



UNIVERSITATEA  
LUCIAN BLAGA  
— DIN SIBIU —



Școala doctorală de Științe Inginerești și Matematică

Domeniul de doctorat: Inginerie Industrială

## TEZĂ DE DOCTORAT

**Studii și cercetări privind îmbunătățirea  
preciziei dimensionale și de formă a pieselor  
prelucrate prin deformare incrementală**

Doctorand:

Ing. MIHAI-OCTAVIAN POPP

Conducător de doctorat:

Prof. Univ. Dr. Ing. SEVER-GABRIEL RACZ

# CUPRINS

1. INTRODUCERE.....	1
2. STADIUL ACTUAL PRIVIND TEHNOLOGIA ȘI ECHIPAMENTELE FOLOSITE ÎN PROCESUL DE DEFORMARE INCREMENTALĂ.....	3
2.1 Definirea procedeului.....	3
2.2 Clasificarea procedeului.....	5
2.3 Tipuri de procedee de deformare incrementală.....	5
2.3.1 Deformarea incrementală cu role.....	5
2.3.1.1 Deformare convențională cu role fără subțierea voită a materialului.....	6
2.3.1.2 Deformare cu role cu subțierea voită a materialului.....	8
2.3.1.3 Deformare incrementală cu role flexibilă.....	10
2.1.3.4 Deformarea incrementală cu role asimetrică.....	12
2.1.3.5 Deformare incrementală cu role la cald.....	13
2.3.2 Deformare incrementală cu jet de apă.....	14
2.3.3 Deformare incrementală cu poanson rigid.....	19
2.3.3.1 Deformare incrementală cu placă activă inferioară parțial/total negativă	19
2.3.3.2 Deformare incrementală cu placă activă inferioară parțial/total pozitivă	21
2.3.3.3 Deformarea incrementală în mai multe etape.....	22
2.3.4 Deformare incrementală multi-punct.....	23
2.3.5 Deformare incrementală cu contra-poanson.....	25
2.4 Echipamente folosite la deformarea incrementală.....	28
2.4.1 Echipamente de tip mașini-unelte cu comandă numerică.....	28
2.4.2 Echipamente specializate pentru deformare incrementală.....	30
2.4.3 Echipamente de tip robot industrial.....	31
2.5 Forțele de deformare.....	37

2.6 Concluzii .....	40
3. STUDIU BIBLIOGRAFIC PRIVIND ÎMBUNĂȚIREA PRECIZIEI DIMENSIONALE ȘI DE FORMĂ A PIESELOR PRELUCRATE PRIN DEFORMARE INCREMENTALĂ.....	43
3.1 Precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate prin deformare incrementală	43
3.2 Metode de măsurare .....	44
3.3 Defecte ale pieselor prelucrate prin deformare incrementală.....	46
3.4 Factori de influență asupra preciziei pieselor.....	54
3.5 Metode de îmbunătățire a preciziei pieselor prelucrate prin deformare incrementală	62
3.6 Concluzii .....	68
3.7 Obiectivele tezei de doctorat .....	69
4. STANDURI EXPERIMENTALE UTILIZATE LA STUDIUL PRECIZIEI DIMENSIONALE ȘI DE FORMĂ A PIESELOR DEFORMATE INCREMENTAL .....	71
4.1 Mașina pentru încercare la tracțiune Instron model 5587 .....	71
4.2 Standul experimental pentru procesul de deformare incrementală .....	72
4.3 Stand experimental de măsurare optică – ATOS CORE 200.....	77
4.4 Stand pentru măsurarea rugozității suprafețelor.....	79
5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA PARAMETRILOR TEHNOLOGICI ȘI GEOMETRICI ASUPRA PRECIZIEI DIMENSIONALE ȘI DE FORMĂ A PIESELOR DEFORMATE INCREMENTAL.....	82
5.1 Metodologia cercetării experimentale privind precizia pieselor deformate incremental	82
5.2 Generarea traiectoriilor pentru încercările experimentale ale primei etape .....	86
5.3 Analiza influenței factorilor asupra preciziei dimensionale și de formă a pieselor obținute în prima etapă a cercetărilor experimentale .....	92
5.3.1 Analiza revenirii elastice.....	93
5.3.2 Analiza efectului de „pernă” .....	101
5.3.3 Analiza abaterii de la adâncimea dorită a pieselor.....	104
5.3.4 Analiza abaterii de la diametrul piesei .....	111
5.3.5 Analiza abaterii de la raza de racordare dintre peretele conic și zona flanșei .	114

5.3.6 Analiza abaterii de la valoarea unghiului peretelui pieselor .....	116
5.4 Analiza calității suprafețelor pieselor deformate incremental.....	119
5.5 Analiza stărilor de deformații specifice .....	131
5.6 Analiza forțelor din procesul de deformare incrementală.....	139
5.7 Concluzii .....	148
6. CERCETĂRI TEORETICE PRIVIND PRECIZIA DIMENSIONALĂ ȘI DE FORMĂ A PIESELOR DEFORMATE INCREMENTAL.....	151
6.1 Determinarea caracteristicilor mecanice pentru aliajul de aluminiu AA1050 și oțelul DC01 .....	151
6.1.1 Considerații teoretice .....	151
6.1.2 Determinarea experimentală a proprietăților mecanice ale tablelor prin metoda încercării la tracțiune.....	153
6.2 Pregătirea modelului teoretic pentru simularea procesului de deformare incrementală prin metoda elementelor finite .....	160
6.3 Interpretarea rezultatelor obținute din analiza cu elemente finite a procesului de deformare incrementală. ....	164
6.4 Concluzii .....	179
7. METODE DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A PRECIZIEI DIMENSIONALE ȘI DE FORMĂ A PIESELOR DEFORMATE INCREMENTAL PRIN INTERMEDIUL MODELULUI TEORETIC DEZVOLTAT .....	182
7.1 Implementarea unui algoritm în abaqus cae în vederea automatizării simulărilor numerice.....	182
7.2 Prezentarea rezultatelor obținute cu ajutorul modelului teoretic privind precizia pieselor deformate incremental.....	187
7.3 Concluzii .....	195
8. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA PRECIZIEI DIMENSIONALE ȘI DE FORMĂ A PIESELOR OBȚINUTE PRIN DEFORMARE INCREMENTALĂ.....	196
8.1 Metodologia cercetării experimentale privind îmbunătățirea preciziei pieselor deformate incremental .....	196
8.2 Generarea traiectoriilor pentru îmbunătățirea preciziei pieselor deformate incremental	

8.3 Analiza influenței traiectoriilor complexe asupra preciziei pieselor deformate incremental în a doua etapă a cercetărilor experimentale .....	203
8.3.1 Analiza revenirii elastice.....	204
8.3.2 Analiza efectului de „pernă” .....	210
8.3.3 Analiza abaterii de la adâncimea piesei .....	212
8.3.4 Analiza abaterii de la diametrul piesei.....	219
8.3.5 Analiza abaterii de la raza de racordare dintre peretele conic și flanșă .....	222
8.3.6 Analiza abaterii de la unghiul peretelui pieselor.....	225
8.4 Analiza calității suprafețelor pieselor deformate incremental.....	228
8.5 Analiza stărilor de deformații la piesele prelucrate pentru îmbunătățirea preciziei..	237
8.6 Analiza forțelor obținute în cadrul traiectoriilor propuse pentru îmbunătățirea preciziei.....	252
8.7 Concluzii .....	259
9. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.....	264
9.1 Concluziile tezei de doctorat .....	264
9.2 Contribuții originale ale tezei de doctorat .....	268
9.3 Direcții de cercetare viitoare .....	270
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE.....	272
ANEXE.....	283
LISTĂ DE LUCRĂRI .....	308

**CUVINTE CHEIE:** deformare incrementală, table de grosimi mici, metoda elementului finit, ABAQUS EXPLICIT, simulări numerice, deformații specifice, subțierea materialului, unghiul de forfecare, revenirea elastică a materialului, abateri de precizie, KUKA KR 210-2, ARAMIS, Atos Core 200.



Tendențele din prezent în industria constructoare de mașini, și nu numai, urmăresc o reducere cât mai mare a costurilor și a timpului de producție. Abordarea clasică la apariția unui nou concept de automobil implica modificarea unor componente ale caroseriei acesteia, inginerii încercând să optimizeze o matriță, iar ulterior realizării pieselor erau evidențiate diferite defecte ale acesteia, tot acest proces fiind reluat de la capăt, în mod repetat.

Abordarea modernă, bazată pe procesul de deformare incrementală, permite inginerilor să producă prototipuri la un cost mult mai mic, având în vedere că acest procedeu nu necesită o matriță, ci doar două inele de reținere pentru tablă și un poanson pentru a o deforma. Acestui proces i se acordă multă atenție în ultimii ani în literatura de specialitate, urmărindu-se optimizarea lui, precum și creșterea preciziei dimensionale și de formă a pieselor deformate. [MAQ, 18].

În timpul procesului de deformare incrementală poansonul urmează o traiectorie prestabilită de utilizator, deformând treptat tabla fixată cu ajutorul inelelor de reținere. Pentru implementarea acestui proces se pretează utilizarea unor mașini cu comandă numerică, datorită posibilităților avansate de control al mișcării și rigidității acestora, sau a roboților industriali din cauza cinematicii superioare, dată de numărul mai mare al gradelor de libertate, precum și a spațiului de lucru mai mare, ceea ce conduce la o mai mare flexibilitate privind formele pieselor care pot fi realizate cu aceștia [TER, 19]. Proiectarea traiectoriilor se poate face cu ajutorul unor programe CAM utilizate la procesele de prelucrare prin așchiere, cu adaptări specifice procesului de deformare incrementală sau, după cum au propus unii cercetători, utilizând pachete software noi care să genereze traiectoriile [NAS, 18].

Procesul de deformare incrementală prezintă câteva avantaje importante, cum ar fi: costurile de producție scăzute, flexibilitate mare, o deformabilitate a materialelor mai mare decât în cazul proceselor convenționale de deformare plastică la rece cum ar fi ambutisarea și este avantajos pentru producerea de prototipuri [MIC, 07, FIL, 13]. Totuși, acest proces prezintă și câteva dezavantaje principale care împiedică aplicarea industrială și implementarea acestuia în producția de serie mare [BRE, 19]. Unul dintre aceste dezavantaje, poate chiar cel

mai important este dat de precizia scăzută a pieselor fabricate prin acest proces, indiferent de varianta de realizare a acestuia (cu poanson/placă activă totală sau parțială/cu contra poanson/etc.). Cercetările întreprinse în cadrul acestei lucrări au urmărit găsirea unor metode teoretice și practice pentru reducerea efectelor acestui dezavantaj, și implicit creșterea preciziei pieselor prelucrate prin acest procedeu.

În urma studiului literaturii de specialitate din domeniul deformării incrementale am remarcat următoarele aspecte:

- Pe parcursul ultimilor ani s-au studiat diferite variante ale procesului de deformare incrementală, de la diferite scule utilizate la diferite elemente de suport pentru semifabricatele din tablă;
- Autorii lucrărilor au studiat deformațiile și tensiunile care apar în material prin numeroase metode teoretice și experimentale;
- Au fost prezentate numeroase combinații tehnologice ale parametrilor de intrare în procesul tehnologic;
- Printre avantajele procesului se numără flexibilitatea ridicată dată de absența unei plăci active, posibilitatea de a fi prelucrate piese cu forme complexe, posibilitatea prelucrării materialelor metalice care au un grad ridicat de deformabilitate, etc.;
- Procesul este utilizat în aplicații industriale unde sunt produse piese în serie mică și unicate;
- Cel mai mare dezavantaj al procesului este reprezentat de precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate prin acest proces, care este relativ redusă, comparativ cu cea a pieselor prelucrate prin alte procedee;
- Un alt dezavantaj este reprezentat de timpul de prelucrare relativ mare a unei piese;
- Au fost identificate cele mai uzuale defecte ale pieselor metalice prelucrate prin deformare incrementală cum ar fi: revenirea elastică a materialului, abaterea datorată efectului de „pernă” și abaterea datorată razei de racordare la baza pieselor;
- Numeroși autori au propus diferiți algoritmi de corecție a traiectoriilor în vederea creșterii preciziei pieselor;
- S-au identificat câteva metode de a măsura și evalua precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate prin deformare incrementală;
- S-au prezentat câteva metode de îmbunătățire a preciziei pieselor prelucrate dar nu a fost studiată intensiv influența mai multor parametri tehnologici de intrare asupra tuturor abaterilor care apar la piesele deformate.



Aceste aspecte amintite anterior indică necesitatea realizării unui studiu elaborat asupra posibilităților de îmbunătățire a preciziei dimensionale și de formă a pieselor prelucrate prin deformare incrementală și a influenței parametrilor tehnologici din proces asupra acesteia, cu scopul de a favoriza implementarea procesului pe scară largă în industrie.

În urma analizei critice a stadiului actual în domeniul deformării incrementale prezentată în capitolele 2 și 3 ale acestei teze de doctorat, am luat decizia împreună cu conducătorul de doctorat de a studia metode de îmbunătățire a preciziei dimensionale și de formă a pieselor deformate incremental. La realizarea acestui studiu am optat pentru utilizarea a două materiale des întâlnite în domeniul construcțiilor de mașini: aliajul de aluminiu AA1050 și oțelul DC01.

Am optat pentru realizarea unei cercetări inițiale care să evidențieze influența următorilor parametri de intrare în proces asupra preciziei pieselor deformate incremental: adâncimea finală a pieselor, unghiul peretelui piesei, pasul vertical al traiectoriei și diametrul poansonului. În cadrul acestei etape am decis utilizarea unei traiectorii de tip spirală spațială care, conform studiului bibliografic, favorizează obținerea unei precizii ridicate a pieselor deformate. Cu toate că există numeroase cercetări despre influența acestor factori asupra preciziei pieselor, acestea au fost orientate strict către anumiți parametri de ieșire din proces. Această teză de doctorat cuprinde studiul influenței parametrilor de intrare în proces asupra tuturor abaterilor evidențiate pe parcursul cercetărilor, și anume:

- Abaterea datorată revenirii elastice a materialului;
- Abaterea datorată efectului de „pernă”;
- Abaterea de la adâncimea finală a piesei;
- Abaterea de la diametrul piesei;
- Abaterea de la raza de racordare dintre peretele conic și flanșă;
- Abaterea de la unghiul peretelui piesei.

În plus, am decis în a doua etapă a cercetărilor să îmbunătățesc precizia dimensională și de formă a pieselor deformate incremental prin utilizarea unor metode offline, care constau în realizarea unor traiectorii complexe de prelucrare a pieselor.

Având în vedere analiza critică a stadiului actual în domeniu și considerentele prezentate anterior, împreună cu conducătorul de doctorat am stabilit următoarele obiective ale tezei de doctorat:

1. Analiza și prelucrarea critică a informațiilor din stadiul actual, cu scopul identificării: materialelor care pot fi utilizate în procesul de deformare incrementală, formelor pieselor care pot fi prelucrate, parametrilor tehnologici ai procesului;
2. Realizarea testelor de întindere uniaxială în vederea determinării caracteristicilor mecanice ale materialelor pentru a fi utilizate în programele de analiză cu elemente finite;
3. Conceperea și dezvoltarea unui model teoretic pentru simularea numerică a procesului de deformare incrementală prin metoda elementelor finite;
4. Rularea unor analize dinamice explicite în vederea validării modelului teoretic propus prin compararea rezultatelor cu cele obținute experimental;
5. Realizarea unei planificări a experimentelor prin intermediul metodei Taguchi; astfel am putut lua în considerare toți cei cinci parametri de intrare fără a crește numărul de experimente;
6. Efectuarea încercărilor experimentale rezultate din planificare pentru a determina deformațiile, subțierea materialului, forțele de deformare, rugozitățile suprafețelor prelucrate și toate abaterile dimensionale și de formă amintite anterior;
7. Analizarea și prelucrarea statistică cu ajutorul metodei Taguchi a datelor experimentale obținute prin intermediul pachetului software Minitab;
8. Implementarea unui algoritm în programul de analiză cu elemente finite, ABAQUS CAE, în vederea automatizării rulării simulărilor numerice, prin adaptarea modelului teoretic la fiecare tip de traiectorie utilizată;
9. Realizarea unor simulări numerice prin intermediul modelului teoretic dezvoltat pentru a investiga îmbunătățirea preciziei pieselor prin implementarea unor traiectorii complexe;
10. Efectuarea încercărilor experimentale utilizând rezultatele obținute din simulările numerice prin folosirea traiectoriilor complexe;
11. Analizarea și prelucrarea statistică a rezultatelor obținute din cea de-a doua etapă a cercetărilor experimentale.

## **Concluziile tezei de doctorat**

Procesul de deformare incrementală se studiază intens datorită avantajelor pe care le are față de procesele convenționale de deformare plastică la rece. Acesta implică utilizarea unui număr redus de componente și anume semifabricatele de tip tablă subțire din diferite materiale, elementele de fixare ale acestora și scula reprezentată de un poanson, care parcurge o traiectorie prestabilită de utilizator pentru a deforma semifabricatul la forma finală dorită.

Scopul acestei teze de doctorat a fost de a studia modul în care parametrii tehnologici ai procesului influențează precizia dimensională și de formă a pieselor deformate incremental, pe de o parte, și de a propune și analiza metode de îmbunătățire a acestora. În urma studiului bibliografic au reieșit o multitudine de variante propuse de autori pentru procesul de deformare incrementală. În cadrul acestei teze am ales să deformez incremental table din aliaj de aluminiu AA1050, și oțel DC01, două dintre cele mai des folosite materiale în industria constructoare de mașini. Chiar dacă în literatura de specialitate sunt tratate aspecte ale preciziei pieselor deformate incremental, nu există până în momentul de față un studiu elaborat care să țină cont de toți parametrii de intrare în proces (care pot fi împărțiți în două mari categorii: parametrii tehnologici - pasul vertical și diametrul poansonului și parametrii geometrici - adâncimea finală a piesei și unghiul peretelui piesei) și să trateze abaterile de precizie identificate în această teză. În urma studiului bibliografic am observat că sunt tratate trei abateri ale preciziei pieselor prelucrate: abaterea dată de revenirea elastică, abaterea dată de raza de racordare dintre peretele piesei și zona flanșei și abaterea dată de efectul de „pernă”.

În plus față de aceste abateri, în cadrul cercetărilor teoretice și încercărilor experimentale am studiat încă trei abateri și anume: abaterea de la adâncimea finală a piesei, abaterea de la diametrul dorit al acestora și abaterea unghiului peretelui. Pentru încercările experimentale am folosit table de 250 x 250 mm cu o grosime de 0.8 mm pentru ambele materiale.

În cadrul acestei teze de doctorat, încercările experimentale au fost axate pe determinarea preciziei dimensionale și de formă prin analiza celor șase abateri prezentate anterior, determinarea caracteristicilor mecanice prin testul de încercare uniaxială, determinarea deformațiilor plastice ale materialului (deformații specifice principale, secundare, pe direcția X și Y), a unghiului de forfecare, a subțierii materialelor și a forțelor de deformare care apar în timpul procesului.

La realizarea încercărilor și a măsurătorilor am utilizat echipamentele aflate în dotarea Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice din cadrul Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, și anume: mașina de încercat la tracțiune Instron 5578, robotul industrial KUKA KR210-2 utilizat la deformarea tablelor, echipat cu traductorul de forță pe trei direcții PCB261A13, sistemul optic de măsură a deformațiilor ARAMIS utilizat în timpul procesului pentru achiziția de imagini, echipamentul de măsurare optic 3D ATOS CORE utilizat la măsurarea pieselor după procesul de deformare incrementală și rugozimetrul SurfTest SJ-411 utilizat la măsurarea rugozităților suprafețelor.

Cercetarea experimentală a fost împărțită în două etape. În prima etapă am analizat modul în care diametrul poansonului, pasul vertical, unghiul peretelui piesei, adâncimea finală acesteia și tipul de material influențează precizia pieselor. Pentru fiecare factor de influență am folosit câte două niveluri de variație iar pentru planificarea experimentelor am utilizat metoda statistică Taguchi, folosită totodată și pentru reducerea numărului necesar de experimente. La interpretarea rezultatelor am utilizat pachetul software Minitab v19, care permite generarea rapoartelor semnal/zgomot cu condiția impusă de utilizator, iar în acest caz am folosit condiția „cu cât este mai mic cu atât este mai bine” deoarece scopul acestei teze a fost de a reduce erorile de precizie. În plus, pachetul software a permis și generarea interacțiunilor dintre factori, caz în care am analizat interacțiunile dintre parametrii tehnologici de intrare în proces: diametrul poansonului și pasul vertical. Un avantaj al utilizării unei metode statistice de planificare a experimentelor este dat și de posibilitatea de evaluare a măsurătorilor realizate prin intermediul graficului repartiției normale a acestora. La realizarea traiectoriilor am utilizat pachetul software SprutCAM X. Am utilizat traiectorii de tip spirală spațială pentru toate încercările experimentale, deoarece conform literaturii de specialitate prezintă distribuții uniforme ale deformațiilor.

Toate încercările au fost realizate cu succes, fără a fi semnalată apariția defectelor date de ruperea materialului, deși în cazul aliajului de aluminiu, AA1050, deformațiile maxime obținute la testul de încercare la tracțiune nu au depășit 5%, în comparație cu oțelul, care prezintă o plasticitate ridicată cu deformații de peste 30%. În urma analizării și interpretării tuturor rezultatelor din prima etapă am determinat că în cea mai mare proporție utilizarea poansonului cu diametrul de 10 mm și a pasului vertical de 0.25 mm conduce la obținerea celor mai mici valori ale celor șase abateri analizate.

În urma cercetărilor experimentale din prima etapă am realizat un model teoretic al procesului bazat pe metoda elementelor finite. Rezultatele simulărilor numerice au fost analizate și comparate cu rezultatele obținute experimental, iar diferențele au fost mici, sub 10%, astfel modelul teoretic a fost validat cu succes. Pentru realizarea simulărilor numerice a încercărilor propuse pentru a îmbunătăți precizia dimensională și de formă, am dezvoltat un algoritm scris în limbajul Python în vederea automatizării procesului de implementare a traiectoriilor complexe din SprutCAM X în software-ul de analiză cu elemente finite ABAQUS.

Prin intermediul modelului teoretic dezvoltat am investigat o metodă offline de îmbunătățire a preciziei pieselor deformate incremental, care a presupus corectarea abaterilor

prin utilizarea unor traiectorii complexe de prelucrare a pieselor. Aceste traiectorii vizează corectarea efectului de „pernă” prin corecția bazei mici a trunchiurilor de con, prelucrarea prin mai multe treceri pentru eliminarea: abaterilor de la adâncimea finală, abaterii de la diametrul și de la unghiul piesei și micșorarea abaterii dată de revenirea elastică a materialului.

Toate aceste traiectorii au fost investigate și experimental în a doua etapă a cercetărilor experimentale, unde am utilizat planificarea factorială completă, folosind două nivele de variație pentru material și șase nivele pentru traiectorie, una fiind cea de referință – spirală spațială, iar celelalte cinci fiind cele propuse pentru îmbunătățirea preciziei. În urma cercetărilor teoretice și experimentale desfășurate în această teză am ajuns la următoarele concluzii:

- abaterea dată de revenirea elastică a materialului scade prin utilizarea aliajului de aluminiu, a poansonului de 6 mm diametru și a unghiului peretelui piesei de  $60^\circ$ . În plus, traiectoria T3 fiind o traiectorie de prelucrare prin mai multe treceri, influențează pozitiv revenirea elastică;
- în cazul abaterii dată de efectul de „pernă”, aceasta este influențată puternic de toți factorii tehnologici și geometrici astfel: utilizarea poansonului de 10 mm, a pasului vertical de 0.25 mm, a unghiului peretelui de  $50^\circ$ , adâncimii de 40 mm și a aliajului de aluminiu contribuie la reducerea acestui efect. Din punct de vedere al traiectoriilor, traiectoriile T3 și T5 contribuie semnificativ la reducerea acestei abateri;
- în ceea ce privește adâncimea finală a pieselor, valorile minime ale abaterilor se obțin prin utilizarea poansonului de 10 mm diametru și a unghiului peretelui de  $60^\circ$  în cazul aliajului de aluminiu. Din punct de vedere al traiectoriilor, T1, T3 și T4 produc piese cu cele mai mici abateri;
- diametrul piesei este influențat de utilizarea poansonului de 6 mm diametru și a pasului vertical de 0.25 mm. Totuși, cea mai mare influență se observă la tipul de material unde în cazul aliajului de aluminiu se obțin piese mai precise. În ceea ce privește traiectoriile propuse pentru îmbunătățire, singura care aduce un aport este traiectoria T5, care are o influență majoră asupra preciziei pieselor, deoarece fiind o traiectorie în care poansonul prelucrează cu axă înclinată se elimină erorile date de elasticitatea sistemului format din robot, traductor de forță, poanson și elementele de fixare ale acestora. În cazul utilizării acestei traiectorii, eroarea de precizie este redusă cu 90%;
- abaterea dată de raza de racordare dintre peretele piesei și zona flanșei este influențată pozitiv de utilizarea poansonului de 10 mm diamteru, a unghiului piesei de  $50^\circ$  și a aliajului

de aluminiu. Trajectoriile propuse pentru îmbunătățire reușesc și în acest caz să aducă o contribuție, dar nu este atât de semnificativă ca în cazul altor abateri, deoarece indiferent de traiectoria utilizată, prin natura procesului de deformare incrementală, nu există un element care să ofere sprijin semifabricatului în zona în care poansonul intră în contact cu acesta;

- în vederea obținerii unui unghi al peretelui piesei cât mai precis este necesară utilizarea poansonului de 10 mm diametru și a aliajului de aluminiu, iar traiectoria care produce îmbunătățiri semnificative este și de această dată traiectoria T5, cu axă înclinată a poansonului;
- având în vedere obiectivele acestei teze, am analizat și calitatea suprafețelor care au ajuns în contact cu poansonul, prin măsurarea profilurilor R și W, acestea fiind puternic influențate, după cum era și de așteptat, de diametrul poansonului și de pasul vertical, iar utilizarea poansonului de diametru mai mare și a pasului vertical mai mic conduc la reducerea rugozității suprafețelor.
- contrar abaterilor studiate anterior, unde de fiecare dată pentru aliajul de aluminiu, AA1050 s-au obținut valori mai mici, în cazul rugozităților acestea au fost mai mici în cazul utilizării oțelului DC01;
- în cazul deformațiilor specifice principale, secundare și pe direcțiile X și Y acestea au fost puternic influențate de unghiul peretelui piesei, iar valorile maxime s-au întâlnit la piesele cu unghiul peretelui de 60°. Ceilalți factori nu au exercitat o influență puternică asupra deformațiilor;
- traiectoriile complexe propuse pentru îmbunătățirea preciziei exercită influențe semnificative asupra deformațiilor, iar valorile maxime s-au obținut la traiectoria T3, aceasta fiind o traiectorie de prelucrare prin mai multe treceri. În cazul acestor traiectorii complexe se poate observa că distribuțiile deformațiilor nu sunt uniforme pe piese, ele fiind localizate în diferite zone, în funcție de tipul traiectoriei utilizate;
- ca și în cazul deformațiilor specifice, subțierea materialului este și ea influențată negativ de creșterea unghiului peretelui piesei, iar traiectoria T3 produce subțieri majore ale grosimii piesei;
- din punct de vedere al forțelor măsurate în timpul procesului, acestea sunt aproximativ egale pe direcțiile perpendiculare pe axa poansonului și alternează de la o valoare minimă la o valoare maximă egal distanțate față de 0, iar forțele pe direcția poansonului au o creștere liniară până la un moment dat apoi se stabilizează și nu mai variază până la sfârșitul deformării incrementale;

- cum era de așteptat, forțele maxime sunt cel mai mult influențate de tipul de material, iar acestea au fost obținute în cazul oțelului DC01, cu valori de peste 1 kN spre deosebire de aliajul de aluminiu unde sunt înregistrate valori de aproximativ 300 N.

## **Contribuții originale ale tezei de doctorat**

Contribuțiile originale au fost publicate în timpul elaborării tezei de doctorat în diferite jurnale ISI-Clarivate cu factor de impact, în jurnale indexate în baze de date internaționale și în lucrări susținute la conferințe științifice. Contribuțiile originale ale acestei teze pot fi împărțite în două părți:

### *Contribuții originale teoretice:*

- am realizat un studiu bibliografic al procesului de deformare incrementală într-un punct și am extras ideile principale privind diferitele variante ale procesului propuse de alți autori;
- am realizat o clasificare riguroasă a procesului și am investigat avantajele și dezavantajele fiecărei variante ale procesului;
- am evaluat parametrii tehnologici ai procesului privind tipurile de material care se pot prelucra, regimuri de deformare, scule, elemente de fixare și tipuri de traiectorii utilizate;
- am realizat un studiu privind echipamentele tehnologice care pot fi folosite la procesul de deformare incrementală;
- am evidențiat avantajele procesului în comparație cu alte procese clasice de deformare plastică (de exemplu ambutisare), dar și limitările acestuia legate de precizia scăzută a pieselor obținute și de timpul îndelungat de producție a unui reper;
- pe baza acestor considerente am conturat nișa de cercetare, reprezentată de studiul preciziei dimensionale și de formă a pieselor și necesitatea de a aduce îmbunătățiri acesteia și am trasat obiectivele tezei;
- am dezvoltat un model teoretic al procesului de deformare incrementală în programul de analiză cu elemente finite, ABAQUS, care să permită analizarea procesului și obținerea rezultatelor necesare în vederea validării modelului prin comparația rezultatelor cu cele obținute experimental și pentru a cerceta metode de îmbunătățire a preciziei dimensionale și de formă;
- am conceput și dezvoltat un algoritm în limbajul de programare Python, pentru automatizarea procesului de implementare a traiectoriilor complexe în programul de analiză cu element finit.

### *Contribuții originale experimentale:*

- am realizat încercări la tracțiune pentru materialele studiate, aliajul de aluminiu AA1050 și oțelul DC01, pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale acestora;
- am transformat curbele obținute din testul de încercare la tracțiune în curbe reale, care descriu comportamentul plastic al materialelor pentru implementarea acestora în software-ul de analiză numerică;
- am împărțit cercetările experimentale în două etape: prima în care am analizat influența factorilor aleși precizia pieselor din punct de vedere a șase abateri identificate la piesele realizate, iar în a doua etapă am propus și am analizat o metodă offline de îmbunătățire a preciziei dimensionale și de formă prin implementarea unor traiectorii complexe de prelucrare a pieselor;
- am utilizat metode statistice pentru planificarea experimentelor prin intermediul metodei Taguchi și a planificării factoriale;
- am analizat graficele privind raportul semnal/zgomot și a interacțiunilor dintre parametrii tehnologici de intrare în proces, diametrul poansonului și pasul vertical;
- am pregătit și adaptat standurile puse la dispoziție de Centrul de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice din cadrul universității pentru investigarea procesului de deformare incrementală;
- am pregătit și generat traiectoriile pe care poansonul le-a urmat în timpul procesului și le-am adaptat pentru a putea fi folosite pe robotul industrial KUKA;
- am pregătit toate sistemele de achiziție de date pentru traductorul de forță montat pe robot și pentru sistemul optic de măsurare a deformațiilor ARAMIS;
- am analizat rezultatele obținute în urma achiziției de imagini a pieselor în vederea determinării atât a deformațiilor specifice, cât și a unghiului de forfecare și a subțierii materialului;
- am scanat 3D piesele obținute în urma procesului de deformare incrementală cu ajutorul unui echipamentului de măsurare optică ATOS CORE;
- am pregătit un suport flexibil pentru a putea măsura calitatea suprafețelor în zona de contact între poanson și semifabricat (pe peretele conic) cu ajutorul rugozimetrului Mitutoyo.

### **Direcții de cercetare viitoare**

În industria constructoare de mașini se urmărește de câțiva ani înlocuirea proceselor clasice de deformare plastică, cum ar fi ambutisarea, cu procese noi, care să permită o



flexibilitate mai mare, cum ar fi deformarea incrementală. Însă marele dezavantaj al procesului de deformare incrementală este reprezentat de precizia scăzută a pieselor prelucrate, astfel tema tezei de doctorat se încadrează în tendințele actuale urmărite de producătorii de autovehicule. Bineînțeles, există și direcții viitoare de cercetare pentru a duce procesul de deformare incrementală cu un pas mai aproape de implementarea lui pe scară largă în industrie. Voi enumera în continuare câteva din direcțiile de cercetare viitoare:

- realizarea unui studiu al preciziei pieselor deformate incremental din alte materiale utilizate sau cu posibilitatea de a fi utilizate în viitor în această industrie și aici mă refer la materiale cu proprietăți mecanice îmbunătățite, dar cu greutate redusă, cum ar fi: aliajele de magneziu și de titan și a validării comportamentului acestora privind abaterile de precizie care apar în urma procesului;
- realizarea unui studiu privind precizia pieselor din materiale polimerice sau din panouri de tip „sandwich”;
- efectuarea unor cercetări care să țină cont și de alți factori de influență tehnologici, cum ar fi viteza de deplasare a poansonului și viteza de rotație în jurul propriei axe;
- dezvoltarea unor traiectorii complexe suplimentare față de cele prezentate în această teză, care să vizeze prelucrarea pieselor cu poansonul înclinat la un unghi mai mare, astfel încât acesta să fie perpendicular pe suprafața prelucrată și să se reducă și mai mult erorile date de elasticitatea sistemului;
- realizarea unui studiu al influenței diferiților lubrifianți și a modului în care aceștia afectează calitatea suprafețelor pieselor;
- proiectarea și realizarea unui poanson cu un vârf de diametru cât mai mic pentru a crea posibilitatea realizării muchilor ascuțite care se regăsesc pe elementele de caroserie ale mașinilor;
- având în vedere abaterile de precizie dimensională și de formă a pieselor prelucrate prin deformare incrementală și cunoscând comportamentul în timpul procesului a cât mai multe tipuri de materiale, realizarea unui algoritm de corecție a piesei prelucrate încă din faza de proiectare pentru micșorarea abaterilor de precizie;
- proiectarea și realizarea unui alt sistem de gabarit mai mare și flexibil de fixare a semifabricatelor, în vederea prelucrării unor piese de dimensiunile elementelor de caroserie auto pentru studiul posibilităților de prelucrare a unor piese identice cu cele folosite în industria constructoare de automobile.

- [ADA, 13] Adams, D. W., *Improvements on single point incremental forming through electrically assisted forming, contact area prediction and tool development*, UMI Dissertations Publishing, **2013**
- [AER, 10] 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, **46**, **2010**, pp. 969 – 982
- [ALG, 15] Al-Ghamdi, K. A., Hussain, G., *Forming forces in incremental forming of a geometry with corner feature: investigation into the effect of forming parameters using response surface approach*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **76**, **2015**, pp. 2185 - 2197
- [ALL, 05/1] Allwood, J. M., Houghton, N. E., Jackson, K. P., *The design of an Incremental Forming machine*, 11th Conference on Sheet Metal, Erlangen, **2005**, pp. 471 -478
- [ALL, 05/2] Allwood J. M., King G. P. F., Duflou, J., *A structured search for applications of the incremental sheet-forming process by product segmentation*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, **219** (2), **2005**, pp. 239–244
- [ALL, 10] Allwood, J.M., Braun, D., Musica, O., *The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming*, Journal of Materials Processing Technology, **210**, **2010**, pp. 1501–1510
- [AMA, 84] Amano, T., Tamura, K., *The study of an elliptical cone spinning by the trial Equipment*, Proceedings of the Third International Conference on Rotary Metalworking Processes, Kyoto Japan, **1984**, pp. 213–224
- [AMB, 05/1] Ambrogio, G., Filice, L., De Napoli, L., Muzzupappa, M. (2005). *A simple approach for reducing profile diverting in a single point incremental forming process*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, **219** (11), **2005**, pp. 823–830
- [AMB, 05/2] Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., Muzzupappa, M., *Application of Incremental Forming process for high customised medical product*

- manufacturing*, Journal of Materials Processing Technology, 162 – 163, **2005**, pp. 156 – 162
- [AMB, 06/1] Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Micari, F., Muzzupappa, M., *Some considerations on the precision of incrementally formed double-curvature sheet components*, 9th ESAFORM, **2006**, pp. 199-202
- [AMB, 06/2] Ambrogio, G., Filice, L., Micari, F., *A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming*, Journal of Materials Processing Technology, 177, **2006**, pp. 413 – 416
- [AMI, 02] Amino, H., Ozawa S., *Dieless NC forming, prototype of automotive service parts*, Proceedings of the 2nd International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, Beijing, **2002**, pp. 179-185
- [AOY, 00] Aoyama, S., Amino, H., Lu, Y., Matsubara, S., *Apparatus for dieless forming plate materials*, Europäisches Patent EP0970764, **2000**
- [ARA, 04] Arai, H., *Robotic metal spinning-shear spinning using force feedback control*, Journal of the Robotics Society of Japan, 22 (6), **2004**, pp. 798–805
- [ARA, 06] Arai, H., *Robotic metal spinning-forming non-axisymmetric products using force control*, Journal of the Robotics Society of Japan, 24 (1), **2006**, pp. 140–145
- [ASG, 13] Asghar, J., Lingam, R., Shibin, E., Reddy, N. V., *Tool path design for enhancement of accuracy in single-point incremental forming*, Journal of Engineering Manufacture, 228, **2013**, pp. 1027 – 1035
- [ASG, 15] Asgari, A., Sedighi, M., Riahi, M. *Investigation of dimensional accuracy in incremental sheet metal hammering process: a parametric study*, Mechanics & Industry, 16 (3), **2015**, pp. 308
- [ASG, 17] Asghari, S. A. A., Shamsi Sarband, A., Habibnia, M., *Optimization of multiple quality characteristics in two-point incremental forming of aluminum 1050 by grey relational analysis*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, **2017**
- [ATT, 08] Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., Mazzoni, L., *Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization*, Journal of Materials Processing Technology, 197 (1-3), **2008**, pp. 59–67
- [AWI, 05] Awiszus, B., Meyer, F., *Metal spinning of non-circular hollow parts*, 8<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, Italy, **2005**

- [AZE, 15] Azevedo, N. G., Farias, J. S., Bastos, R. P., Teixeira, P., Davim, J. P., de Sousa, R. J. A., *Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and aluminum materials*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16, **2015**, pp. 589 – 595
- [BAM, 04] Bambach M., Hirt G., Ames J., *Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process*, Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, Columbus Ohio, **2004**, pp. 1969-1974
- [BAM, 05] Bambach, M., Gerhard, H., Ames, J., *Quantitative validation of FEM simulations for incremental sheet forming using optical deformation measurement*, Advanced Materials Research, 6-8, **2005**, pp. 509-516
- [BAM, 07] Bambach, M., Cannamela, M., Azaouzi, M., Hirt, G., Batoz, J., *Computer Aided Tool Path Optimization for Single Point Incremental Sheet Forming*, Advanced Methods in Material Forming, Springer, **2007**, pp. 233 - 250
- [BAM, 13] Bambach, M., Grzibovskis, R., *Analysis of optimal metal flow in incremental sheet forming*, Proceedings in applied mathematics and mechanics, 13, **2013**, pp. 331 – 332
- [BAN, 17] Bansal, A., Lingam, R., Yadav, S. K., Reddy, N. V., *Prediction of forming forces in single point incremental forming*, Journal of Manufacturing Processes, 28, **2017**, pp. 486 – 493
- [BAR, 20/1] Bârsan, A., Popp, M. O., Rusu, G. P., Maroşan, I. A., *Robot-Forming-Industrial Robots Used in Single Point Incremental Forming Process*, The Scientific Bulletin Addendum of the Land Forces Academy, 5, 2020, pp. 152 – 161
- [BAR, 20/2] Bârsan, A., Crenganiş, M., Popp, M. O., Rusu, G. P., *Roboforming-Investigations Regarding Forming Forces in SPIF Process*, Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series, 72, 2020, pp. 37 – 41
- [BAR, 21] Bârsan, A., Popp, M. O., Rusu, G. P., Maroşan, I. A., *Robot-based incremental sheet forming – the tool path planning*, IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering, 1009, 2021
- [BAS, 16] Bastos, R. N. P., de Sousa, R. J. A., Ferreira, J. A. F., *Enhancing time efficiency on single point incremental forming processes*, International Journal of Material Forming, 9 (5), **2016**, pp. 653-662.

- [BEH, 13] Behera, A. K., Verbert, J., Lauwers, B., Duflou, J. R., *Tool path compensation strategies for single point incremental sheet forming using multivariate regression splines*, *Computer-Aided Design*, 45, **2013**, pp. 575 – 590
- [BEH, 17] Behera, A. K., de Sousa, R. A., Ingarao, G., Oleksik, V., *Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015*, *Journal of Manufacturing Processes*, 7, **2017**, pp. 37 – 62
- [BOL, 05] Bologa, O., Oleksik, V., Racz, G., *Experimental research for determining the forces on incremental sheet forming process*, *Proceedings of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming*, 27-29 April 2005, Cluj-Napoca, Romania, 1, **2005**, pp. 317-320
- [BOS, 66] Bosch, W., *Formvorrichtung für Fließdruckmaschinen*. German Patent No. DE 1225133. German Patent and Trademark Office, **1966**
- [BRE, 19] Breaz R. E. and Racz S. G., *Considerations Regarding the Industrial Implementation of Incremental Forming Process*, *Materials Science Forum*, vol. 957, **2019**, p. 111–119.
- [CAM, 09] Camara, J., L., P., B., *Single Point Incremental Forming*, Instituto Superior Tehnico, Universidade Tecnica de Lisboa, **2009**
- [CAO, 14] Cao, T, Lu, B., Xu, D., Zhang, H., Chen, J., Long, H., Cao, J., *An efficient method for thickness prediction in multi-pass incremental sheet forming*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, **2015**, pp. 469 – 483
- [CAP, 06] Capece Minutolo, F., Durante, M., Formisano, A., Langella, A., *Forces analysis in sheet incremental forming and comparison of experimental and simulation results*, *Intelligent Production Machines and Systems*, Elsevier, **2006**, pp. 229 – 234
- [CER, 06] Cerro, I., Maidagan, E., Arana, J., Rivero, A., Rodriguez, P. P., *Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process*, 177, **2006**, pp. 404 – 408
- [CHE, 13] Chera, I., Bologa, O., Racz, S. G., & Breaz, R. E. *Robot-Forming-An Incremental Forming Process Using an Industrial Robot by Means of DELMIA Software Package*, *Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications*, 371, **2013**, pp. 416-420
- [CHE, 17] Chenhao, W., William, J. T. D., Haibo, L., Sheng, L., Meehan, P. A., *FEM Investigation of Ductile Fracture Prediction in Two-Point Incremental Sheet Metal Forming process*, *International Conference on the Technology of Plasticity*, 207, **2017**, pp. 836-841

- [CHU, 15] Chua, C. K., Leong, K. F., Liu, Z. H., *Rapid Tooling in Manufacturing, Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer London, Londra, Anglia, **2015**.
- [CRE, 19] Crenganis, M., Csiszar, A., *A Dynamic Model for KUKA KR6 in SPIF Processes*, Materials Science Forum, 957, **2019**, pp. 156–166
- [DAR, 21] Darzi, S., Mirnia, M. J., Elyasi, M., *Single-point incremental forming of AA6061 aluminum alloy at elevated temperatures*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 116, **2021**, pp. 1023-1039
- [DEC, 08] Decultot, N., Valey, V., Robert, L., Bernhart, G., Massoni, E., *Behaviour modelling of aluminium alloy sheet for single point incremental forming*, International Journal of Material Forming, 1, **2008**, pp. 1151 – 1154
- [DEJ, 10] Dejardin, S., Thibaud, S., Gelin, J. C., Mihcel, G., *Experimental investigations and numerical analysis for improving knowledge of incremental sheet forming process for sheet metal parts*, Journal of Materials Processing Technology, 210, **2010**, pp. 363 – 369
- [DUF, 05/1] Geiger, M., Duflou, J., Kals, H. J. J., Shirvani, B., Singh, U. P., *Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming*, Advanced Materials Research, 6 – 8, **2005**, pp. 449 – 456
- [DUF, 05/2] Geiger, M., Duflou, J., Kals, H. J. J., Shirvani, B., Singh, U. P., *Force Measurements for Single Point Incremental Forming: An Experimental Study*, Advanced Materials Research, 6 – 8, **2005**, pp. 441 – 448
- [DUF, 07] Duflou, J., Tuckol, Y., Szekeres, A., Vanherck, P., *Experimental study on force measurements for single point incremental forming*, Journal of Materials Processing Technology, 189, **2007**, pp. 65 – 72
- [DUR, 09] Durante, M., Formisano, A., Langella, A., Minutolo, F. M. C., *The influence of tool rotation on an incremental forming process*, 209, **2009**, pp. 4621 – 4626
- [ECH, 14] Echrif, S. B. M., Hrairi, M., *Significant Parameters for the Surface Roughness in Incremental Forming Process*, Materials and Manufacturing Processes, 29, **2014**, pp. 697 – 703
- [EDW, 17] Edwards, W. L., Grimm, T. J. , Ragai, I., Roth, J. T., *Optimum Process Parameters for Springback Reduction of Single Point Incrementally Formed Polycarbonate*, Procedia Manuf., 10, **2017**, pp. 329–338
- [ESM, 17] Esmaeilpour, R., Kim, H., Park, T., Pourboghraat, F., Mohammed, B., *Comparison of 3D yield functions for finite element simulation of single point incremental*

- forming (SPIF) of aluminum 7075*, International Journal of Mechanical Sciences, 133, **2017**, pp. 544 – 554
- [ESM, 18] Esmailpour, R., Kim, H., Park, T., Pourboghra, F., Xu, Z., Mohammed, B., Abu-Farha, F., *Calibration of Barlat Yld2004-18P yield function using CPFEM and 3D RVE for the simulation of single point incremental forming (SPIF) of 7075-O aluminum sheet*, International Journal of Mechanical Sciences, 145, **2018**, pp. 24 – 41
- [ESS, 11] Essa, K., Hartley, P., *An assessment of various process strategies for improving precision in single point incremental forming*, International Journal of Material Forming, 4, **2011**, pp. 401 – 412
- [FIL, 06/1] Filice, L., *A phenomenology-based approach for modelling material thinning and formability in incremental forming of cylindrical parts*, 220, **2006**, pp. 1449 – 1455
- [FIL, 06/2] Filice, L., Ambrogio, G., Micari, F., *On-Line Control of Single Point Incremental Forming Operations through Punch Force Monitoring*, CIRP Annals, 55, **2006**, pp. 245 – 248
- [FIL, 13] Filice L., Ambrogio G. and Gaudio M., *Optimised tool-path design to reduce thinning in incremental sheet forming process*, International Journal of Material Forming. vol. 6, **2013**, p 173–178.
- [FLO, 07] Flores, P., Duchene, L., Bouffieux, C., Lelotte, T., Henrard, C., Pernin, N., Van Bael, A., He, S., Duflou, J., Habraken, A. M., *Model identification and FE simulations Effect of different yield loci and hardening laws in sheet forming*, International Journal of Plasticity, 23, **2007**, pp. 420 – 449
- [FRA, 09] Franli, V., Kwiatkowski, L., Martins, P. A.F., Tekkaya, A. E., *Single point incremental forming of PVC*, Journal of Materials Processing Technology, 209, **2009**, pp. 462 - 469
- [GAO, 99] Gao, X. C., Kang, D. C., Meng, X. F., Wu, H. J., *Experimental research on a new technology-ellipse spinning*, Journal of Materials Processing Technology, 94 (2–3), **1999**, pp. 197–200
- [GUZ, 12] Guzmán, C. F., Gu, J., Duflou, J., Vanhove, H., Flores, P., Habraken, A. M., *Study of the geometrical inaccuracy on a SPIF two-slope pyramid by finite element simulations*, International Journal of Solids and Structures, 49, **2012**, pp. 3594–3604
- [HAG, 04] Hagan, E., Jeswiet, J., *Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming*, Journal of Engineering Manufacture, 218, **2004**, pp. 1307 – 1312

- [HAM, 06] Ham, M., Jeswiet, J., *Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003*, CIRP Annals, 55, **2006**, pp. 241 – 244
- [HAM, 08] Ham, M., Jeswiet, J., *Dimensional Accuracy of Single Point Incremental Forming*, International Journal of Material Forming, 1 (S1), **2008**, pp. 1171–1174
- [HAN, 11] Han, F., Mo, J., Li, M., *Method of closed springback compensation for incremental sheet forming process*, Journal of Central South University, 18, **2011**, pp. 1509 - 1517
- [HEN, 11] Henrard, C., Bouffioux, C., Eyckens, P., Sol, H., Duflou, J. R., Van Houtte, P., Van Bael, A., Duchene, L., Habraken, A. M., *Forming forces in single point incremental forming: prediction by finite element simulations, validation and sensitivity*, Computational Mechanics, 47, **2011**, pp. 573 – 590
- [HUS, 07] Hussain, G., Gao, L., *A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, **2007**, pp. 419 – 435
- [HUS, 08] Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., Cui, Z., Pang, Y. C., Dar, N. U., *Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet*, Journal of Materials Processing Technology, 203, **2008**, pp. 193 – 201
- [HUS, 11] Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., *Forming Parameters and Forming Defects in Incremental Forming of an Aluminum Sheet: Correlation, Empirical Modeling, and Optimization: Part A*, Materials and Manufacturing Processes, 26, **2011**, pp. 1546 – 1553
- [HUS, 14] Hussain, G., Al-Ghamdi, K. A., Khalatbari, H., Iqbal, A., Hashemipour, M., *Forming Parameters and Forming Defects in Incremental Forming Process: Part B*, Materials and Manufacturing Processes, 29, **2014**, pp. 454 – 460
- [ISE, 01] Iseki, H. *Flexible and Incremental Bulging of Sheet Metal Using High-Speed Water Jet*, JSME International Journal, Series C, 4, **2001**, pp. 486-493
- [ISE, 07] Iseki, H., Nara, T., *Incremental bulging of sheet metal using water jet and shots*, Key Eng Mater, 344, **2007**, pp. 575–582
- [ISI, 16] 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*, J. Mech. Sci. Technol., 30, **2016**, pp. 2151–2161
- [JAC, 08] Jackson, K. P., Allwood, J. M., Landert, M., *Incremental forming of sandwich panels*, Journal of Materials Processing Technology, 204, **2008**, pp. 2290 – 303



- [JES, 05/1] Jeswiet, J., Duflou, J. R., Szekeres, A., *Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming*, Advanced Materials Research, 6-8, 2005, pp. 449–456
- [JES, 05/2] Jeswiet, J., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., Allwood, J., *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*, CIRP Annals, 54, **2005**, pp. 88 – 114
- [JES, 05/3] Jeswiet, J., Duflou, J. R., Szekers, A., Lefebvre, P., *Custom Manufacture of a Solar Cooker - a case study*, Advanced Materials Research, 6 – 8, **2005**, pp. 487 – 492
- [JUR, 05] Jurisevic, B., Kuzman, K., Junkar, M., *Water jetting technology: an alternative in incremental sheet metal forming*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 31(1-2), **2005**, pp. 18–23
- [KAW, 01] Kawai, K., Yang, L. N., Kudo, H., *A flexible shear spinning of truncated conical shells with a general-purpose mandrel*, Journal of Materials Processing Technology, 113 (1–3), **2001**, pp. 28–33
- [KAW, 02] Kawai, K., Kushida, H., Kudo, H., *Rotary drawing of cylindrical cup*, Advanced Technology of Plasticity, 2, **2002**, pp. 1429–1434
- [KAW, 07] Kawai, K., Yang, L. N., Kudo, H., *A flexible shear spinning of axi-symmetrical shells with a general-purpose mandrel*, Journal of Materials Processing Technology 192–193, **2007**, pp.13–17
- [KIM, 01] Kim, T.J., Yang, D.Y., *Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process*, International Journal of Mechanical Sciences, 42, **2001**, pp. 1271-1286
- [KIT, 94] Kitazawa, K., Wakabayashi, A., Murata, K., Seino, J., 1994. *A CNC Incremental sheet metal forming method for producing the shell components having sharp components*, Journal of JSTP 35, 406, **1994**, pp. 1348–1353
- [KLO, 03] Klocke, F., Wehrmeister, T., *Laser-assisted metal spinning of advanced materials*, 4th Lane Conference, Erlangen Germany, **2003**
- [KUR, 14] 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, 3, **2014**, pp. 158 – 171
- [LAM, 05] Lamminen, L., *Incremental sheet forming with an industrial robot–forming limits and their effect on component design*, Advanced Materials Research, 6, **2005**, pp. 457-464
- [LAN, 85] Lange, K., *Handbook of Metal Forming*, SME publications, **1985**

- [LI, 99] Li, M., Liu, Y., Su, S., Li, G., *Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet*, Journal of Materials Processing Technology, 87 (1-3), **1999**, pp. 277–280
- [LI, 07] Li, M.-Z., Cai, Z.-Y., Liu, C.-G., *Flexible manufacturing of sheet metal parts based on digitized-die*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23(1), **2007**, pp. 107–115
- [LI, 15] Li, Y., Daniel, W. J. T., Liu, Z., Lu, H., Meehan, P. A., *Deformation mechanics and efficient force prediction in single point incremental forming*, Journal of Materials Processing Technology, 221, **2015**, pp. 100 – 111
- [LIN, 16] Lingam, R., Bansal, A., Reddy, N. V., *Analytical prediction of formed geometry in multi-stage single point incremental forming*, International Journal of Material Forming, 9, **2016**, pp. 395 – 404
- [LIU, 06] Liu, C., Li, M., Fu, W., *Principles and apparatus of multi-point forming for sheet metal*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 35 (11-12), **2006**, pp. 1227–1233
- [LIU, 14] Liu, Z., Liu, S., Li, Y., Meehan, P. A., *Modeling and Optimization of Surface Roughness in Incremental Sheet Forming using a Multi-objective Function*, Materials and Manufacturing Processes, 29, **2014**, pp. 808 – 818
- [LU, 13] Lu, B., Chen, J., Ou, H., Cao, J., *Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process*, Journal of Materials Processing Technology, 213, **2013**, pp. 1221 – 1233
- [LU, 17] Lu, B., Mohamed B., Cao, M. W., Ai, S., Chen, J., Ou, H., Long, H., *A study of incremental sheet forming by using water jet*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91 (5-8), **2017**, pp. 2291–2301
- [MAQ, 18] Maqbool, F., Bambach, M., *Dominant deformation mechanisms in single point incremental forming (SPIF) and their effect on geometrical accuracy*, International Journal of Mechanical Sciences, 136, **2018**, pp. 279 – 292
- [MAR, 11] Marabuto, S. R., Afonso, D., Ferreira, J. A. F., Melo, F. Q., Martins, M. A. B. E., & de Sousa, R. J. A. *Finding the Best Machine for SPIF Operations - a Brief Discussion*, Key Engineering Materials, vol. 473, **2011**, pp. 861–868.
- [MAT, 94] Matsubara, S., *Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Tool*, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 35, **1994**, pp. 1311-1316

- [MAT, 01] Matsubara, S., *A computer numerically controlled dieless incremental forming of a sheet metal*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B. Journal of Engineering Manufacture, 215 (7), **2001**, pp. 959–966
- [MAT, 02] Mata, V., Provenzano, S., Valero, F., Cuadrado, J., *Serial-robot dynamics algorithms for moderately large numbers of joints*, Mechanism and Machine Theory, 37(8), **2002**, pp. 739–755
- [MEI, 05/1] Meier, H., Dewald, O., Zhang, J., *A New Robot-Based Sheet Metal Forming Process*, Advanced Materials Research, 6-8, **2005**, pp. 465–470
- [MEI, 05/2] Meier, H., Dewald, O., Zhang, J., *Development of a Robot-Based Sheet Metal Forming Process*, Steel Research International, Dusseldorf, **2005**, pp. 167-170
- [MEI, 07] Meier, H., Smukala, V., Dewald, O., Zhang, J., *Two Point Incremental Forming with Two Moving Forming Tools*, Key Engineering Materials, 344, **2007**, pp. 599-605
- [MEI, 09] Meier, H., Buff, B., Laurischkat, R., Smukala, V., *Increasing the part accuracy in dieless robotbased incremental sheet metal forming*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58, **2009**, 233–238
- [MEI, 11] Meier, H., Magnus, C., Smukala, V., *Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 60, **2011**, pp. 327–330
- [MIC, 07] 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, 191, **2007**, pp. 390 – 395
- [MIR, 13] Mirnia, M. J., Mollaei Dariani, B., Vanhove, H., Duflou, J. R., *An investigation into thickness distribution in single point incremental forming using sequential limit analysis*, International Journal of Material Forming, 7, **2014**, pp. 469 – 477
- [MOR, 08] Mori, K., Ishiguro, M., Isomura, Y., *Hot shear spinning of cast aluminium alloy Parts*, Journal of Materials Processing Technology, 209 (7), **2008**, pp. 3621–3627
- [MUS, 10] Music, O., Allwood, J. M., Kawai, K., *A review of the mechanics of metal spinning*, Journal of Material Processing Technology, 210, **2010**, pp. 3-23
- [NAJ, 21] Najm, S.M., Paniti, I., *Artificial neural network for modeling and investigating the effects of forming tool characteristics on the accuracy and formability of thin aluminum alloy blanks when using SPIF*, Int J Adv Manuf Technol, 114, **2021**, pp. 2591–2615

- [NAR, 19] Naranjo, J. A., Miguel, V., Martinez, A., Coello, J., Manjabacas, M. C., *Evaluation of the formability and dimensional accuracy improvement of Ti6AL4V in warm SPIF processes*, *Metals*, 9, **2019**
- [NAS, 18] Nasulea D. and Oancea G., *Integrating a New Software Tool Used for Tool Path Generation in the Numerical Simulation of Incremental Forming Processes*, *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 64, **2018**, p 643-651.
- [OBI, 09] Obikawa, T., Satou, S., Hakutani, T., *Dieless incremental micro-forming of miniature shell objects of aluminum foils*, 49, **2009**, pp. 906 – 915
- [OLE, 08] Oleksik, V., Bologa, O., Breaz, R., Racz, G., *Comparison between the numerical simulations of incremental sheet forming and conventional stretch forming process*, *International Journal of Material Forming*, 1, **2008**, pp. 1187 – 1190
- [OLE, 09] Oleksik, V., Pascu, M., Deac, C., Fleacă, R., Roman, M, *Numerical simulation of the incremental forming process for knee implants*, X International Conference on Computational Plasticity COMPLAS X, Barcelona, Spain, 1-4 September **2009**
- [OLE, 10/1] Oleksik, V., Pascu, A., Deac, C., Fleaca, S., Roman, M., Bologa, O., *The Influence of Geometrical Parameters on the Incremental Forming Process for Knee Implants Analyzed by Numerical Simulation*, AIP Conference Proceedings, 1252, **2010**, pp.1208-1215
- [OLE, 10/2] Oleksik, V., Pascu, A., Mara, D., Bologa, O., Racz, S. -G., Breaz, R., *Influence of Geometric Parameters on Strain and Thickness Reduction in Incremental Forming Process*, STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, 81, **2010**, pp. 930-933
- [OLE, 18] Oleksik, M., *Comparative Study About Different Experimental Layouts Used on Single Point Incremental Forming Process*, *Acta Universitatis Cibiniensis*, 70, **2018**, pp. 21-27
- [OLE, 21] Oleksik, V., Dobrotă, D., Racz, S. -G., Rusu, G. P., Popp, M. O., Avrigean, E., *Experimental research on the behaviour of metal active gas tailor welded blanks during single point incremental forming process*, *Metals*, 11, 198, **2021**
- [PER, 11] Perezhyphen, S. R., Fiorentino, A., Marzi, R., Rodriguez, C. A., *Advances in Simulation of Two Point Incremental Forming*, AIP Conference Proceedings, 1353, **2011**, pp. 183-188
- [PET, 09] Petek, A., Kuzman, K., Suhac, B., *Autonomous on-line system for fracture identification at incremental sheet forming*, *CIRP Annals*, 58, **2009**, pp. 283 – 286

- [POP, 19/1] Popp, M. O., Rusu, G. P., Racz, S. -G., Popp, I. O., *Force and thickness prediction with FEA of the cranial implants manufactured through SPIF*, MATEC Web of Conferences, 290, 2019
- [POP, 19/2] Popp, M. O., Oleksik, M., Racz, S. -G., Rusu, G. P., *Numerical Study of a Process Strategy for Improving Geometrical Accuracy in Incremental Forming Process*, Acta Universitatis Cibinieinsis, Technical Series, 71, pp. 62 – 66, 2019
- [POP, 20] Popp, M. O., Rusu, G. P., Oleksik, V., Biriş, C., *Influence of vertical step on forces and dimensional accuracy of SPIF parts – a numerical investigation*, IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering, 968, 2020
- [POP, 21] Popp, M., Rusu, G. P., Racz, S. -G., Oleksik, V., *Common defects of parts manufactured through single point incremental forming*, MATEC Web of Conferences, 343, **2021**
- [POP, 22/1] Popp, M. O., Racz, G. S., Oleksik, M., Gîrjob, C., Biriş, C., *Analysis of forming forces at SPIF using Taguchi method*, MATEC Web of Conferences, 368, **2022**
- [POP, 22/2] Popp, M. O., Rusu, G. P., Popp, I. O., Gîrjob, C., *Numerical Study of Variable Wall Angle Made of DC01 Steel by Incremental Forming Process*, Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series, 74, **2022**, pp. 21 – 25
- [ RAC, 19] Racz, G. S., Oleksik, V. S., Breaz, R. E., *Incremental forming–CAE/CAM approaches and results*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 591, **2019**
- [RAC, 22] Racz, S.-G., Crenganiş, M., Breaz, R. -E., Bârsan, A., Gîrjob, C. E., Biriş, C. -M., Tera, M., *Integrating Trajectory Planning with Kinematic Analysis and Joint Torques Estimation for an Industrial Robot Used in Incremental Forming Operations*, Machines, 10, **2022**
- [RAD, 10] Radu, C., *New configurations of the SPIF process – A review*, Journal of Engineering Studies and Research, vol. 16, **2010**, pp. 33-39
- [RAD, 13] Radu, M. C., Cristea, I., *Processing Metal Sheets by SPIF and Analysis of Parts Quality*, Materials and Manufacturing Processes, 28, **2013**, pp. 287 – 293
- [RAU, 08] Rauch, M., Hascoet, J. Y., Hamann, J. C., Plennel, Y., *A new approach for toolpath programming inn incremental sheet forming*, International Journal of Material Forming, 1, **2008**, pp. 1191 - 1194
- [RAU, 09] Rauch, M., Hascoet, J. -Y., Hamann, J. -C., Plenel, Y., *Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications*, Computer-Aided Design, 41, **2009**, pp. 877 – 885

- [ROS, 19] Rosca, N., Oleksik, M., *Simulation of the Single Point Incremental Forming of Polyamide and Polyethylene Sheets*, 9th International Conference on Manufacturing Science and Education -MSE 2019- Matec Web of Conferences 290, **2019**
- [ROS, 22] Rosca, N., Trzepieciniski, T., Oleksik, V., *Minimizing the Forces in the Single Point Incremental Forming Process of Polymeric Materials Using Taguchi Design of Experiments and Analysis of Variance*, Materials, 15, **2022**
- [ROS, 23] Rosca, N., Oleksik, M., Rosca, L., Avrigean, E., Trzepieciński, K., Najm, S.M., Oleksik, V., *Minimizing the Main Strains and Thickness Reduction in the Single Point Incremental Forming Process of Polyamide and High-Density Polyethylene Sheets*, Materials, 16, **2023**
- [RUN, 94] Runge, M., *Spinning and Flow Forming*, Leifeld GmbH, **1994**
- [RUS, 19] Rusu, G. P., Popp, M. O., Oleksik, M., Rodean, C., *Numerical simulation of material failure in single point incremental forming process*, IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering, 564, **2019**
- [RUS, 21] Rusu, G. P., Bârsan, A., Popp, M. O., Maroșan, I. A., *Comparison between aluminum alloys behavior in incremental sheet metal forming process of frustum pyramid shaped parts*, IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering, 1009, **2021**
- [RUS, 22] Rusu, G. P., Popp, M. O., Chicea, A. L., Popp, I. O., *Determining the Forming Limit Diagram by Experimental Methods*, Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series, 74, **2022**, pp. 10 – 14
- [SAL, 16] Salem, E., Shin, J., Nath, M., Banu, M., Taub, A. I., *Investigation of thickness variation in single point incremental forming*, Procedia Manufacturing, 5, **2016**, pp. 828 – 837
- [SAS, 08] Sasso, M., Callegari, M., Amodio, D., *Incremental forming: an integrated robotized cell for production and quality control*, Meccanica, 43 (2), **2008**, pp. 153-163
- [SCH, 05] Schäfer, T., Schraft, R.D., *Incremental sheet metal forming by industrial robots*, Rapid Prototyping Journal, 11 (5), **2005** pp. 278 – 286
- [SEN, 15] Sena, J. I. V., *Advanced numerical framework to simulate Incremental Forming Processes*, PhD thesis, University of Liège and University of Aveiro, **2015**
- [SHI, 19] Shi, Y., Zhang, W., Cao, J., Ehmann, K. F., *An Experimental and Numerical Study of Dieless Water Jet Incremental Microforming*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 141, **2019**

- [SHI, 97] Shima, S., Kotera, H., Murakami, H., *Development of flexible spin-forming Method*, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 38 (440), **1997**, pp. 814–818
- [SHO, 18] Shojaeefard, M. H., Khalkhali, A., Shahbaz, S., *Analysis and optimization of the surface waviness in the single-point incremental sheet metal forming*, Journal of Process Mechanical Engineering, 233, **2018**, pp. 919 – 925
- [SIL,12] Silva, M. B., Martins, P. A. F., *Two-Point Incremental Forming with Partial Die: Theory and Experimentation*, Journal of Materials Engineering and Performance, 22 (4), **2012**, pp. 1018–1027
- [SIL, 14] Silva, M. B., Martins, P. A. F., *Comprehensive Materials Processing, 3.02 – Incremental Sheet Forming*, Elsevier, **2014**, pp. 7 – 26
- [SOU, 14] de Sousa, R. A., Ferreira, J. A. F., de Farias, J. S., Torrão, J. N. D., Afonso, D., Martins, M. A. B. E., *SPIF-A: on the development of a new concept of incremental forming machine*, Structural Engineering and Mechanics, 59 (5), **2014**, pp. 645-660
- [TAN, 11] Tanaka, Y., Goto, H., & Ichiryu, K. *Innovative Machine Design Based on 6-DOF Parallel Kinematics Mechanism*. Proceedings of the 4th International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, **2011**, pp. 43-52
- [TER, 14] Tera, M., Breaz, R., Bologa, O., Racz, G., *Using a CNC milling machine for incremental forming*, *Proceedings in Manufacturing Systems*, 9, **2014**, pp. 99 – 104
- [TER, 17] Tera M., Breaz R. E., *Considerations regarding the incremental forming process in manufacturing*, *Proceedings in Manufacturing Systems*, vol. 12, **2017**, p. 85-90.
- [TER, 19] Tera M., Breaz R., Racz G. and Girjob C., *Processing strategies for single point incremental forming – a CAM approach*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.102, **2019**, p. 1761-1777
- [TIS, 01] Tisza, M., Fulop, T., *A general overview of tribology of sheet metal forming*, Journal for Technology of Plasticity, 6, **2001**, pp. 11 – 25
- [VAR, 97] Várady, T., Martin, R. R., Cox, J. *Reverse engineering of geometric models-an introduction*, Computer-Aided Design, 29 (4), **1997**, pp. 255–268
- [VIH, 08] Vihtonen, L., Puzik, A., Katajarinne T., *Comparing Two Robot Assisted Incremental Forming Methods: Incremental Forming by Pressing and Incremental Hammering*, International Journal of Materials Forming, **2008**, pp. 1207 –1210
- [WAN, 16] Wang, J., Nair, M., Zhang, Y., *An efficient force prediction strategy for single point incremental sheet forming*, *Procedia Manufacturing*, 5, **2016**, pp. 761 – 771

- [WES, 03] Westkämper, E., Schaaf, W., Schäfer, T., *Roboshaping–Flexible Inkrementelle Blechumformung mit Industrierobotern*, Werkstattstechnik online, **2003**
- [XU, 12] Xu, D., Malhotrab, R., Reddy, N. V., Chena, J., Caoa, J., *Analytical prediction of stepped feature generation in multi-pass single point incremental forming*, Journal of Manufacturing Processes, 14, **2012**, pp. 487–494
- [YAZ, 19] Yazar, K. U., Mishra, S., Narasimhan, K., Date, P. P., *Deciphering the deformation mechanism in single point incremental forming experimental and numerical investigation*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101, **2019**, pp. 2355 – 2366
- [YOO, 01] Yoon, S. J., Yang, D. Y., *Investigation into a new incremental forming process using an adjustable punch set for the manufacture of a doubly curved sheet metal*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215 (7), **2001**, pp. 991–1004
- [ZHA, 10] Zhang, Q., Xiao, F., Guo, H., Li, G., Lin, G., Guo, X., Han, W., Bondarev, A. B., *Warm negative incremental forming of magnesium alloy AZ31 Sheet: New lubricating method*, Journal of Materials Processing Technology, 210, **2010**, pp. 323 – 329
- [ZHE, 17] Zhengfang, L., Shihong, L., Tao, Z., Zhixiang, M., Chun, Z., *Analysis of geometrical accuracy based on multistage single point incremental forming of a straight wall box part*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93 (5-8), **2017**, pp. 2783–2789
- [1] - <http://ampl.mech.northwestern.edu/research/current-research/incremental-forming-machines.html>
- [2] - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, D.o. Defense, Editor August 2013, American Society of Testing and Materials (ASTM).
- [3] - Metallic materials - Tensile testing, British standard, Iunie (2001).
- [4] - Japanese Industrial Standards (JIS), J.S.A. (JSA), Editor (2005).
- [5] - Standard Test Methods for Mechanical Testing of Steel Products - Metric ASTM A 1058b, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., (2012).
- [7] - [www.abaqus.com](http://www.abaqus.com)