δz0.5-S spec.*

Figura 5.9 Piesa CON-D95H35α40Δz0.5-S spec. deformată utilizând scula specială

Cele patru piese deformate sunt prezentate în figura 5.9. După deformare, cele două seturi de piese având diametrul bazei mari *D* =95mm, cuprinzând câte patru configurații deformate utilizând fiecare sculă în parte, cea normală și cea specială, au fost măsurate utilizând metoda de scanare 3D.

5.2.2 Compararea preciziei dimensionale a pieselor deformate

Ambele seturi de piese deformate atât utilizând scula normală, cât și scula specială, au fost scanate 3D. Suprafețele interioare scanate ale acestora au fost remodelate în mediul virtual, pe baza norilor de puncte rezultați, acestea fiind suprapuse peste modelul 3D CAD al piesei proiectate. Au fost realizate măsurători ale abaterilor, în trei zone distincte, pe înălțimea pieselor, notate A1, A2 și A3 (figura 5.10).

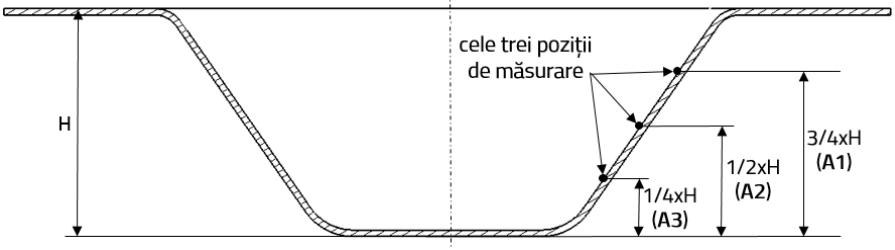


Figura 5.10 Pozițiile de măsurare pe piesele deformate

În figurile 5.11 și 5.12 sunt prezentate comparativ, măsurătorile abaterilor de la modelul CAD, efectuate în CATIA V5, pentru piesa codificată CON-D95H35α40Δz0.5, deformată cu ambele scule, cea normală

și cea specială. Valorile măsurate pentru toate piesele deformate au fost centralizate în tabelul 5.2 (SN – piese deformate utilizând scula normală, S spec. – piese deformate utilizând scula specială). Se observă că utilizând o sculă cu ciocănire circumferențială, se obține o precizie dimensională mai bună a pereților pieselor, comparativ cu precizia obținută utilizând o sculă normală. Procentual, precizia în zonele în care au fost efectuate măsurările, a fost îmbunătățită cu valorile din tabelul 5.3

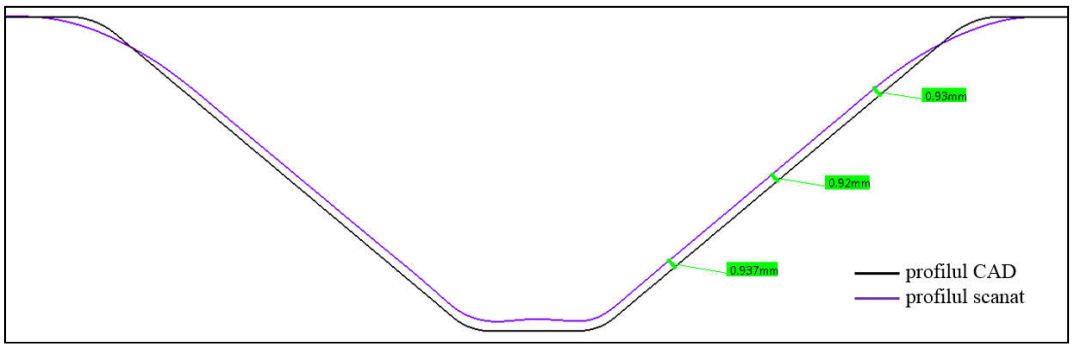


Figura 5.11 Măsurători ale abaterilor A1, A2 și A3 pentru configurația CON-D95H35α40Δz0.5

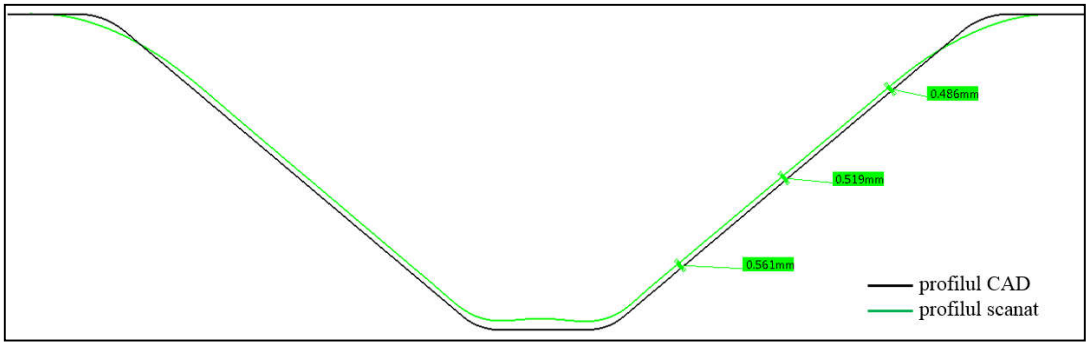


Figura 5.12 Măsurători ale abaterilor A1, A2 și A3 pentru configurația CON-D95H35α40Δz0.5-S spec.

Tabelul 5.2 Centralizarea abaterilor obținute pentru piesele având D=95mm

Configurația piesei	Abaterea **A1** [mm]		Abaterea **A2** [mm]		Abaterea **A3** [mm]	
	SN	S spec.	SN	S spec.	SN	S spec.
CON-D95H35α40Δz0.5 / S spec.	0.93	0.486	0.92	0.519	0.937	0.561
CON-D95H45α50Δz0.5 / S spec.	0.86	0.529	0.83	0.536	0.855	0.554
CON-D95H50α60Δz0.5 / S spec.	0.893	0.607	0.917	0.637	0.897	0.615
CON-D95H50α65Δz0.5 / S spec.	0.969	0.676	1.128	0.777	1.181	0.818

Tabelul 5.3 Îmbunătățirile procentuale ale abaterilor dimensionale utilizând scula specială

Configurația piesei (deformate utilizând scula specială)	Îmbunătățire precizie la 3/4xH (**A1**)	Îmbunătățire precizie la 1/2xH (**A2**)	Îmbunătățire precizie la 1/4xH (**A3**)	Valoare medie
CON-D95H35α40 z0.5-S spec.	≈47%	≈43%	≈40%	≈43%
CON-D95H45α50Δz0.5-S spec.	≈38%	≈35%	≈35%	≈36%
CON-D95H50α60Δz0.5-S spec.	≈32%	≈31%	≈32%	≈32%
CON-D95H50α65Δz0.5-S spec.	≈30%	≈31%	≈31%	≈31%

În urma analizei procentelor de îmbunătățire a preciziei dimensionale pe peretele pieselor, se poate observa că utilizând scula specială de deformare se obține o precizie îmbunătățită a suprafețelor deformate cu peste 30% comparativ cu precizia obținută utilizând deformarea cu o sculă normală.

5.3 Proiectarea unui plan experimental pentru determinarea preciziei dimensionale a pieselor fabricate utilizând scula specială

Având în vedere că rezultatele preliminare obținute utilizând scula specială cu ciocănire circumferențială sunt rezultate pozitive din punctul de vedere al îmbunătățirii preciziei dimensionale în zona pereților pieselor în formă de trunchi de con, s-a luat decizia efectuării unor serii de experimente în urma cărora să se determine influența parametrilor de lucru, viteza de avans și turația sculei, asupra preciziei dimensionale. Tehnica utilizată este cea a proiectării experimentelor *(Design of Experiments – DOE)*. Pentru planificarea planului de experimente implementat în cadrul cercetărilor, s-a ales utilizarea sistemului software Minitab 18. A fost planificat un plan factorial complet al cărui scop final este obținerea unor relații determinate pe cale experimentală prin care să poată fi preconizată precizia dimensională a pereților pieselor în formă de trunchi de con, deformate utilizând scula specială, piese confecționate din tablă de oțel de ambutisare DC05, în trei zone echidistante ale acestora.

Planul de experimente cuprinde deformarea pieselor în formă de trunchi de con utilizând procedeul SPIF și scula specială de deformare ce utilizează principiul de lucru prin ciocănire circumferențială. Mai exact, sunt deformate patru configurații dimensionale ale acestei forme de piese, având diametrul bazei mari al trunchiului de con D =100mm. Deformarea este realizată utilizând scula specială cu diametrul părții active d =12mm.

Factorii de influență controlabili, împreună cu nivelurile și simbolizările lor, sunt prezentați în tabelul 5.4. Primul factor, configurația piesei, are un număr de patru niveluri (patru configurații dimensionale), iar următorii doi factori (viteza de avans și turația sculei) au câte două niveluri fiecare.

Tabelul 5.4 Date specifice planului de experimente

Factor	Denumire factor	Unitate de măsură	Număr de niveluri	Valoarea nivelurilor	Simbolul nivelurilor
Configurația piesei	CONF	-	4	CON-D100H30α35Δz0.5-S spec.	C1
				CON-D100H45α45Δz0.5-S spec.	C2
				CON-D100H50α55Δz0.5-S spec.	C3
				CON-D100H50α65Δz0.5-S spec.	C4
Viteza de avans a sculei	v	mm/min	2	1000	v1
				1500	v2
Turația sculei	n	rot/min	2	1000	n1
				1500	n2

Pentru ca rezultatele finale să ofere un grad mare de veridicitate, în cadrul planului de experimente au fost prevăzute câte două piese pentru fiecare combinație posibilă a factorilor, astfel, a fost utilizat unul din principiile de bază DOE, replicarea. De asemenea, realizarea încercărilor s-a efectuat într-o ordine aleatorie, ordine pe care softul Minitab 18 a generat-o în mod automat, fiind respectat un alt principiu fundamental al DOE și anume cel al randomizării. Pentru a respecta principiul ortogonalității, cei trei factori sunt variați independent unul de celălalt [TEL07]. Utilizând un plan factorial complet prin combinarea celor trei factori de influență împreună cu nivelurile lor și realizând câte două replici pentru fiecare încercare în parte, în urma tuturor combinațiilor posibile au rezultat, în final, un număr total de 32 de încercări experimentale.

5.4 Fabricarea pieselor și măsurarea abaterilor obținute

Conform celor prezentate anterior, cele patru configurații dimensionale ale pieselor în formă de trunchi de con au fost deformate în câte două exemplare, variind factorii de influență, viteza de avans v și turația sculei n, în ordinea planificată conform planului de experimente proiectat. În figura 5.13 sunt prezentate cele 32 de piese fabricate, întregul plan de experimente a fost realizat de-a lungul unei singure zile, având o durată totală de prelucrare de aproximativ 14 ore.

Figura 5.13 Lotul de piese fabricat conform planului de experimente

După deformare, cele 32 de piese din planul de experimente au fost măsurate utilizând tehnica scanării 3D, prezentată în subcapitolul 5.1.3. Pentru o identificare facilă a fiecărei încercări experimentale, acestea au fost denumite utilizând alăturarea simbolului pentru fiecare nivel al fiecărui factor în parte conform tabelul 5.4, separate prin cratimă, la care se concatenează și simbolul r urmat de numărul replicii: 1 pentru prima replică și 2 pentru cea de-a doua replică. Spre exemplificare, pentru prima replică a piesei CON-D100H30α35Δz0.5-S spec., deformată utilizând o viteză de avans de 1000 mm/min și o turație a sculei de 1000 rot/min, codificarea construită conform regulii de mai sus este C1-v1-n1-r1.

Abaterile dimensionale ale pieselor măsurate față de modelul CAD, pentru toate cele 32 de încercări din cadrul planul de experimente realizat, sunt centralizate în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5 Centralizarea abaterilor măsurate pentru întregul plan de experimente

Încercarea experimentală	Abaterea **A1** [mm]	Abaterea **A2** [mm]	Abaterea **A3** [mm]
C1-v1-n1-r1	0.502	0.507	0.527
C1-v1-n1-r2	0.552	0.564	0.603
C1-v2-n1-r1	0.515	0.513	0.544
C1-v2-n1-r2	0.509	0.547	0.611
C1-v1-n2-r1	0.546	0.543	0.567
C1-v1-n2-r2	0.554	0.588	0.651
C1-v2-n2-r1	0.573	0.573	0.592
C1-v2-n2-r2	0.620	0.618	0.643
C2-v1-n1-r1	0.451	0.450	0.457
C2-v1-n1-r2	0.491	0.542	0.581
C2-v2-n1-r1	0.442	0.481	0.495
C2-v2-n1-r2	0.517	0.550	0.558
C2-v1-n2-r1	0.463	0.486	0.506
C2-v1-n2-r2	0.468	0.538	0.597
C2-v2-n2-r1	0.469	0.484	0.533
C2-v2-n2-r2	0.531	0.572	0.601
C3-v1-n1-r1	0.695	0.751	0.816
C3-v1-n1-r2	0.693	0.744	0.791
C3-v2-n1-r1	0.602	0.672	0.768
C3-v2-n1-r2	0.633	0.713	0.788
C3-v1-n2-r1	0.615	0.670	0.720
C3-v1-n2-r2	0.614	0.702	0.769
C3-v2-n2-r1	0.713	0.747	0.760
C3-v2-n2-r2	0.648	0.728	0.807
C4-v1-n1-r1	0.801	0.921	1.002
C4-v1-n1-r2	0.806	0.909	0.984
C4-v2-n1-r1	0.855	0.975	1.077
C4-v2-n1-r2	0.856	0.962	1.038
C4-v1-n2-r1	0.759	0.863	0.961
C4-v1-n2-r2	0.770	0.888	0.962
C4-v2-n2-r1	0.855	0.925	0.967
C4-v2-n2-r2	0.856	0.971	1.037

Toate încercările experimentale au fost realizate cu succes, niciuna din piesele planificate pentru a fi deformate, nu a prezentat dificultăți în procesul de fabricație, cum ar fi gâtuirea sau ruperea materialului.

5.5 Interpretarea rezultatelor și obținerea modelelor matematice

Abaterile măsurate au fost introduse în sistemul software Minitab 18, în care a fost planificat întregul experiment, acestea fiind răspunsuri în cadrul tehnicii DOE aplicate. În continuare, rezultatele sunt prelucrate utilizând analizele de regresii cu scopul de a obține o serie de relații matematice capabile să preconizeze precizia pieselor celor patru configurații ale piesei, în funcție de factorii de influență, viteza de avans și turația sculei speciale. În urma aplicării analizelor de regresii, având în planul experimental și un factor de influență de tip categorie, s-au obținut trei modele matematice cu ajutorul cărora pot fi calculate abaterile ce vor fi obținute prin deformarea pieselor utilizând scula specială, pentru materialul DC05. Modelele matematice pot fi sintetizate astfel:

$$A1 = k_1 + 0.000017\,n + 0.000052\,v \quad (5.1)$$

$$A2 = k_2 + 0.000012\,n + 0.000046\,v \quad (5.2)$$

$$A3 = k_3 + 0.000004\,n + 0.000041\,v \quad (5.3)$$

în care coeficienții k_1, k_2 și k_3 au, pentru fiecare configurație în parte, valorile din tabel 5.6.

Tabelul 5.6 Valorile coeficienților k1, k2 și k3 din cadrul modelelor matematice

Configurația piesei	Valorile coeficienților corespunzători abaterilor		
	k_1	k_2	k_3
C1 - CON-D100H30α35Δz0.5-S spec.	0.4601	0.4848	0.5363
C2 - CON-D100H45α45Δz0.5-S spec.	0.3928	0.4410	0.4851
C3 - CON-D100H50α55Δz0.5-S spec.	0.5651	0.6440	0.7214
C4 - CON-D100H50α65Δz0.5-S spec.	0.7335	0.8549	0.9476

În cadrul modelelor analizelor de regresie sunt calculați automat doi parametri importanți care oferă informații cu privire la rezultatele obținute. Cei doi parametrii sunt: deviația standard *S* și coeficientul de determinație R^2. În tabelul 5.7 sunt prezentate valorile obținute a celor doi parametrii, *S* și R^2, pentru cele trei abateri dimensionale *A1, A2* și *A3*.

Tabelul 5.7 Valorile deviației standard și a coeficientului de determinație

Numele abaterii dimensionale	Valoarea deviației standard *S*	Valoarea coeficientului de determinație R^2
A1	0.0372596	93.68 %
A2	0.0377073	95.82 %
A3	0.0433441	95.58 %

Având în vedere valorile coeficienților prezentați în tabelul de mai sus, se poate considera că modelele matematice obținute pe baza analizelor de regresie aplicate asupra măsurătorilor efectuate, pot fi utilizate pentru a calcula abaterile dimensionale ale pieselor, în zona pereților înclinați, cu o bună precizie a rezultatelor.

Pentru a confirma corectitudinea relațiilor matematice obținute în urma analizelor de regresii, s-a luat decizia validării acestora prin experimente practice, ce sunt prezentate în subcapitolul următor.

5.6 Validarea practică a modelelor matematice pentru determinarea preciziei dimensionale

Pentru a valida practic modelele matematice, s-a decis să se deformeze câte o piesă din fiecare configurație, utilizând o viteză de avans de 1250mm/min și o turație a sculei speciale de 1250rot/min. După deformare, abaterile dimensionale au fost măsurate în fiecare din cele trei poziții prezentate în figura 5.10, acestea fiind comparate în continuare cu abaterile calculate utilizând modelele matematice obținute în urma analizelor de regresie. Cele patru configurații au fost deformate în bune condiții, fără ruperea materialului (figura 5.14).

Figura 5.14 Cele patru piese deformate pentru validarea rezultatelor analizelor de regresie

Pentru a fi asociate mai ușor cu setul de piese deformate din cadrul planului de experimente, cele patru piese au fost codificate conform configurațiilor dimensionale din planul de experimente (*C1, C2, C3* și *C4*), la care a fost adăugat, la sfârșitul denumirii, simbolul *V* (validare). Rezultatele abaterilor dimensionale față de modelul CAD, au fost centralizate în tabelul 5.8 în care, pentru o analiză comparativă a datelor, au fost specificate și valorile pentru aceleași abateri, calculate utilizând modelele matematice obținute.

Tabelul 5.8 Centralizarea abaterilor dimensionale măsurate și a celor calculate

Încercarea experimentală	Valoarea abaterii A1 [mm]		Valoarea abaterii A2 [mm]		Valoarea abaterii A3 [mm]	
	Măsurată	Calculată	Măsurată	Calculată	Măsurată	Calculată
C1-V	0.525	0.546	0.539	0.557	0.577	0.593
C2-V	0.469	0.479	0.502	0.514	0.522	0.541
C3-V	0.662	0.651	0.731	0.717	0.806	0.777
C4-V	0.787	0.820	0.908	0.927	0.989	1.003

În urma analizei datelor centralizate în tabelul 5.8, se poate observa că diferențele dintre cele două valori ale abaterilor dimensionale sunt foarte mici, de ordinul sutimilor. Cea mai mare diferență între abaterile măsurate și cele calculate utilizând modelele matematice determinate experimental este în cazul configurației *C3-V*, pentru abaterea *A3*, pentru care diferența este de aproape trei sutimi de milimetru. Celelalte abateri calculate au o diferență față de cele măsurate pe piesele deformate de mai puțin de două sutimi de milimetru, în cele mai multe cazuri aceste diferențe fiind de ordinul micronilor. Se poate afirma în aceste condiții, că planul de experimente împreună cu analiza regresiilor au fost realizate corect iar relațiile obținute pot fi utilizate cu succes pentru a determina precizia dimensională a pereților înclinați pentru piesele în formă de trunchi de con, confecționate din tablă de ambutisare DC05 cu grosimea de 1mm, deformate utilizând o sculă specială cu ciocănire circumferențială.

5.7 Concluzii privind cercetările experimentale referitoare la precizia pieselor fabricate prin deformare incrementală, din tablă DC05

În prima parte a capitolului, au fost prezentate: sistemul tehnologic utilizat pentru implementarea procedeului SPIF, strategia de deformare, parametrii de lucru ai procesului și forma și dimensiunile semifabricatelor din tablă. Cercetările experimentale au fost realizate în trei etape:

- într-o primă etapă, au fost desfășurate cercetări, utilizând scule normale de deformare, cu privire la identificarea limitărilor procesului, pentru materialul DC05. A fost identificată, ca valoare maximă a unghiului de deformare până la care se pot deforma piese în bune condiții, o valoare a unghiului de 68°. A fost verificată posibilitatea de deformare a pieselor în formă de trunchi de con, până la diametrul maxim de 100mm, pentru care a fost proiectat dispozitivul de fixare a tablei. De asemena, s-a evidențiat și faptul că, o sculă netratată termic, nu rezistă condițiilor de deformare, chiar dacă materialul sculei este mai dur decât materialul semifabricatelor din tablă;
- într-o a doua etapă a cercetărilor experimentale, s-a validat ipoteza presupusă inițial, aceea că utilizând o sculă specială ce folosește principiul de lucru al ciocănirii circumferențiale, se obțin piese cu o precizie mai mare în zona pereților înclinați, comparativ cu situația utilizării unei scule normale de deformare. Sunt măsurate abaterile dimensionale ale pereților în trei poziții (*A1, A2* și *A3)* fiind comparate cu abaterile obținute, în aceleași poziții, pentru piesele deformate utilizand o sculă normală. Au fost identificate îmbunătățiri procentuale ale preciziei, de peste 30% utilizând scula specială, validându-se astfel, ipoteza inițială;
- a treia etapă a cercetărilor experimentale a constat în proiectarea, utilizând tehnica DOE în softul Minitab 18, a unui plan experimental privind deformarea incrementală a pieselor, folosind scula specială de deformare. În urma planului de experimente, a rezultat un număr total de 32 de piese, ce au fost deformate și măsurate, iar valorile abaterilor dimensionale obținute, au fost introduse ca răspunsuri, în softul Minitab. A urmat analiza de regresii a planului de experimente, în urma careia au rezultate trei modele matematice ce exprimă dependența între precizia pieselor în zona pereților înclinați și parametrii procesului de deformare, viteza de avans și turația sculei. Modelele matematice au fost validate din punct de vedere practic.

6 CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1 Concluzii generale

În cadrul tezei de doctorat intitulată *Cercetări privind deformarea incrementală a pieselor din tablă de oțel DC05* se prezintă cercetările desfășurate de autor privind utilizarea procedeului de deformare incrementală într-un punct de contact în fabricarea pieselor de forma unui trunchi de con, din tablă de oțel DC05, cu grosimea de 1mm. Pentru deformarea pieselor s-au utilizat atât o sculă normală având partea activă de formă semisferică, cât și o sculă specială care folosește principiul de deformare prin ciocănire circumferențială. Obiectivul principal al tezei a fost îmbunătățirea preciziei dimensionale obținute în zona pereților înclinați ai pieselor fabricate.

După o scurtă introducere în domeniul deformării incrementale a tablelor, lucrarea conține șase capitole, în care au fost prezentate următoarele aspecte:

- în primul capitolul se prezintă stadiul actual al cercetărilor în domeniul deformării incrementale fiind prezentate: principiul de lucru al procedeului, avantajele și dezavantajele acestuia, tipurile de deformări incrementale și aplicații ale acestora, mașini-unelte, scule și dispozitive utilizate pentru implementarea procedeului, materiale utilizate pentru deformare etc.;
- în capitolul 2 se prezintă obiectivul principal al cercetării și obiectivele derivate din acesta;
- capitolul 3 prezintă metoda de aplicare a analizei cu elemente finite a procesului de deformare incrementală, precum și un instrument software dezvoltat de autor, denumit TMPG, care permite generarea rapidă a datelor necesare pentru descrierea traiectoriei sculei în softul FEM, ANSYS APDL. Instrumentul software TMPG este o contribuție majoră adusă în cadrul simulării FEM pentru procedeele de deformare incrementală, ușurând/micșorând/simplificând considerabil etapa de preprocesare a modelului FEM pentru analiză. În acest capitol sunt prezentate și cercetările experimentale realizate pentru a obține proprietățile reale ale materialului DC05, necesare pentru analizele FEM.
- capitolul 4 este dedicat proiectării dispozitivului de fixare și a celor două tipuri de scule utilizate pentru deformarea pieselor. Dispozitivul de fixare este proiectat în mediul CAD CATIA V5, este supus analizei cu elemente finite în ANSYS Workbench pentru verificarea rigidității acestuia, este îmbunătățit pentru a obține deformații cât mai mici la acțiunea solicitărilor din cadrul procesului de deformare, fiind în final fabricat utilizând baza materială disponibilă în cadrul departamentului Ingineria fabricației al Universității Transilvania din Brașov;
- cercetările experimentale din cadrul tezei sunt prezentate în capitolul 5. În cadrul acestui capitol sunt identificate limitările procedeului pentru materialul DC05, utilizând o sculă normală de deformare, sunt prezentate și primele încercări de deformare utilizând scula specială cu ciocănire circumferențială, identificând și îmbunătățirile pe care utilizarea acesteia le aduce din punctul de vedere al preciziei dimensionale a pereților înclinați ai pieselor. Un plan de experimente a fost proiectat utilizând tehnica DOE, în urma căruia s-au obținut trei modele matematice prin care pot fi calculate abaterile dimensionale ale pieselor deformate, de la modelul teoretic CAD. Modelele matematice au fost validate și din punct de vedere practic.

- ultimul capitol prezintă concluziile generale ale tezei, principalele contribuții ale autorului în domeniul studiat, diseminarea rezultatelor, dar și o serie de direcții viitoare de cercetare.

Concluziile generale ale cercetărilor realizate sunt sintetizate în continuare:

1. deformarea incrementală a tablelor este un procedeu flexibil de fabricație care a evoluat mult în ultimii ani, din punctul de vedere al performanțelor obținute, care stârnește tot mai mult interesul producătorilor din domeniul deformării plastice la rece;
2. simularea procesului de deformare incrementală este dificil de realizat, aceasta presupunând un volum mare de lucru ce trebuie depus pentru implementarea traiectoriei sculei de deformare în cadrul softului FEM utilizat;
3. dispozitivele de fixare a tablelor ce sunt utilizate în cadrul deformărilor incrementale trebuie să fie suficient de rigide, astfel încât să aibă deformații cât mai mici în urma acțiunii solicitărilor din cadrul procesului de deformare, evitând astfel introducerea abaterilor de la forma și dimensiunile pieselor, abateri care scad precizia dimensională și cresc toleranțele de fabricație ale acestora;
4. alături de alte materiale cu proprietăți ridicate de plasticitate precum aliajele de aluminiu sau cupru, oțelurile de ambutisare pot fi deformate cu succes, utilizând procedeul SPIF, ajungându-se la valori ale unghiurilor pereților înclinați apropiate de 70°, prelucrați dintr-o singură trecere;
5. utilizarea unei scule speciale ce folosește principiul de ciocănire circumferențială, poate conduce la obținerea unor precizii îmbunătățite ale pereților înclinați pentru piesele în formă de trunchi de con;
6. metodele de analiză statistică a datelor rezultate în urma unui plan de experimente sunt instrumente utile în obținerea unor modele matematice ce determină dependențe între factorii ce influențează procesul și rezultatele obținute. Modelele matematice trebuie validate practic, pentru a devenii instrumente utile în ingineria fabricației.

6.2 Contribuții personale

În urma cercetărilor prezentate în cadrul tezei, autorul și-a adus o serie de contribuții personale în domeniul deformării incrementale a tablelor. Acestea sunt următoarele:

1. realizarea unei sinteze a stadiului actual al cercetărilor cu privire la domeniul deformării incrementale a tablelor, cu evidențierea principalelor aspecte ce vizează procedeul (Capitolul 1);
2. conceperea unui fișier parametrizat, de tip șablon, pentru softul ANSYS APDL, ce ușurează aplicarea analizelor numerice cu elemente finite, pentru simularea deformării incrementale a pieselor de revoluție (Capitolul 3, subcapitolul 3.2);
3. conceperea unui instrument software original, care micșorează semnificativ timpul necesar etapei de preprocesare a modelelor FEM pentru analiză, prin facilitarea generării datelor necesare în ANSYS APDL pentru descrierea traiectoriei sculei, pentru procedeul de deformare incrementală (Capitolul 3, subcapitolul 3.4.2);

4. determinarea, pe cale experimentală, a proprietăților reale ale materialului utilizat, oțel de ambutisare DC05, necesare pentru obținerea unor rezultate precise în urma simulării FEM a procesului de deformare incrementală (Capitolul 3, subcapitolul 3.3);
5. realizarea unei serii de analize cu elemente finite pentru deformarea incrementală într-un punct de contact a pieselor în formă de trunchi de con, fabricate din tablă de oțel pentru ambutisare DC05, cu grosimea de 1mm (Capitolul 3, subcapitolul 3.5 și Capitolul 5, subcapitolul 5.1);
6. proiectarea, analiza FEM și fabricarea unui dispozitiv de fixare al semifabricatelor, necesar implementării în practică a procedeului de deformare incrementală într-un punct de contact (Capitolul 4, subcapitolele 4.1 și 4.2);
7. validarea rezultatelor obținute în cadrul analizei cu elemente finite a rigidității dispozitivului de fixare, prin măsurarea deformațiilor acestuia în timpul procesului de deformare (Capitolul 4, subcapitolul 4.3);
8. identificarea limitărilor procedeului SPIF pentru materialul DC05, din punctul de vedere al unghiului maxim de deformare, până la care pot fi deformate, fără ruperea materialului, piese în formă de trunchi de con (Capitolul 5, subcapitolul 5.1);
9. desfășurarea unor cercetări privind utilizarea unei scule speciale de deformare prin ciocănire circumferențială, pentru îmbunătățirea preciziei dimensionale în zona pereților înclinați ai pieselor (Capitolul 5, subcapitolele 5.2 ÷ 5.4);
10. determinarea unor modele matematice și validarea practică a acestora, modele ce pot fi utilizate pentru calcularea preciziei dimensionale ce poate fi obținută în zona pereților înclinați ai pieselor confecționate din tablă DC05 de grosime 1mm, utilizând o sculă specială cu ciocănire circumferențială (Capitolul 5, subcapitolul 5.5, 5.6, relațiile 5.13 ÷ 5.15).

6.3 Diseminarea rezultatelor

O parte dintre rezultatele obținute în urma cercetărilor desfășurate în cadrul stagiului de doctorat au fost diseminate prin publicarea a cinci articole științifice, ca prim autor, prezentate în cadrul unor conferințe internaționale sau publicate în jurnale de specialitate, după cum urmează:

- un articol publicat intr-un jurnal de specialitate indexat ISI cu FI 1.182 [NAS18a];
- un articol indexat ISI-WoS-CPCI [NAS17a];
- două articole indexate în alte baze de date internaționale [NAS17b] și [NAS18b];
- un articol prezentat la o conferință și aflat în curs de publicare [NAS19].

6.4 Direcții viitoare de cercetare

Cercetările prezentate în cadrul tezei de doctorat contribuie la evidențierea performanțelor procedeelor neconvenționale de deformare incrementală a tablelor. Pentru ca aceste procedee să devină mult mai atractive pentru marii producători din domeniu, e nevoie ca performanțele acestora să fie considerabil îmbunătățite. În acest sens, în domeniul deformării incrementale într-un punct de contact, pot fi considerate ca posibile direcții viitoare de cercetare, următoarele:

a) cercetarea influenței parametrilor de lucru asupra rugozității suprafețelor obținute utilizând scule cu ciocănire circumferențială;
b) extinderea cercetărilor privind deformarea utilizând scule cu ciocănire circumferențială, pentru alte tipuri și forme de piese cum ar fi piramida patrulateră, hexagonală și alte poliedre, forme sferice, forme complexe;
c) identificarea turației maxime a sculei speciale, cu care pot fi deformate piese fără ruperea materialului;
d) cercetarea influenței diametrului și a altor parametrii geometrici ai sculei cu ciocănire circumferențială, asupra procedeului SPIF;
e) proiectarea unor scule speciale de deformare, care să utilizeze capete de deformat amovibile, de dimensiuni și geometri diferite.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

[AER10] Aerens, R., Eyckens, P., Van Bael, A., Duflou, J. R., *Force Prediction for Single Point Incremental Forming Deduced from Experimental and FEM Observations*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 46, p. 969–982, 2010

[ALV14] Alves De Sousa, R. J., Ferreira, J. A. F., Sa De Farias, J. B., Torrao, J. N. D., Afonso, D. G., Martins, M. A. B. E., *SPIF-A: On the Development of a New Concept of Incremental Forming Machine*. Structural Engineering and Mechanics, vol. 49, p. 645–660, 2014

[AMB03] Ambrogio, G., Filice, L., Fratini, L., Micari, F., *Some Relevant Correlation Between Process Parameters and Process Performance in Incremental Forming Of Metal Sheet*. Proceedings of the 6th ESAFORM Conference on Material Forming, 175–178. 2003

[AMI14] Amino, M., Mizoguchi, M., Terauchi, Y., Maki, T., *Current Status of 'Dieless' Amino's Incremental Forming*. Procedia Engineering - 11th International Conference on Technology of Plasticity, vol. 81, p. 54–62, 2014

[ANS19] *ANSYS Mechanical APDL Documentation*. Disponibil: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ai_sinfo/ans_intro.html, Accesat la 21.02.2019

[BAM10] Bambach, M., *A Geometrical Model of the Kinematics of Incremental Sheet Forming for the Prediction of Membrane Strains and Sheet Thickness*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, p. 1562–1573, 2010

[BAN90] Banabic, D., Dorr, R. I., *Deformabilitatea tablelor metalice subțiri. Metoda curbelor limita de deformare ADTS*. Editura OIDICM, Bucureşti, România, 1992

[BAO15] Bao, W., Chu, X., Lin, S., Gao, J., *Experimental Investigation on Formability and Microstructure of AZ31B Alloy in Electropulse-Assisted Incremental Forming*. Materials and Design, vol. 87, p. 632–639, 2015

[BEH16] Behera, A. K., Ou, H., *Effect of Stress Relieving Heat Treatment on Surface Topography and Dimensional Accuracy of Incrementally Formed Grade 1 Titanium Sheet Parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 87, p. 3233–3248, 2016

[BEH17] Behera, A. K., De Sousa, R. A., Ingarao, G., Oleksik, V., *Single Point Incremental Forming: An Assessment if the Progress and Technology Trends from 2005 to 2015*. Journal of Manufacturing Processes, vol. 27, p. 37–62, 2017

[BER67] Berghahn, W. G., Murray Jr., G. F, *Method of Dielessly Forming Surfaces of Revolution*. Brevet de invenție US 3 316 745, 1967

[BHA11] Bhattacharya, A., Maneesh, K., Venkata Reddy, N., Cao, J., *Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 133, p. 61020-8, 2011

[BLA11] Blaga, L., *Contribuții la deformarea incrementală a tablelor metalice subțiri*. Teză de doctorat, Universitatea "LUCIAN BLAGA" din Sibiu, 2011

[BOL14] Bologa, O., *Prelucrări prin deformare plastică la rece*. Editura Universității "LUCIAN BLAGA" din Sibiu, România, 2014

[CAV10] Cavaler, L. C. C., Schaeffer, L., Rocha, A. S., Peruch, F., *Surface Roughness in the Incremental Forming of Aisi 304L Stainless Steel Sheets*. Far East Journal of Mechanical Engineering and Physics, vol. 1, pp. 87–98, 2010

[CIU07] Ciurea, A., Bordei, M., Șaban, R., *Elemente de Știinta și Ingineria Materialelor*. Editura Universității "Dunărea de Jos" din Galați, România, 2007

[DAI98] Daisuke Abe, S. M., *Numerical controlled sequentially forming device, and its method.* Brevet de invenție JP 10-263740, 1998

[DAL13] Daleffe, A., Schaeffer, L., Fritzen, D., Castelan, J., *Analysis of the Incremental Forming of Titanium F67 Grade 2 Sheet*. Key Engineering Materials, vol. 554–557, p. 195–203, 2013

[DAV18] Davarpanaha, M. A., Malhotra, R., *Formability and Failure Modes in Single Formability and Failure Modes in Single Point Forming Metal-Polymer Laminates*. Procedia Manufacturing, vol. 26, p. 343–348, 2018

[DEN17] Deng, W.J., Zhang, J.Y., Liu, L.W., He, D., Xia, W., *Simulation Analysis of a New Chips Recycling Process Termed Forming Extrusion Cutting*. International Journal of Simulation Modelling, vol. 16, p. 694-706, 2017

[DUF05a] Duflou, J. R., Lauwers, B., Verbert, J., Tunckol, Y., De Baerdemaeker, H., *Achievable Accuracy in Single Point Incremental Forming: Case Studies*. International ESAFORM Conference on Material Forming, vol. 8, p. 675–678, 2005

[DUF05b] Duflou, J. R., Szekeres, A., Vanherck, P., *Force Measurements for Single Point Incremental Forming: An Experimental Study*. Advanced Materials Research, vol. 6-8, p. 441–448, 2005

[DUF07b] Duflou, J. R., Lauwers, B., Verbert, J., *Study on the Achievable Accuracy in Single Point Incremental Forming*. Advanced Methods in Material Forming, p. 251–262, 2007

[DUR18] Durante, M., Formisano, A., Lambiase, F., *Incremental Forming of Polycarbonate Sheets*. Journal of Materials Processing Tech., vol. 253, p. 57–63, 2018

[EMM10] Emmens, W. C., Sebastiani, G., Van Den Boogaard, A. H., *The Technology of Incremental Sheet Forming - a Brief Review of the History*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, p. 981–997, 2010

[ESS11] Essa, K., Hartley, P., *An Assessment of Various Process Strategies for Improving Precision in Single Point Incremental Forming*. International Journal of Material Forming, vol. 4, p. 401–412, 2011

[FIL02] Filice, L., Fratini, L., Micari, F., *Analysis of Material Formability in Incremental Forming*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 51, p. 199–202, 2002

[FRI17] Fritzen, D., Daleffe, A., Dos Santos De Lucca, G., Castelan, J., Schaeffer, L., Alves de Sousa, R. J., *Incremental Forming of Cu-35Zn Brass Alloy*. International Journal of Material Forming, 2017

[GAT16] Gatea, S., Ou, H., McCartney, G., *Review on the Influence of Process Parameters in Incremental Sheet Forming*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 87, p. 479–499, 2016

[GAT18] Gatea, S., Xu, D., Ou, H., Mccartney, G., *Evaluation of Formability and Fracture of Pure Titanium in Incremental Sheet Forming*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 95, p. 625–641, 2018

[HAN08] Han, F., Mo, J., *Numerical Simulation and Experimental Investigation of Incremental Sheet Forming Process*. Journal of Central South University of Technology, vol. 15, p. 581–587, 2008,

[HAN11] Han, F., Mo, J., Gong, P., Li, M., *Method of Closed Loop Springback Compensation for Incremental Sheet Forming Process*. Journal of Central South University of Technology, vol. 18, p. 1509, 2011

[HIN14] Hino, R., Kawabata, K., Yoshida, F., *Incremental Forming with Local Heating by Laser Irradiation for Magnesium Alloy Sheet*. Procedia Engineering, 11th International Conference on Technology of Plasticity, vol. 81, p. 2330–2335, 2014

[HIW19] Direct Industry, *HIWIN - Balls screws - tehnical information*. Disponibil: http://pdf.directindustry.com/pdf/hiwin/ballscrews/14370-67561.html, Accesat la 21.02.2019

[ISE01b] Iseki, H., *An Approximate Deformation Analysis and FEM Analysis for the Incremental Bulging of Sheet Metal Using a Spherical Roller*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 111, p. 150–154, 2001

[ISE89] Iseki, H., Kato, K., Sakamoto, S., *Flexible and Incremental Sheet Metal Forming using a Spherical Roller*. Proc. 40th JJCTP, pp. 41–44, 1989

[ISE93] Iseki, H., Kato, K., Sakamoto, S., *Forming Limit of Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging with a Spherical Roller*. Proceedings 4th ICTP, Beijing, China, p. 1635–1640, 1993

[ISI16] Isidore, B. B. L., Hussain, G., Shamchi, S. P., Khan, W. A., *Prediction and Control of Pillow Defect in Single Point Incremental Forming Using Numerical Simulations*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 30, p. 2151–2161, 2016

[JAC08] Jackson, K. P., Allwood, J. M., Landert, M., *Incremental Forming of Sandwich Panels*. J Journal of Materials Processing Technology, vol. 204, p. 290–303, 2008

[JAC09] Jackson, K., Allwood, J., *The Mechanics of Incremental Sheet Forming*. J Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, p. 1158–1174, 2009

[JES05a] Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., Allwood, J., *Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 54, p. 88–114, 2005

[JES05c] Jeswiet, J., Young, D., *Forming Limit Diagrams for Single-Point Incremental Forming of Aluminium Sheet*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 219, p. 359–364, 2005

[JES08] Jeswiet, J., Geiger, M., Engel, U., Kleiner, M., Schikorra, M., Duflou, J., Neugebauer, R., Bariani, P., Bruschi, S., *Metal Forming Progress Since 2000*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 1, p. 2–17, 2008

[KUM14] Kumar, Y., Kumar, S., *Incremental Sheet Forming (ISF).* Advances in Material Forming and Joining, p. 29–46, 2014

[KUR14] Kurra, S., Regalla, S. P., *Experimental and Numerical Studies on Formability of Extra-Deep Drawing Steel in Incremental Sheet Metal Forming*. Journal of Materials Research and Technology, vol. 3, p. 158–171, 2014

[LEH15] Lehtinen, P., Vaisanen, T., Salmi, M., *The Effect of Local Heating by Laser Irradiation for Aluminum, Deep Drawing Steel and Copper Sheets in Incremental Sheet Forming*. Physics Procedia, 15th Nordic Laser Materials Processing Conference, vol. 78, p. 312–319, 2015

[LES67] Leszak, E., *Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming*. Brevet de invenție US 3 342 051, 1967

[LIU13] Liu, Z., Li, Y., Meehan, P. A., *Experimental Investigation of Mechanical Properties, Formability and Force Measurement for AA7075-O Aluminum Alloy Sheets Formed by Incremental Forming*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 14, p. 1891–1899, 2013

[LU14] Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ou, H., Moser, N. H., Cao, J., *Mechanism Investigation of Friction-Related Effects in Single Point Incremental Forming Using a Developed Oblique Roller-Ball Tool*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 85, p. 14–29, 2014

[LU15] Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ai, S., Long, H., Ou, H., Cao, J., *Investigation of Material Deformation Mechanism in Double Side Incremental Sheet Forming*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 93, p. 37–48, 2015

[MAN12] Manolescu, A., Fota, A., Oancea, G., *Recognizing Algorithm for Digitized Rotational Parts*. Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, p. 457–466, 2012

[MAS78] Mason, B., *Sheet Metal Forming for Small Batches*. Lucrare de licență, Universitatea din Nottingham, 1978

[MAT95] Matsubara, S., *Method and device for forming metal plate*. Brevet de invenție JP 07-132329, 1995

[MIC07] Micari, F., Ambrogio, G., Filice, L., *Shape and Dimensional Accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the Art and Future Trends*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 191, p. 390–395, 2007

[MOH15] Mohammadi, A., Vanhove, H., Attisano, M., Ambrogio, G., Duflou, J. R., *Single Point Incremental Forming of Shape Memory Polymer Foam*. MATEC Web of Conferences, vol. 21, 2015

[MUG14b] Mugendiran, V., Gnanavelbabu, A., *Comparison of FLD And Thickness Distribution on AA5052 Aluminium Alloy Formed Parts by Incremental Forming Process*. Procedia Engineering, 12th Global Congress on Manufacturing and Management, vol. 97, p. 1983–1990, 2014

[NAS17a] **Năsulea, D.**, Oancea, G., *Incremental Deformation: A Literature Review*. MATEC Web of Conferences, vol. 121, p. 3017, 2017

[NAS17b] **Năsulea, D.**, Oancea, G., *Parametric Design of Dies for Cutting and Drawing Using Catia*. Bulletin of the Transilvania University of Braşov, vol. 10, p. 85, 2017

[NAS18a] **Năsulea, D.**, Oancea, G., *Integrating of a New Software Tool Used for Tool Path Generation in the Numerical Simulation of Incremental Forming Process*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol. 64, p. 643–651, 2018

[NAS18b] **Năsulea, D.**, Oancea, G., *Design and Manufacturing of a Fixing Device for Incremental Sheet Forming Process*. MATEC Web of Conferences, vol. 178, 2018

[NAS19] **Năsulea, D.**, Oancea, G., *Research on Manufacturing of Pyramidal Frustum Parts Using Single Point Incremental Forming Process*. Prezentată în cadrul conferinței internaționale Innovative Manufacturing Engineering & Energy (în curs de publicare într-un volum IOP), 2019

[NEA13] Neagoe, I., Filip, A. C., Vasiloni, M. A., *Experimental Researches on the Limit Angle of Conical Parts Manufactured by Single Stage Incremental Forming on CNC Lathes*. Applied Mechanics and Materials, vol. 371, p. 168–172, 2013

[NEA14] Neagoe, I., Filip, A. C., Manolescu, A., *Digital Scanning Method for Thickness Analysis of Hollow Parts Manufactured by Incremental Forming on a CNC Lathe*. Applied Mechanics and Materials, vol. 657, p. 142–146, 2014

[NEA15] Neagoe, I., *Tehnologii inovative de deformare plastică la rece*. Editura Universității Transilvania din Brașov, România, vol. I, 2015

[NIM13] Nimbalkar, D. H., Nandedkar, V. M., *Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components*. International Journal of Engineering Research and Applications, vol. 3, p. 39–51, 2013

[OLE05] Oleksik, V. Ş., *Cercetări teoretice şi experimentale privind procedeul de deformare incrementală a tablelor metalice de fabricație indigenă*. Teză de doctorat, Universitatea "LUCIAN BLAGA" din Sibiu, 2005

[OLE10] Oleksik, V., Pascu, A., Deac, C., Fleacă, R., Bologa, O., Racz, G., Experimental Study on The Surface Quality of The Medical Implants Obtained by Single Point Incremental Forming. International Journal of Material Forming, vol. 3, p. 935–938, 2010

[ORA10] Oraon, M., Sharma, V., *Sheet Metal Micro Forming : Future Research Potentials*. AMAE International Journal on Production and Industrial Engineering, vol. 1, p. 32–36, 2010

[OTS18] Otsu, M., Nagai, S., Miura, T., Okada, M., Yoshimura, H., Matsumoto, R., Muranakad, T., Forming *Accuracy Improvement by Double-Side Incremental Forming*. Procedia Manufacturing, vol. 15, p. 1177–1183, 2018

[PAN17] Panjwani, D., Priyadarshi, S., Jain, P. K., Samal, M. K., Roi, J. J., Roi, D., Tandon, P., A Novel Approach Based on Flexible Supports for Forming Non-Axisymmetric Parts in SPISF. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 92, p. 2463–2477, 2017

[PET08] Petek, A., Podgornik, B., Kuzman, K., Čekada, M., Waldhauser, W., Vižintin, J., *The Analysis of Complex Tribological System of Single Point Incremental Sheet Metal Forming – SPIF*. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, vol. 54, p. 266–273, 2008

[SIL10] Silva, M. B., Alves, L. M., Martins, P. A. F., *Single Point Incremental Forming of PVC: Experimental Findings and Theoretical Interpretation*. European Journal of Mechanics, vol. 29, p. 557–566, 2010

[STE13] Stembalski, M., Skoczynski, W., *Determination of the Friction Coefficient as a Function af Sliding Speed and Normal Pressure for Steel C45 and Steel 40 HM*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 13, p. 444–448, 2013

[TAN05] Tanak, S., Nakamura, T., Hayakawa, K., Nakamura, H., Motomura, K., *Incremental Sheet Metal Forming Process for Pure Titanium Denture Plate*. Advanced Technology of Plasticity – Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity, p. 135–136, 2005

[TEL07] Telford, J. K., *A Brief Introduction to Design of Experiments*. Johns Hopkins ApL Technical DigesT, vol. 27, p. 224–232, 2007

[TER12] Tera, M., *Contribuții privind ambutisarea unor table bimetalice*. Rezulat teză de doctorat, Universitatea "LUCIAN BLAGA" din Sibiu, 2012

[TOR15] Torrão, J. N. D., Ferreira, J. A. F., De Sousa, R. J. A., *Control and Execution of Incremental Forming Using a Stewart Platform*. CONTROLO'2014 - Proceedings of the 11th Portuguese Conference on Automatic Control. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 321, p. 293–302. 2015

[TRZ17] Trzepiecinski, T., Lemu, H.G., Fejkiel, R., *Numerical Simulation of Effect of Friction Directionality on Forming of Anisotropic Sheets*. International Journal of Simulation Modelling, vol. 4, p. 590-602, 2017

[TUO04] Tuominen T. (Twincam Oy), *Method and apparatus for forming three-dimensional shapes in a sheet metal*. Brevet de invenție EP 1 560 668 A1 (WO 2004/030843 A1), 2004

[VAN09] Van Sy, L., *Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet*. Teză de doctorat, Universitatea din Padua, 2009

[VER08] Verbert, J., Belkassem, B., Henrard, C., Habraken, A. M., Gu, J., Sol, H., Lauwers, B., Duflou, J. R., *Multi-Step Toolpath Approach to Overcome Forming Limitations in Single Point Incremental Forming*. International Journal of Material Forming, vol. 1, p. 1203–1206, 2008

[YOG18] Yoganjaneyulu, G., Narayanan, C. S., Narayanasamy, R., *Investigation on the Fracture Behavior of Titanium Grade 2 Sheets by Using the Single Point Incremental Forming Process*. Journal of Manufacturing Processes, vol. 35, p. 197–204, 2018

[ZEI18] Zein, H., Al-Mufadi, F., *Using Forming Limit Stress Diagram (FLSD) for Investigation the Influence of the Geometrical and the Operating Parameters on the Deep Drawing Force*. Minia Journal of Engineering & Technology, vol. 37, p. 152–174, 2018

[ZHA15a] Zhang, Z., Ren, H., Xu, R., Moser, N., Smith, J., Ndip-Agbor, E., Malhotra, R., Xia, Z. C., Ehmann, K. F., Cao, J., *A Mixed Double-Sided Incremental Forming Toolpath Strategy for Improved Geometric Accuracy*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 137, p. 51007, 2015

*** SR EN 10130:2007 - Produse plate laminate la rece din oțel cu conținut scăzut de carbon pentru formare la rece. Condiții tehnice de livrare.

*** SR EN ISO 6892-1:2016 - Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metodă de încercare la temperatura ambiantă.

REZUMATUL TEZEI

Rezumatul tezei în limba română

Conducător științific
prof. univ. dr. ing. Gheorghe OANCEA

Doctorand
ing. Marius-Daniel NĂSULEA

Cercetări privind deformarea incrementală a pieselor din tablă de oțel DC05

Cercetările desfășurate în cadrul tezei de doctorat vizează aspecte referitoare la precizia dimensională a pieselor din tablă, fabricate prin procedeul de deformare incrementală într-un singur punct de contact. Necesitatea îmbunătățirii preciziei dimensionale a pieselor a rezultat, ca obiectiv principal, în urma unei ample analize a stadiul actual al cercetărilor desfășurate în domeniul deformării incrementale, prezentate în prima parte a tezei. Au fost abordate și aspecte ce vizează analiza numerică cu elemente finite a procesului de deformare incrementală. Etapa de preprocesare a modelului FEM, pentru acest procedeu este o etapă mare consumatoare de timp, în cadrul cercetărilor efectuate fiind dezvoltat și prezentat un instrument software original care micșorează considerabil timpul necesar pentru implementarea analizei cu elemente finite pentru procedeul de deformare incrementală. Cercetările experimentale au presupus efectuarea unor investigații asupra pieselor fabricate, materializate prin obținerea unei precizii îmbunătățite ale pereților înclinați, prin utilizarea unei scule speciale de deformare. Au fost obținute trei modele matematice care descriu dependența dintre parametrii de lucru aferenți procedeului și precizia dimensională a pieselor în zona pereților înclinați, acestea fiind validate experimental.

Thesis Summary in English Language

Scientific Advisor
prof. univ. dr. eng. Gheorghe OANCEA

PhD Candidate
eng. Marius-Daniel NĂSULEA

Research Regarding the Incremental Forming of DC05 Steel Sheet Parts

The research carried out within the PhD thesis concerns issues related to the dimensional precision of the sheet metal parts manufactured using single point incremental forming process. The necessity of improving the parts dimensional accuracy resulted, as a main objective, from an extensive analysis of the current state of the research carried out in the incremental forming field, presented in the first part of the thesis. There were also approached aspects regarding the finite elements analysis of the incremental forming process. The preprocessing phase of the FEM model, for this process, is a time-consuming stage, through the research carried out in this direction, an original software tool has been developed and presented, which considerably reduce the time needed to implement the finite element analysis for the incremental forming process. The experimental research involved investigations upon the manufactured parts, materialized by obtaining improved precision of the inclined walls, by using a special forming tool. Three mathematical models were obtained, which describe the dependence between the process parameters and the parts dimensional precision, in the area of the inclined walls, which are experimentally validated.

CURRICULUM VITAE

CV în limba română

Marius-Daniel NĂSULEA

Informații personale:

Data nașterii:

Domiciliul stabil:

Telefon:

Adresă de e-mail: nasulea.marius.daniel@unitbv.ro

Educație și formare:

Tipul de formare: Ciclul III – studii universitare de doctorat – doctorand cu frecvență

Perioada: 2015 – prezent

Instituția de învățământ: Universitatea "Transilvania" din Brașov

Departamentul: Ingineria Fabricației

Domeniul: Inginerie Industrială

Domeniul fundamental: Științe Inginerești

Tipul de formare: Ciclul II – studii universitare de masterat – masterand cu frecvență

Perioada: 2013 – 2015

Instituția de învățământ: Universitatea "Transilvania" din Brașov

Departamentul: Ingineria Fabricației

Domeniul: Inginerie Industrială

Facultatea: Inginerie Tehnologică și Management Industrial

Specializarea: Inginerie și Fabricație Inovativă

Tipul de formare: Ciclul I – studii universitare de licență – student cu frecvență

Perioada: 2009 – 2013

Instituția de învățământ: Universitatea "Transilvania" din Brașov

Departamentul: Ingineria Fabricației

Domeniul: Inginerie Industrială

Facultatea: Inginerie Tehnologică și Management Industrial

Specializarea: Tehnologia Construcțiilor de Mașini

Experiență profesională:

Ocupație conform fișa postului: cadru didactic asociat

Perioada: octombrie 2017 - prezent

Compania: Universitatea "Transilvania" din Brașov

Ocupație conform fișa postului: specialist CAD

Perioada: octombrie 2015 - aprilie 2017

Compania: SC DTR Draxlmaier Sisteme Tehnice România S.R.L

Ocupație conform fișa postului: inginer proiectant

Perioada: noiembrie 2013 – octombrie 2015

Compania: SC DTR Draxlmaier Sisteme Tehnice România S.R.L

Ocupație conform fișa postului: programator mașini de frezat cu comandă numerică (CAM) – 3/5 axe

Perioada: iulie 2013 – noiembrie 2013

Compania: SC Plastic Technology S.R.L (actual Aero Part Expert)

CV in enghish language

Marius-Daniel NĂSULEA

Personal information:

Date of birth:

Adress:

Mobile number:

E-mail adress: nasulea.marius.daniel@unitbv.ro

Education and Training:

Type: 3th cicle – PhD univeritary studies – PhD student

Period: 2015 – present

Education Institution: "Transilvania" University of Brașov

Departament: Manufacturing Engineering

Domain: Industrial Engineering

Fundamental Domain: Engineering Sciences

Type : 2th cicle – MSc univeritary studies – MSc student

Period: 2013 – 2015

Education Institution: "Transilvania" University of Brașov

Departament: Manufacturing Engineering

Domain: Industrial Engineering

Faculty: Technological Engineering and Industrial Management

Study program: Innovative Engineering and Manufacturing

Type : 1st cicle – BSc univeritary studies – BSc student

Period: 2009 – 2013

Education Institution: "Transilvania" University of Brașov

Departament: Manufacturing Engineering

Domain: Industrial Engineering

Faculty: Technological Engineering and Industrial Management

Study program: Manufacturing Engineering

Experiență profesională:

Occupation: associate professor

Period: Octomber 2017 - present

Company: "Transilvania" University of Brașov

Occupation: CAD specialist

Period: Octomber 2015 - April 2017

Company: SC DTR Draxlmaier Sisteme Tehnice România S.R.L

Occupation: design engineer

Period: November 2013 – Octomber 2015

Company: SC DTR Draxlmaier Sisteme Tehnice România S.R.L

Occupation: CNC programmer (CAM) – 3/5 axis

Period: July 2013 – November 2013

Company: SC Plastic Technology S.R.L (current Aero Part Expert)