



UNIVERSITATEA “*LUCIAN BLAGA*” DIN SIBIU
FACULTATEA DE INGINERIE

Ing. Dipl. Ionuț - Moise CHERA

**Contribuții privind obținerea prin deformare plastică incrementală a
pieselor complexe folosind sisteme robotice**

Conducător științific: Prof. Univ. Dr. Ing. Octavian BOLOGA

Cuprins

1. Introducere
2. Stadiul actual privind procedeul de deformare incrementală a tablelor subțiri
3. Cercetări teoretice cu privire la procedeul de deformare incrementală
4. Simularea numerică a procesului de deformare incrementală cu contact singular prin metoda elementului finit
5. Stabilirea și generarea traiectoriilor ce urmează a fi parcurse de efectorul final (poansonul) la deformarea incrementală cu contact singular
6. Cercetări experimentale cu privire la procedeul de deformare incrementală cu contact singular
7. Concluzii finale – Principalele contribuții ale lucrării

Cuvinte cheie:

Procedeu neconvențional de deformare, deformare incrementală, robot industrial, analiză cu element finit, sistem optic de măsurare, măsurarea în timp real a deformațiilor.

Rezumat

Procedeele de prelucrare prin deformare plastică la rece au aplicabilitate în: industria constructoare de autovehicule, industria aeronautică, industria bunurilor de larg consum, industria electronică și electrotehnică și industria alimentară.

În ultimele decenii s-a dezvoltat conceptul de fabricare inteligentă. Unul dintre cele mai importante aspecte al acestui concept este cel legat de flexibilitate. Piața de desfacere a generat nevoia de flexibilitate, prin prisma diversității cererii din partea populației de pe mapamond. Procedeele clasice de deformare plastică la rece, cum ar fi: deformarea volumică și ambutisarea, oferă nenumărate avantaje în cazul producției de masă, dar în cazul producției de prototipuri și de componente pentru seria zero, fabricarea de matrițe nu se justifică din cauza costului ridicat.

Din acest motiv, în domeniul deformării plastice la rece, în urma cercetării, au luat naștere noi procedee de deformare a tablelor. Deformarea incrementală vine ca o soluție la problema menționată anterior, deoarece nu necesită utilizarea matrițelor în variantă clasică. Acest procedeu utilizează scule de deformare cu geometrii simple și se poate aplica folosind diverse utilaje, cum ar fi: mașini special construite pentru deformarea incrementală, mașini de frezat cu comandă numerică și roboți industriali.

La procedeul de deformare incrementală, pentru realizarea formei unei piese, de regulă poansonul realizează o mișcare de avans axial, continuă sau în trepte, după o direcție perpendiculară pe suprafața semifabricatului din tablă, iar sistemul de fixare a semifabricatului execută o mișcare plan-orizontală. Principala caracteristică a acestui procedeu este aceea că în timpul procesului de deformare, doar o mică parte din suprafața semifabricatului se află în contact cu scula de deformare. Procedeul prezintă un grad ridicat de flexibilitate deoarece cu același utilaj tehnologic, folosind aceeași sculă de deformare și împreună cu aceeași placă de sprijin a semifabricatului, în funcție de programarea mișcărilor poansonului se pot obține o multitudine de piese de forme cave.

Abordarea tematicii prezentei lucrări s-a datorat și din considerente legate de continuarea studierii procedeului de deformare incrementală inițiat de cercetătorii din cadrul Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice (CSCDP) din cadrul Universității „Lucian Blaga” din Sibiu.

Teza de doctorat este structurată în șapte capitole în care sunt prezentate aspecte legate de cercetări teoretice și experimentale privind procedeul de deformare incrementală cu contact singular a tablelor subțiri.

În primul capitol a fost prezentată justificarea tematicii lucrării și de asemenea structura tezei de doctorat.

Al doilea capitol intitulat „Stadiul actual privind procedeul de deformare incrementală a tablelor subțiri” începe cu o prezentare a procedeeului și cu clasificarea procedeeelor de deformare incrementală tablelor subțiri. În continuare au fost prezentate sculele și echipamentele tehnologice utilizate la procedeele de deformare incrementală. Un alt subcapitol a fost dedicat deformării incrementale cu contact singular realizată la cald. Printre sursele de căldură utilizate pentru încălzirea semifabricatului se numără: rezistențe electrice, surse laser, și încălzirea semifabricatului prin inducție.

În cadrul subcapitolului dedicat procedeeelor alternative de deformare incrementală au fost prezentate o serie de echipamente menite să aducă îmbunătățiri asupra anumitor aspecte considerate dezavantaje în cadrul procedeeului standard de deformare incrementală. Dintre procedeele alternative se pot enumera: deformarea incrementală prin ciocănire și deformarea incrementală cu jet de apă.

La sfârșitul celui de-al doilea capitol au fost prezentate domeniile de utilizare a pieselor obținute prin procedeul de deformare incrementală și de asemenea au fost trasate direcțiile de cercetare ale acestei teze de doctorat.

Capitolul trei, intitulat „Cercetări teoretice cu privire la procedeul de deformare incrementală” prezintă analiza stării de deformație și ipoteze pe baza cărora s-a definit relația unghiului maxim de deformare la procedeul de deformare incrementală a tablelor subțiri.

Mergând pe direcția exprimării unghiului maxim de deformare în funcție de mărimile geometrice ce definesc sistemul de deformare incrementală a condus spre o relație ce nu poate fi rezolvată analitic. Dar, pe baza rezultatelor obținute de către cercetători în domeniul experimental, s-a putut merge pe direcția exprimării unghiului maxim de deformare în funcție de curba limită de deformare la rupere a materialului. Cunoscând panta dreptei ce definește această curbă limită de deformare la rupere, s-a putut determina valoarea numerică a unghiului maxim de deformare.

Pentru a completa descrierea matematică a procesului de deformare incrementală prin metode analitice bazate pe teoria plasticității, utilizarea metodelor numerice a căpătat o mai mare importanță în ultimii ani. Dintre aceste metode numerice, metoda elementului finit iese

în evidență, datorită aplicabilității sale la scară mare în domeniul ingineriei. Această metodă poate să obțină rezultate calculate foarte apropiate de cele obținute pe cale experimentală.

În capitolul patru, intitulat „Simularea numerică a procesului de deformare incrementală cu contact singular prin metoda elementului finit” sunt prezentate rezultatele obținute în urma aplicării metodei mai sus menționate procesului de deformare incrementală.

În primul subcapitol este prezentat aparatul matematic utilizat de majoritatea programelor de analiză cu element finit în domeniul neliniar. Pentru a rezolva analiza în domeniul neliniar, s-a construit un model parametrizat a sistemului de deformare incrementală cu ajutorul programului ANSYS. Rezolvarea analizelor cu element finit s-a realizat cu ajutorul programului LS-DYNA.

Primul tip de analiză cu element finit a urmărit determinarea influenței parametrilor geometrici ai sistemului de deformare incrementală asupra deformațiilor principale respectiv secundare și asupra subțierii relative a semifabricatului.

Parametrii geometrici ce au fost luați în considerare sunt diametrul poansonului D_p , pasul după direcția OZ (p_z), și unghiul de înclinație a pereților piesei considerate ψ . Pentru determinarea influenței acestor parametri s-au efectuat două tipuri de analize. În primul tip de analiză s-a urmărit influența diametrului poansonului D_p și a pasului p_z asupra mărimilor menționate anterior pentru piese de tipul trunchi de piramidă cu o înălțime de 23 mm. În cazul celui de-al doilea tip de analiză s-a urmărit influența unghiului de înclinație al pereților ψ pentru piese de tip trunchi de piramidă cu înălțimea de 16 mm.

Al treilea tip de analiză cu element finit a urmărit determinarea influenței diferitelor tipuri de traiectorii ale poansonului asupra deformațiilor principale respectiv secundare și asupra subțierii relative a semifabricatului. Pentru acest tip de analiză s-au modelat patru traiectorii distincte din care rezultă în urma analizelor patru piese cu geometrii diferite: trunchi de piramidă triunghiulară, trunchi de piramidă pătratică, trunchi de piramidă octogonală și trunchi de piramidă dodecagonală. Forma geometrică ce descrie baza fiecărei piese a fost înscrisă într-un cerc cu diametrul de 75 mm pentru a urmări în ce fel adăugarea mai multor laturi geometriei de bază influențează valorile deformațiilor și ale subțierii relative a materialului semifabricatului.

Pe lângă prezentarea rezultatelor ce au fost obținute la sfârșitul analizelor, au mai fost obținute și rezultate ce prezintă evoluția mărimilor caracteristice pe parcursul procesului de deformare incrementală cu contact singular. Mărimile ce au fost studiate în cadrul acestor analize au fost: deformația principală, deformația secundară, subțierea relativă a materialului și valoarea deplasării nodale a materialului după direcția OZ.

Pentru aceste analize cu element finit, s-a folosit o singură mărime pentru definirea diametrului poansonului și anume 10 mm, un pas incremental de 0.25 mm iar grosimea materialului s-a definit ca fiind 0.4 mm. La acest tip de analiză, s-au considerat patru tipuri de traiectorii: traiectorie ce descrie o piesă de tip trunchi de piramidă triunghiulară, trunchi de piramidă pătratică, trunchi de piramidă octogonală și trunchi de piramidă dodecagonală. Pentru fiecare din aceste piese s-a studiat evoluția mărimilor caracteristice în două seturi de elemente de referință poziționate pe suprafața acestora. Primul set de elemente de referință este poziționat pe una din muchiile piesei, în zona în care apar cele mai mari variații ale deformației secundare. Cel de-al doilea set de elemente de referință este poziționat pe peretele înclinat al piesei, în zona în care deformația principală prezintă o variație importantă.

În cadrul subcapitolului intitulat „Determinarea mărimilor și a variației forțelor în procesul de deformare incrementală” au fost prezentate graficele mărimilor și a variației în timp a forțelor (după cele trei direcții de deplasare OX; OY; OZ și forța rezultantă) ce apar în timpul procesului de deformare incrementală cu contact singular pentru tipurile de analize prezentate anterior. Graficele forțelor au fost extrase cu ajutorul programului ANSYS.

Una din principale direcții de cercetare ale acestei teze de doctorat a fost măsurarea deformațiilor respectiv a subțierii relative a materialului pieselor în timpul procesului de deformare incrementală a tablelor subțiri. În literatura de specialitate, această metodă presupune măsurarea „on-line” a deformațiilor. Metoda utilizează sistemul optic de măsurare ARAMIS pentru a capta în timp real, imagini care vor fi mai apoi analizate. În urma rezultatelor obținute se pot determina valorile mărimilor caracteristice procesului de deformare incrementală. Utilizarea metodei de măsurare „on-line” face necesară expunerea feței semifabricatului ce nu vine în contact cu poansonul de deformare spre camerele foto ale sistemului optic de măsurare ARAMIS. Distanța optimă de măsurare recomandată de producător, dintre semifabricat și camerele foto ale sistemului de măsurare ARAMIS, este de aproximativ un metru. Luând aceste două aspecte în considerare, a rezultat cea de-a doua direcție de cercetare, și anume: proiectarea și executarea unui stand experimental care să permită atât realizarea pieselor prin procedeul de deformare incrementală cu contact singular cât și realizarea măsurărilor „on-line” a mărimilor caracteristice ale procesului.

Din aceste două direcții principale de cercetare a luat naștere cea de-a treia direcție de cercetare, și anume: găsirea unui echipament tehnologic cu care să se poată realiza deformarea incrementală cu contact singular dar care să nu obtureze câmpul optic al camerelor foto ce realizează măsurarea „on-line” a deformațiilor. Studiind literatura de specialitate în domeniul abordat, s-a observat o tendință tot mai crescută de folosire a

roboților industriali ca echipamente de lucru în cazul încercărilor experimentale de deformare incrementală a tablelor subțiri. Astfel, s-a optat pentru folosirea unui robot industrial serial cu șase grade de mobilitate, KUKA KR6.

În capitolul cinci, intitulat „Stabilirea și generarea traiectoriilor ce urmează a fi parcurse de efectorul final (poansonul) la deformarea incrementală cu contact singular” au fost prezentați pașii necesari obținerii codului program pentru comanda și conducerea robotului industrial folosit în procesul de deformare incrementală cu contact singular. Traiectoriile folosite în cadrul analizelor cu element finit respectiv în cadrul încercărilor experimentale au fost modelate cu ajutorul programului CATIA V5.

Cercetările prezentate în subcapitolul „Simularea mișcărilor poansonului prin parcurgerea traiectoriilor generate” au avut ca scop principal simularea și validarea mișcărilor robotului ce vor fi folosite fie în cadrul analizelor cu element finit, fie în încercările experimentale efectuate pentru studiul deformării incrementale cu contact singular. Simularea și validarea traiectoriilor a fost făcută cu ajutorul programului DELMIA. Programul DELMIA permite de asemenea generarea și exportarea codului program necesar pentru comanda și conducerea robotului industrial folosit în procesul de deformare incrementală cu contact singular.

Capitolul șase, intitulat „Cercetări experimentale cu privire la procedeul de deformare incrementală cu contact singular” prezintă în prima parte rezultatele cercetărilor experimentale care au avut drept scop determinarea proprietăților reale ale materialului semifabricatului folosit la deformarea incrementală. Datele obținute au fost utilizate la definirea proprietăților materialului folosit pentru simulările prin metoda elementului finit a procesului de deformare incrementală cu contact singular. În cea de-a doua parte este reprezentat studiul și cercetările experimentale legate de comportarea semifabricatului la deformarea incrementală cu contact singular.

În cadrul subcapitolului „Instalații experimentale utilizate pentru cercetări” sunt prezentate diferite instalații folosite pentru realizarea încercărilor experimentale cum ar fi: instalația experimentală pentru studiul procedeului de deformare incrementală, sistemul optic de măsurare a deformațiilor ARAMIS și mașina de încercare la tracțiune uniaxială INSTRON 5587.

Cercetările prezentate în subcapitolul „Determinarea proprietăților reale ale materialului semifabricatelor din tablă prin încercarea la tracțiune uniaxială” au avut ca scop obținerea datelor reale ale materialului semifabricatului necesare programelor ce utilizează metoda elementului finit pentru simularea procesului de deformare incrementală. Datele au

fost introduse sub forma unei curbe definite din perechi de puncte ce reprezintă deformațiile și tensiunile reale. Metodă de testare a deformabilității materialului semifabricatului a fost încercarea la tracțiune uniaxială. Această metodă constă în fixarea unei epruvete la ambele capete și apoi deformarea acesteia cu o viteză constantă, cu ajutorul mașinii de încercat la tracțiune, până când epruveta se rupe. Forța de tracțiune este citită cu ajutorul unui captor de forțe, iar deformația cu ajutorul unui extensometru. Determinarea coeficienților de anizotropie s-a realizat cu ajutorul sistemului optic ARAMIS care, în timpul încercărilor la tracțiune, a fost utilizat pe post de extensometru.

În subcapitolul intitulat „Influența parametrilor geometrici asupra mărimilor caracteristice procesului de deformare incrementală cu contact singular” au fost prezentate rezultatele cercetărilor ce au urmărit stabilirea influenței mărimilor geometrice (diametrul poansonului D_p , pasul incremental p_z , unghiul de înclinație a peretelui piesei deformate ψ) asupra mărimilor caracteristice (deformația principală, deformația secundară, subțierea relativă a materialului semifabricatului).

În cazul primului grup de experimente s-a urmărit influența diametrului poansonului D_p și a pasului incremental p_z asupra mărimilor caracteristice. Pentru aceste încercări au fost folosite trei valori pentru definirea diametrului poansonului, și trei valori pentru pasul incremental, rezultând un număr de nouă încercări experimentale.

Forma geometrică aleasă pentru piesele deformate incremental a fost aceea de trunchi de piramidă pătratică în cazul ambelor grupuri de experimente.

În cazul celui de-al doilea tip de experiment s-a urmărit influența unghiului de înclinație a pereților piesei asupra mărimilor caracteristice. Pentru aceste încercări s-au modelat patru traiectorii distincte, astfel încât au rezultat patru piese de tip trunchi de piramidă pătratică cu unghiul de înclinație a peretelui de 45° , 55° , 65° respectiv 75° .

Scopul încercărilor experimentale prezentate în subcapitolul „Determinarea influenței tipurilor de traiectorii ale poansonului asupra mărimilor caracteristice” este acela de a determina ce influență au diferite tipuri de traiectorii ale poansonului asupra deformațiilor principale respectiv secundare precum și asupra subțierii relative a semifabricatului.

Pentru acest tip de experiment s-au modelat șase traiectorii distincte din care rezultă în urma încercărilor experimentale șase piese cu geometrii diferite: trunchi de piramidă triunghiulară, trunchi de piramidă pătratică, trunchi de piramidă pentagonală, trunchi de piramidă hexagonală, trunchi de piramidă octogonală și trunchi de piramidă dodecagonală.

Forma geometrică ce descrie baza fiecărei piese a fost înscrisă într-un cerc cu diametrul de 75 mm pentru a urmări în ce fel adăugarea mai multor laturi geometriei bazei influențează deformațiile și subțierea relativă a materialului.

Pe lângă rezultatele finale ale măsurătorilor, sistemul optic de măsurare ARAMIS pune la dispoziția utilizatorului și rezultate ale deformațiilor în diferite stadii ale procesului. În subcapitolul „Determinarea și analizarea variației în timp a mărimilor caracteristice procesului de deformare incrementală” sunt prezentate serii de imagini ce prezintă evoluția în timp a deformațiilor principale respectiv secundare și a subțierii relative a materialului semifabricatului.

Astfel de rezultate diferențiază sistemul optic de măsurare ARAMIS față de alte sisteme de măsurare cum ar fi ARGUS. Sistemul optic de măsurare ARGUS folosește aceleași două camere foto de înaltă rezoluție, dar măsurarea corpurilor se poate realiza doar la sfârșitul procesului de deformare. În plus, sistemul optic de măsurare ARAMIS pune la dispoziția utilizatorului și rezultate ce prezintă grafic și numeric variația în timp a mărimilor caracteristice ale procesului de deformare incrementală în orice punct de pe suprafața piesei.

Pentru a putea studia evoluția în timp a deformației principale, deformației secundare și a subțierii relative a materialului în timpul procesului de deformare incrementală cu contact singular s-au definit două seturi de puncte poziționate pe suprafața piesei, din care s-au extras valori ale mărimilor caracteristice în diferite stagii ale procesului folosind programul ARAMIS. Cu ajutorul primului set de puncte, poziționate de-a lungul muchiei laterale a pieselor, s-a dorit să se evidențieze evoluția deformației secundare iar folosind cel de-al doilea set de puncte, poziționate de-a lungul traiectoriei poansonului pe peretele înclinat al piesei, s-a dorit evidențierea variației în timp a deformației principale respectiv a subțierii relative a materialului.

În subcapitolul intitulat „Determinarea influenței parametrilor geometrici asupra preciziei de formă a pieselor obținute prin deformare incrementală” sunt prezentate rezultatele cercetărilor ce au urmărit determinarea influenței parametrilor geometrici (diametrul poansonului D_p , pasul incremental p_z , unghiul de înclinație a peretelui piesei deformate ψ) asupra preciziei de formă a pieselor obținute prin procedeul de deformare incrementală cu contact singular.

Sistemul optic de măsurare ARAMIS pune la dispoziția utilizatorului suprafața tridimensională a pieselor măsurate. Suprafața pieselor deformate poate fi exportată din programul ARAMIS sub forma unui fișier cu extensia .stl, ce poate fi, la rândul său, importat în majoritatea programelor CAD. Utilizând programul CATIA V5, suprafețele pieselor

deformate ce au fost importate din softul ARAMIS, au fost comparate cu modelele CAD (teoretice) ale pieselor. Pentru cazurile experimentale enumerate mai sus s-a urmărit determinarea diferenței de nivel Δ_h a fundului piesei față de profilul teoretic. Valorile maxime ale diferenței de nivel a fundului piesei s-au înregistrat în zona de mijloc a bazei mici pentru piesele de tip trunchi de piramidă.

În cadrul ultimului capitol, intitulat „Concluzii finale – Principalele contribuții ale lucrării” sunt rezumate concluziile și realizările tezei de doctorat, dintre care se merită a fi menționate:

Concluzii:

- deformarea incrementală se pretează, în special, pentru realizarea de prototipuri sau serie zero la un preț rezonabil;
- acest procedeu de deformare prezintă un grad ridicat de flexibilitate deoarece utilizează scule de deformare cu geometrii simple și utilaje diverse, cum ar fi: mașini special construite pentru deformarea incrementală, mașini de frezat cu comandă numerică și roboți industriali;
- metoda analizei cu element finit în domeniul neliniar poate fi implementată cu succes pentru simularea procesului de deformare incrementală cu contact singular;
- deformațiile principale respectiv secundare și subțierea relativă a materialului au o distribuție neuniformă pe suprafața pieselor deformate incremental. În cazul deformațiilor principale s-a observat o localizarea pronunțată a valorilor maxime de-a lungul traiectoriei pe care s-a deplasat poansonul;
- forța rezultantă din proces crește odată cu mărirea diametrului poansonului de deformare și, de asemenea, crește odată cu mărirea valorii unghiului de înclinație a peretelui piesei. În schimb, valorile maxime ale forței rezultante scad odată cu creșterea numărului de laturi ce definesc geometria bazei pieselor obținute prin deformare incrementală;
- în urma cercetărilor experimentale la procedeul de deformare incrementală, s-a observat ca dacă se mărește diametrul poansonului, valorile deformațiilor cât și a subțierii relative a materialului scad. Când valoarea pasului incremental crește, valorile maxime ale deformațiilor și a subțierii relative a materialului cresc, de asemenea;

-
- ca și în cazul analizelor cu element finit, s-a observat o localizare pronunțată a valorilor maxime ale deformațiilor principale de-a lungul traiectoriei pe care s-a deplasat poansonul de deformare;
 - odată cu creșterea unghiului de înclinație a pereților piesei, s-a observat o creștere a valorilor deformațiilor și a subțierii relative a materialului semifabricatului;
 - utilizând sistemului optic de măsurare ARAMIS, a fost posibilă obținerea unor evidențieri ce prezintă variația în timp a mărimilor caracteristice procedului de deformare incrementală, pe întreaga durată a procesului;
 - distribuția deformațiilor principale și a subțierii relative a materialului se uniformizează pe pereții înclinați ai piesei odată cu mărirea numărului de laturi ce definește geometria bazei piesei;
 - precizia de formă a pieselor deformate incremental scade odată cu creșterea diametrului poansonului;
 - precizia de formă a pieselor deformate incremental crește odată cu creșterea valorii pasului incremental;

Principalele contribuții ale lucrării:

- s-a realizat o sinteză sub forma unui studiu bibliografic a principalelor rezultate științifice aferente domeniului abordat;
- s-au dezvoltat relații matematice ce definesc stările de deformații bi-axiale ce acționează în materialul semifabricatului în timpul procesului de deformare incrementală;
- s-a dezvoltat relația matematică ce definește unghiul maxim de deformare în funcție de mărimile geometrice specifice sistemului de deformare incrementală;
- s-a dezvoltat relația matematică ce definește unghiul maxim de deformare în funcție de panta curbei limită de deformare la rupere;
- s-a construit un model virtual parametrizat ce permite studiul și simularea procesului de deformare incrementală cu contact singular. Modelul virtual al semifabricatului și poansonului de deformare și cele pentru elementele de sprijin respectiv reținere au fost modelate utilizând programul ANSYS;
- utilizând modelul virtual elaborat cu programul ANSYS, s-au efectuat o serie de analize dinamice explicite ale procesului de deformare incrementală cu contact singular utilizând programul de simulare LS-DYNA;

- în urma rezultatelor obținute din simulările numerice, s-au obținut hărțile de distribuție ale deformațiilor și a subțierii relative a materialului semifabricatului pe suprafața piesei și, de asemenea, valorile maxime înregistrate pentru aceste mărimi caracteristice;
- în urma rezultatelor obținute din simulările numerice, s-a determinat influența diametrului poansonului, a pasului incremental și a unghiului de înclinație a pereților piesei asupra valorilor maxime ale deformațiilor și a subțierii relative a materialului semifabricatului;
- în urma rezultatelor obținute din simulările numerice s-a determinat influența numărului de laturi ce definește geometria bazei pieselor asupra valorilor maxime ale deformațiilor și a subțierii relative a materialului semifabricatului;
- pe baza rezultatelor obținute din simulările numerice, s-au determinat modul de variație în timp a deformațiilor principale respectiv secundare și subțierea relativă a materialului semifabricatului pe suprafața pieselor de tip trunchi de piramidă;
- pe baza rezultatelor obținute din simulările numerice, s-au determinat valorile și modul de variație a forțelor rezistente din procesul de deformare incrementală cu contact singular;
- s-a proiectat modelul virtual tridimensional al standului experimental utilizat la deformarea incrementală cu contact singular, folosind programul CATIA V5;
- s-au modelat traiectoriile poansonului atașat ca efector final robotului industrial folosit la procesul de deformare incrementală cu contact singular, folosind programul CATIA V5;
- s-au simulat mișcările robotului industrial folosit la procesul de deformare incrementală cu contact singular într-un mediul virtual pus la dispoziție de programul DELMIA;
- s-a generat codul program pentru controlul și comanda robotului industrial folosit la procesul de deformare incrementală cu contact singular, utilizând programul DELMIA;
- s-au efectuat o serie de încercări la tracțiune uniaxială pentru determinarea caracteristicilor reale ale materialului semifabricatului utilizat la deformarea incrementală a tablelor;
- s-a determinat curba reală tensiune-deformație pentru oțelul de tip DC 04 cu grosimea de 0.4 mm ce a fost utilizat la încercările experimentale de deformare incrementală;

-
- s-a proiectat și executat un stand experimental ce permite atât realizarea încercărilor de deformare incrementală cu ajutorul unui robot industrial cât și măsurării „on-line” a deformațiilor respectiv a subțierii relative a materialului semifabricatului;
 - s-a implementat cu succes sistemul de măsurare optic ARAMIS în cazul măsurării „on-line” a deformațiilor respectiv a subțierii relative a materialului, la deformarea incrementală cu contact singular;
 - s-au efectuat încercări experimentale în vederea determinării modului de distribuție al deformațiilor principale respectiv secundare și a subțierii relative a materialului utilizând diferite traiectorii și diferiți parametri tehnologici. S-a stabilit, de asemenea, în ce mod influențează acești parametri valorile maxime înregistrate pentru mărimile caracteristice;
 - s-au efectuat încercări experimentale în vederea determinării unghiului maxim de deformare;
 - s-au efectuat încercări experimentale în vederea determinării valorilor deformațiilor și a modului de distribuție a acestora pe suprafața pieselor deformate incremental, la diferite unghiuri de deformare;
 - s-au efectuat încercări experimentale în vederea determinării influenței numărului de laturi ce definește geometria bazei pieselor asupra valorilor maxime ale deformațiilor și a subțierii relative a materialului;
 - s-au efectuat încercări experimentale în vederea determinării influenței numărului de laturi ce definește geometria bazei pieselor asupra distribuției deformațiilor și a subțierii relative a materialului pe suprafața piesei deformate incremental;
 - s-au efectuat încercări experimentale în vederea determinării și analizării variației în timp a deformațiilor și a subțierii relative a materialului;
 - s-au realizat grafice și diagrame ce prezintă variația mărimilor caracteristice procedului de deformare incrementală în funcție de traseul de secționare a modelului virtual al piesei;
 - s-au realizat grafice și diagrame ce prezintă variația în timp a mărimilor caracteristice procedului de deformare incrementală pe diferite tipuri de piese;
 - s-au obținut modele tridimensionale virtuale ale pieselor deformate incremental ce mai apoi au fost comparate cu modele CAD ale pieselor;
 - s-a evaluat precizia de formă a pieselor deformate incremental și s-a urmărit influența parametrilor geometrici asupra acestora.