



UNIVERSITATEA  
LUCIAN BLAGA  
— DIN SIBIU —



Școala doctorală de Științe Inginerești și Matematică

Domeniul de doctorat: Inginerie Industrială

## TEZĂ DE DOCTORAT

**Comportarea la deformare incrementală a  
tablelor sudate**

Doctorand:

**ING. GABRIELA-PETRUȚA RUSU**

Conducător de doctorat:

**PROF. UNIV. DR. ING. VALENTIN ȘTEFAN  
OLEKSIK**

# CUPRINS

1. INTRODUCERE.....	1
2. STUDIU PRIVIND PROCESUL DE DEFORMARE INCREMENTALĂ A TABLELOR	3
2.1 Clasificarea procesului de deformare incrementală .....	4
2.1.1 Procesul de deformare incrementală într-un singur punct .....	5
2.1.2 Procesul de deformare incrementală în două puncte sau cu contra-poanson.....	6
2.1.3 Procesul de deformare incrementală cu placă activă conjugată.....	8
2.1.4 Procesul de deformare incrementală cu jet de apă .....	9
2.1.5 Procesul de deformare incrementală cu laser .....	10
2.2 Utilaje, echipamente și parametri tehnologici folosiți la procesul de deformare incrementală.....	11
2.2.1 Utilaje și echipamente utilizate pentru implementarea procesului de deformare incrementală.....	11
2.2.2 Scule utilizate la deformarea incrementală .....	13
2.2.3 Lubrifierea utilizată la deformarea incrementală .....	15
2.2.4 Traietoriile utilizate la deformarea incrementală a tablelor .....	18
2.2.5 Materiale utilizate în proces .....	21
2.2.5.1 Determinarea deformabilității materialelor la deformarea incrementală	
24	
2.3 Precizia dimensională a pieselor deformate incremental .....	27
2.3.1 Revenirea elastică a materialului.....	28
2.3.2 Efectul de „pernă” al pieselor deformate incremental .....	29
2.3.3 Subțierea materialului .....	29
2.4 Forțele de deformare la deformarea incrementală.....	30
2.5 Simularea numerică a procesului de deformare incrementală .....	33
2.6 Aplicații ale procesului de deformare incrementală.....	35
2.7 Concluzii .....	37

3. STUDIUL PROCESULUI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ A TABLELOR SUDATE.....	39
3.1 Introducere .....	39
3.2 Terminologia procesului de sudare .....	40
3.3 Clasificarea proceselor de sudare .....	41
3.4 Deformarea incrementală a tablelor sudate.....	47
3.5 Concluzii .....	54
3.6 Obiective .....	55
4. METODOLOGIA CERCETĂRII ȘI ECHIPAMENTE UTILIZATE .....	57
4.1 Planificarea experimentală și generarea traiectoriilor.....	57
4.2 Echipamente utilizate .....	64
5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA LA DEFORMARE INCREMENTALĂ A TABLELOR METALICE .....	72
5.1 Determinarea experimentală a diagramei tensiune convențională-deformație convențională.....	73
5.1.1 Considerații generale.....	73
5.1.2 Analiza rezultatelor obținute în urma încercării la tracțiune.....	76
5.2 Cercetări experimentale preliminare privind comportamentul tablelor nesudate la deformarea incrementală.....	81
5.3 Cercetări experimentale cu privire la influența parametrilor care țin de piesă în procesul de deformare incrementală .....	91
5.3.1 Planificarea experimentală pentru analiza parametrilor care țin de piesă la deformare incrementală .....	91
5.3.2 Analiza stării de deformații a tablelor nesudate .....	92
5.3.3 Analiza revenirii elastice globale a pieselor din table nesudate.....	104
5.3.4 Analiza forțelor obținute în timpul procesului de deformare incrementală a tablelor nesudate .....	108
5.4 Concluzii .....	116
6. MODELAREA ȘI SIMULAREA NUMERICĂ A PROCESULUI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ.....	118
6.1 Modelul analitic utilizat la simularea procesului de deformare incrementală .....	118

6.2 Rezultatele obținute în urma simulării numerice a semifabricatelor metalice nesudate	124
6.3 Implementarea unui algoritm de automatizare a interpretării rezultatelor .....	138
6.4 Simularea numerică a deformării incrementale a tablelor sudate .....	142
6.5 Concluzii .....	158
<b>7. CERCETĂRI EXPERIMENTALE LEGATE DE COMPORTAREA LA DEFORMARE INCREMENTALĂ A SEMIFABRICATELOR DIN OȚELUL DC01 SUDATE PRIN TUNGSTEN INERT GAS.....</b>	<b>160</b>
7.1 Cercetări experimentale privind influența cordonului de sudură obținut în urma procesului de sudură tungsten inert gas asupra comportării la întindere uniaxială a tablelor sudate .....	161
7.2 Studiul experimental privind comportarea semifabricatelor sudate cu TIG din dc01 la deformare incrementală .....	166
7.2.1 Cercetări experimentale privind ruperea unor piese deformate incremental din semifabricate sudate prin TIG.....	166
7.2.2 Analiza deformațiilor obținute la deformarea incrementală a semifabricatelor sudate prin TIG .....	168
7.2.3 Analiza revenirii elastice obținute în urma deformării incrementale a semifabricatelor sudate prin TIG .....	174
7.2.3 Analiza forțelor obținute în urma deformării incrementale a semifabricatelor sudate prin TIG .....	176
7.3 Concluzii .....	179
<b>8. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA LA DEFORMARE INCREMENTALĂ A SEMIFABRICATELOR SUDATE PRIN METODA WOLFRAM INERT GAS.....</b>	<b>181</b>
8.1 Studiul semifabricatelor realizate din DC01 sudate prin Wolfram Inert Gas și deformate incremental .....	182
8.1.1 Analiza cordonului de sudură obținut prin WIG.....	182
8.1.2 Analiza comportării semifabricatelor din dc01 sudate prin WIG supuse procesului de deformare incrementală .....	186
8.1.2.1 Analiza deformațiilor obținute la deformarea incrementală a semifabricatelor sudate cu metoda WIG.....	188

8.1.2.2 Analiza valorilor revenirii elastice globale obținute prin deformarea incrementală a semifabricatelor sudate prin WIG .....	198
8.1.2.3 Analiza forțelor obținute în timpul procesului de deformare incrementală a semifabricatelor de tablă sudată prin WIG .....	200
8.2 Studiul semifabricatelor realizate din AA1050 sudate cu metoda Wolfram Inert Gas	205
8.3 Concluzii .....	212
9. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA LA DEFORMARE INCREMENTALĂ A SEMIFABRICATELOR SUDATE CU GAZ ACTIV METALIC...	215
9.1 Analiza comportării cordonului de sudură obținut prin MIG/MAG .....	217
9.2 Studiul experimental privind comportarea semifabricatelor sudate din oțel S355 la deformare incrementală .....	221
9.2.1 Analiza deformațiilor obținute prin deformarea incrementală a semifabricatelor sudate cu metoda MAG .....	221
9.2.2 Analiza valorilor revenirii elastice globale obținute prin deformarea incrementală a semifabricatelor sudate cu metoda MAG .....	229
9.2.3 Analiza forțelor obținute în timpul procesului de deformare incrementală a semifabricatelor de tablă sudată cu MAG .....	230
9.3 Concluzii .....	234
10. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.....	236
10.1 Concluziile tezei de doctorat .....	236
10.2 Contribuții originale ale tezei de doctorat .....	241
10.3 Direcții de cercetare viitoare .....	242
11. BIBLIOGRAFIE .....	244
ANEXE .....	253
ANEXA 1. Conținutul algoritmului de automatizare a interpretării rezultatelor.....	253
ANEXA 2. Interfața algoritmului de automatizare în fereastra abaqus. ....	257
ANEXA 3. Programul în limbajul specific kuka utilizat la realizarea încercărilor experimentale cu unghi variabil.....	258
ANEXA 4. Fișierul .inp utilizat pentru rularea analizei cu elemente finite pentru încercarea experimentală C15 .....	268

LISTĂ DE LUCRĂRI .....	273
------------------------	-----

**CUVINTE CHEIE:** deformare incrementală, table de grosimi mici, sudură, procedee de sudură, metoda elementului finit, ABAQUS EXPLICIT, simulări numerice, deformații specifice, subțierea materialului, unghiul de forfecare, revenirea elastică a materialului, comportamentul tablelor sudate, KUKA KR 210-2, ARAMIS.



Procedeele de deformare plastică a tablelor sunt procese importante de fabricație, utilizate pentru a produce componente folosite în diferite sectoarele civile și industriale. Procedeele de deformare plastică ale tablelor au rolul de a obține forma dorită a pieselor fără subțiere excesivă sau apariția cutelor, și fără a se îndepărta așchii. Deformarea plastică a tablelor se poate realiza prin procedee convenționale, cum ar fi: ambutisarea, îndoirea, laminarea și altele. Pentru realizarea procedeeleor convenționale de deformare a tablelor metalice, sunt necesare matrițe speciale, complexe și costisitoare, adaptate formei dorite a piesei [SCH, 92]. În plus, este necesară utilizarea unor echipamente de prelucrare cu o precizie ridicată pentru producția pieselor. Prin urmare, procedeele convenționale de deformare a tablelor metalice sunt economice pentru producția medie, de serie mare și masă, deoarece costul matrițelor este distribuit între mai multe produse, ceea ce duce la o reducere semnificativă a costurilor sculelor [ARF, 13].

Realizarea de piese de calitate în loturi mici de fabricație reprezintă o provocare atât pentru procedeele convenționale, cât și pentru cele neconvenționale de deformare a tablelor. Datorită acestor motive și importanței deformării semifabricatelor de tip tablă în diverse industrii, cercetătorii prezintă un interes crescut în dezvoltarea unor noi metode de deformare, iar acestea devin tot mai atrăgătoare având aplicabilitate în domenii diverse. Printre tehnologiile neconvenționale se numără și deformarea incrementală a semifabricatelor de tip tablă, care este extrem de potrivită pentru prototipare sau producție de unicat din punct de vedere economic [FIL, 02]. Această metodă permite realizarea de produse unice, complexe, cu forme asimetrice. Procesul de deformare incrementală conduce la reducerea timpului și costului de producție în cazul prototipării și producției în serie mică.

În industria construcțiilor de mașini, fabricației de autovehicule și a altor structuri metalice, sudarea este un proces esențial și omniprezent. Sudarea oferă o modalitate eficientă de a uni componente metalice, asigurând rezistența și durabilitatea structurilor rezultate. Utilizarea semifabricatelor sudate este larg răspândită în industrie pentru a reduce greutatea pieselor fără a afecta rigiditatea acestora. Deformarea incrementală a tablelor sudate prezintă un interes nou în domeniu, datorită avantajelor aduse de procesul de sudare. Aceasta permite un control mai precis al formei și dimensiunilor piesei finale, eliminând riscul de supra-deformare sau sub-deformare a piesei. De asemenea, această tehnică poate fi aplicată la materiale cu proprietăți variate, inclusiv oțel, aluminiu, cupru și aliaje speciale. În concluzie, deformarea incrementală a tablelor sudate reprezintă o metodă eficientă și precisă de a deforma semifabricatele metalice sudate. Prin utilizarea acestui proces, se pot obține structuri solide,

fiabile și durabile, care îndeplinesc cerințele stricte de proiectare și performanță. Această tehnică continuă să fie dezvoltată și rafinată, contribuind semnificativ la avansarea industriei și tehnologiilor conexe.

În urma studiului bibliografic privind procesul de deformare incrementală a tablelor sudate se pot remarca următoarele:

- Procesul de sudare reprezintă o asamblare nedemontabilă a două sau mai multe componente și prezintă avantaje precum: reducerea consumului de material, realizarea pieselor complexe care nu pot fi obținute prin alte procese tehnologice și obținerea de îmbinări etanșe;
- Procesul de sudare se pretează producției de serie mică și unicat în diverse industrii, precum: industria construcțiilor de autovehicule, industria militară, industria chimică și industria alimentară;
- Clasificarea proceselor de sudare este extinsă, iar printre cele mai frecvent utilizate se regăsesc procesele de sudare prin topire. Acestea implică topirea materialului de adaos și a marginilor rosturilor materialului de bază sub influența unei surse de căldură, rezultând o baie de sudură care, prin cristalizare, formează cusătura sudată (cordonul de sudură). Unul dintre parametrii importanți ai procesului de sudare este reprezentat de alegerea corectă a rostului de sudare;
- Având în vedere procesul de deformare incrementală a tablelor subțiri și dificultatea de a suda prin topire table cu grosimi mai mici de 1 mm, majoritatea cercetătorilor din domeniu au utilizat procesul de sudare în stare solidă prin frecare („friction stir welding”);
- Cercetătorii din domeniu au investigat deformabilitatea pieselor sudate deformate incremental și au observat că din cauza procesului de sudare aceasta scade considerabil. Totuși, în cazul alegerii unor parametri optimi de sudare privind viteza de rotație a sculei, viteza de avans a acesteia și adâncimea de pătrundere în materialul de bază, numeroși autori au reușit să deformeze cu succes semifabricatele sudate;
- În cazul aliajelor de aluminiu au fost elaborate câteva lucrări care tratează procesul de sudare prin MIG/MAG, WIG sau TIG și au demonstrat că utilizând aceste procese se pot obține piese deformate incremental fără apariția ruperii materialului.

În urma stadiului actual realizat în domeniul deformării incrementale, prezentat în capitolele 2 și 3 ale acestei teze de doctorat, am luat decizia, împreună cu conducătorul de doctorat, de a studia comportarea la deformare incrementală a tablelor sudate. La realizarea acestui studiu am optat pentru utilizarea a trei materiale des întâlnite în domeniul construcțiilor de autovehicule: aliajul de aluminiu AA1050 și oțelurile DC01 și S355.

Inițial, am realizat o serie de încercări experimentale pentru a studia deformabilitatea celor trei materiale atunci când sunt deformate incremental și am decis să păstrez aceiași parametri tehnologici (diametrul poansonului, viteza de avans a acestuia, tipul traiectoriei utilizate și pasul vertical al poansonului) pentru toate încercările experimentale realizate și să



variez doar forma piesei, unghiul peretelui piesei și înălțimea acesteia. Astfel, am optat să realizez piese cu forma unui trunchi de con și de piramidă, cu unghiul fix al peretelui piesei de:  $50^\circ$ ,  $55^\circ$  și cu unghi variabil de  $40^\circ$  la  $75^\circ$ , iar înălțimea pieselor să fie de: 40 mm, 30 mm și 25mm. Studiul comportamentului materialelor de bază la deformarea incrementală l-am realizat analizând următoarele rezultate măsurate în timpul procesului:

- deformațiile specifice pe direcția X ( $\varepsilon_x$ );
- deformațiile specifice pe direcția Y ( $\varepsilon_y$ );
- deformațiile specifice principale ( $\varepsilon_1$ );
- deformațiile specifice secundare ( $\varepsilon_2$ );
- unghiul de forfecare ( $\gamma$ );
- subțierea materialului ( $s_{max}$ );
- revenirea elastică (R);
- forțele pe direcțiile X, Y și Z ( $F_x$ ,  $F_y$  și  $F_z$ ).

În cea de a doua etapă am decis să studiez comportarea la deformare incrementală a tablelor sudate prin procedeele: TIG, WIG și MAG. Rezultatele măsurate pot fi comparate cu cele obținute în etapa anterioară și se va observa influența sudurii în procesul studiat.

Având în vedere stadiul actual realizat în domeniu și a considerentelor prezentate anterior, am elaborat următoarele obiective ale tezei de doctorat:

1. Analiza și prelucrarea informațiilor din stadiul actual cu scopul identificării: materialelor care pot fi utilizate în procesul de deformare incrementală ca materiale de bază, formelor pieselor care pot fi prelucrate, parametrilor optimi tehnologici ai procesului, proceselor de sudare utilizate pentru table subțiri;
2. Realizarea testelor de întindere uniaxială în vederea determinării caracteristicilor mecanice ale materialelor pentru a fi utilizate în programele de analiză cu elemente finite ca date de intrare;
3. Realizarea testelor de întindere uniaxială în vederea verificării rezistenței sudurii;
4. Conceperea și dezvoltarea unui model teoretic pentru simularea numerică a procesului de deformare incrementală prin metoda elementelor finite;
5. Rularea unor analize dinamice explicite în vederea validării modelului teoretic propus prin compararea rezultatelor cu cele obținute experimental;
6. Implementarea unui algoritm în programul de analiză cu elemente finite, ABAQUS, în vederea automatizării prelucrării rezultatelor pentru a obține valorile revenirii elastice a materialului;
7. Realizarea unor simulări numerice prin intermediul modelului teoretic dezvoltat pentru a investiga comportamentul tablelor sudate deformate incremental;
8. Realizarea unei planificări a experimentelor prin intermediul metodei Taguchi;

9. Efectuarea încercărilor experimentale rezultate din planificare pentru a determina deformațiile specifice, subțierea materialului, revenirea elastică a acestuia și forțele de deformare;
10. Analizarea și prelucrarea statistică a datelor obținute experimental cu ajutor metodei Taguchi prin intermediul pachetului software Minitab;

### **Concluziile tezei de doctorat**

Procesul de deformare incrementală este un proces care se bucură de tot mai multă popularitate în rândul cercetătorilor din întreaga lume datorită potențialului ridicat reprezentat de fabricarea unor piese complexe. Pentru realizarea acestuia sunt utilizate un număr redus de componente (semifabricatul din tablă, elementele de fixare ale acestuia și scula care deformează tabla), astfel se obține un cost redus de fabricație a unui reper în comparație cu alte procese de deformare clasice.

Scopul acestei teze de doctorat este de a studia comportamentul semifabricatelor din tablă nesudată și sudată deformată incremental și de a analiza deformabilitatea materialelor în cazul procesului cercetat. În cadrul acestei teze, am ales să deformez incremental table din aliaj de aluminiu, AA1050, și din oțelurile, DC01 și S355, acestea fiind cele mai uzuale materiale în industria construcțiilor de autovehicule. În plus, am ales să analizez și influența diferitelor procedee de sudare a tablelor care ulterior au fost supuse procesului de deformare incrementală, verificând astfel care dintre procedeele de sudare prezintă cea mai bună deformabilitate. Chiar dacă în literatura de specialitate sunt tratate aspecte ale pieselor sudate deformată incremental, nu există până în momentul de față un studiu elaborat care să compare comportamentul la deformare incrementală a tablelor sudate prin diferite procedee de sudare, cât și a influenței cordonului de sudură asupra deformabilității tablelor sudate.

În cadrul procesului de deformare incrementală în mod uzual sunt utilizate semifabricate cu grosimi mici, de până la 1 mm, datorită forțelor de deformare mari care apar în timpul procesului. În schimb, în cazul procedeele de sudare prin topire sunt utilizate semifabricate cu grosimi între 1 mm și 14 mm, ceea ce conduce la dificultatea de a studia procesul de deformare incrementală a tablelor sudate prin procedeele convenționale. Astfel, în literatura de specialitate majoritatea cercetărilor au vizat analiza procesului de deformare incrementală a tablelor sudate prin procesul de sudare în stare solidă prin frecare („friction stir welding”) pentru a combate această dificultate. În plus față de cercetările de până în prezent în cadrul acestei teze am încercat să realizez sudarea prin procese de sudare convenționale prin topire a tablelor cu grosimi de 0.8 mm, 0.9 mm și 1 mm.

În cadrul acestei teze de doctorat rezultatele încercărilor experimentale au fost axate pe determinarea influenței cordonului de sudură asupra deformabilității tablelor și a comportamentului acestora în timpul procesului studiat, determinarea caracteristicilor

mecanice ale epruvetelor nesudate și validarea rezistenței mecanice a sudurilor prin testul de încercare la tracțiune, determinarea deformațiilor plastice ale materialului (deformații specifice principale, secundare, pe direcția X și Y), a unghiului de forfecare, a subțierii materialelor, a revenirii elastice 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 KR 210-2 utilizat la deformarea tablelor echipat cu traductorul de forță pe trei direcții PCB261A13 și sistemul optic de măsurare a deformațiilor ARAMIS utilizat în timpul procesului pentru achiziția de imagini. Pe lângă aceste echipamente am utilizat la realizarea sudurilor echipamentul de sudură Fronius MagicWave 4000 AC/DC TIG și robotul de sudură DAIHEN DR ARK ROBO 1100, aflate la partenerii industriali SC Compa SA și EASY INDUSTRY SRL.

În ceea ce privește cercetarea experimentală, aceasta a fost împărțită în patru etape. În prima etapă am analizat comportamentul tablelor nesudate la deformare incrementală, iar factorii tehnologici au fost păstrați constanți: pasul vertical de 0.5 mm, diametrul poansonului de 10 mm, viteza de avans de 0.04 m/s și traiectoria de tipul spirală spațială. Pentru studiul comportamentului tablelor nesudate am decis să variez unghiul peretelui piesei (50°, 55° și variabil de 40° la 75°) și grosimea semifabricatelor de 0.8 mm și 1 mm. Pentru planificarea experimentelor am utilizat metoda statistică Taguchi, astfel am redus numărul de experimente. La interpretarea rezultatelor am utilizat pachetul software Minitab v19 care permite generarea rapoartelor semnal/zgomot cu condiția impusă, în acest caz am folosit condiția „cu cât este mai mic cu atât este mai bine” deoarece este de dorit obținerea valorilor minime în cazul rezultatelor studiate. Traiectoriile urmate de poanson au fost realizate prin intermediul pachetului software SprutCam, iar acestea au fost de tipul spirală spațială pentru toate încercările experimentale.

Deși în cadrul încercărilor la tracțiune aliajul de aluminiu, AA1050, prezintă o alungire la rupere mică, aproximativ 5%, încercările experimentale au fost realizate fără apariția ruperii materialului datorită procesului de deformare incrementale care îmbunătățește proprietățile acestuia datorită solicitărilor complexe. În urma analizării și interpretării tuturor rezultatelor din prima etapă a cercetărilor experimentale am remarcat că se pot deforma cu succes piese cu unghiurile menționate anterior la adâncimea de 40 mm.

În urma cercetărilor experimentale din prima etapă am realizat un model teoretic al procesului de deformare incrementală bazat pe metoda elementelor finite. Rezultatele simulărilor numerice au fost analizate și comparate cu rezultatele obținute experimental, iar diferențele fiind mai mici de 10%, modelul teoretic este validat cu succes. Pentru procesarea mai ușoară a rezultatului privind revenirea elastică a materialului am conceput și dezvoltat un algoritm scris în limbajul de programare Python în vederea automatizării procesului de exportare

a secțiunilor necesare pentru a calcula acest rezultat. Utilizând modelul teoretic validat am realizat simularea numerică a procesului de deformare incrementală a tablelor sudate cu ajutorul pachetului software ABAQUS caz în care am utilizat următoarele combinații de table: 0.8 – 0.8 mm, 0.8 – 1 mm și 1 – 1 mm, pentru toate unghiurile propuse.

Toate aceste încercări au fost investigate și experimental în următoarele trei etape astfel: în următoarele două etape a cercetării acestei teze am utilizat planificarea experimentală Taguchi folosind doi factori cu trei nivele de variație fiecare, iar procesele de sudare au fost TIG și WIG; în ultima etapă am studiat comportamentul semifabricatelor din S355 nesudate și sudate prin procedeul MAG.

În urma cercetărilor teoretice și experimentale din această teză doctorală am ajuns la următoarele concluzii:

- În ceea ce privește încercările experimentale de referință prezentate în capitolul 5 am realizat 4 încercări preliminare cu unghiul peretelui variabil de la 40° până la 75° în vederea determinării deformabilității materialului. Aceste încercări au fost realizate cu succes, iar în urma acestora am optat pentru realizarea a încă 8 încercări cu unghiurile constante de 50° și 55° realizate pe aliajul de aluminiu AA1050 și oțelul DC01 cu grosimile de 0.8 mm și 1 mm. De asemenea aceste încercări au fost realizate fără apariția defectului dat de ruperea materialului și au fost măsurate deformațiile apărute în timpul procesului, subțierea materialului, revenirea elastică și forțele de deformare. Aceste încercări experimentale reprezintă referințele pentru studiul comportamentului tablelor sudate prin diferite procese.

- În urma încercărilor experimentale de referință am optat pentru studiul comportamentului tablelor sudate prin TIG, WIG și MAG.

- Deși procesele de sudare TIG și WIG sunt asemănătoare, am utilizat parametri tehnologici diferiți la realizarea proceselor de sudare, astfel fiind tratate în capitole diferite.

- În cazul încercărilor experimentale pe table sudate prin procesul TIG am observat din testul de încercare la tracțiune că există posibilitatea ca ruperea epruvetelor să se producă în zona cordonului de sudură datorită realizării manuale a procesului de sudare ceea ce poate conduce la cedarea prematură a sudurii în timpul procesului de deformare incrementală. Totuși, am încercat să realizez 9 încercări experimentale pe table sudate din oțelul DC01 fiind variate combinațiile de grosimi și unghiul peretelui piesei. Inițial, ca în cazul încercărilor de referință am realizat piesele cu unghiul variabil și am observat că acestea au cedat în zona cordonului de sudură, iar adâncimea minimă de rupere a fost de 32.31 mm. Astfel am exclus încercările experimentale pe piese cu unghiul peretelui de 55° și am realizat piesele cu unghiul de 50°. Acestea au fost realizate cu succes fără apariția ruperii materialului ceea ce înseamnă că se pot deforma incremental piese sudate prin procesul TIG cu unghiul peretelui de 50° cu o înălțime a piesei de 40 mm.

– În urma testelor de încercare la tracțiune pe epruvete sudate prin WIG am concluzionat că acestea au un cordon de sudură mai rezistent decât materialul de bază (DC01) datorită faptului că nici o epruvetă nu s-a rupt în zona acestuia. Acest aspect permite posibilitatea de a realiza cu succes procesul de deformare incrementală. Astfel, am planificat 9 încercări experimentale ca în cazul semifabricatelor sudate prin TIG. Din aceste încercări experimentale, combinația de grosimi 0.8 – 0.8 mm nu a rezistat la procesul de deformare incrementală, indiferent de unghiul peretelui piesei cu o rupere prematură la adâncimea de 11.5 mm. În schimb celelalte încercări experimentale realizate pe semifabricatele cu combinațiile de grosimi 0.8 – 1 mm și 1 – 1 mm au fost deformatate cu succes, indiferent de unghiul utilizat.

– Pe lângă semifabricatele sudate din DC01 am încercat să realizez procesul de sudare prin WIG a semifabricatelor din aliajul de aluminiu AA1050, proces care l-am realizat fie printr-o trecere pe o parte, fie printr-o trecere pe ambele părți. În urma procesului de sudare a acestui aliaj s-a obținut un cordon de sudură cu mult material de adaos. Acest aspect reprezintă un dezavantaj major în cazul procesului de deformare incrementală datorită deformațiilor excesive care apar atunci când poansonul trece peste cordonul de sudură, fapt confirmat de ruperea prematură în zona cordonului de sudură a tuturor semifabricatelor sudate din AA1050, indiferent de pasul vertical și diametrul poansonului utilizat.

– În cazul încercărilor experimentale realizate pe semifabricate din oțelul S355 sudate prin MAG am observat același comportament a epruvetelor supuse testului de încercare la tracțiune ca în cazul celor sudate prin WIG, adică acestea au cedat în zona materialului de bază. Pentru studiul comportamentului semifabricatelor sudate la deformare incrementală am optat pentru realizarea a două forme diferite: trunchi de con și trunchi de piramidă cu unghiul peretelui de 55° și înălțimea acestora de 30 mm. Asemănător semifabricatelor din AA1050 sudate prin WIG, sudura a fost realizată printr-o trecere, respectiv prin două treceri. Astfel am concluzionat că semifabricatele din S355 sudate printr-o trecere nu au rezistat procesului de deformare incrementală, în schimb cele sudate prin două treceri au fost deformatate cu succes.

– În urma cercetărilor realizate în cadrul acestei teze doctorale am ajuns la concluzia că semifabricatele sudate pot fi deformatate incremental cu succes, dar depinde foarte mult pe de o parte de parametrii tehnologici utilizați la procesul de sudare, respectiv de modalitatea de realizare a sudurii și experiența celor care o efectuează.

Pentru a avea o vedere de ansamblu asupra comportamentului tablelor din materiale studiate la deformare incrementală, pentru a sintetiza volumul mare de rezultate și pentru a putea concluzia diferențele dintre procedeele de sudură analizat am propus realizarea unei analize care ia în considerare comportarea în timpul prelucrării. La această analiză am folosit următoarele simboluri:

- ✓ a rezistat până la sfârșitul prelucrării
- ✗ s-a rupt în timpul prelucrării

În Tabelul 10.1 – 10.3 sunt prezentate analizele pentru cele trei materiale: aliajul de aluminiu (AA1050) și oțelurile (DC01 și S355).

Tabelul **Error! No text of specified style in document..1** – Analiza comportamentului semifabricatelor din DC01

Tipul semifabricatelor	Unghiul peretelui piesei	Grosimea semifabricatelor [mm]	Comportarea în timpul prelucrării
nesudate	variabil	0.8	✓
		1	✓
	50°	0.8	✓
		1	✓
	55°	0.8	✓
		1	✓
sudate prin TIG	variabil	0.8 – 0.8	✗
		0.8 – 1	✗
		1 – 1	✗
	50°	0.8 – 0.8	✓
		0.8 – 1	✓
		1 – 1	✓
	55°	0.8 – 0.8	✗
		0.8 – 1	✗
		1 – 1	✗
sudate prin WIG	variabil	0.8 – 0.8	✗
		0.8 – 1	✓
		1 – 1	✓
	50°	0.8 – 0.8	✗
		0.8 – 1	✓
		1 – 1	✓
	55°	0.8 – 0.8	✗
		0.8 – 1	✓
		1 – 1	✓

Tabelul **Error! No text of specified style in document..2** – Analiza comportamentului semifabricatelor din AA1050

Tipul semifabricatelor	Unghiul peretelui piesei	Grosimea semifabricatelor [mm]	Comportarea în timpul prelucrării
nesudate	variabil	0.8	✓
		1	✓

	50°	0.8	✓
		1	✓
	55°	0.8	✓
		1	✓
sudate prin WIG printr-o trecere pe o parte	55°	0.8 – 0.8	✗
		0.8 – 1	✗
		1 – 1	✗
sudate prin WIG printr-o trecere pe două părți	55°	0.8 – 0.8	✗
		0.8 – 1	✗
		1 – 1	✗

Tabelul **Error! No text of specified style in document..3** – Analiza comportamentului semifabricatelor din S355

Tipul semifabricatelor	Forma piesei	Grosimea semifabricatelor [mm]	Comportarea în timpul prelucrării
nesudate	trunchi de con	0.9	✓
	trunchi de piramidă		✓
sudate prin MAG printr-o trecere pe o parte	trunchi de con	0.9 – 0.9	✗
	trunchi de piramidă		✗
sudate prin MAG printr-o trecere pe două părți	trunchi de con	0.9 – 0.9	✓
	trunchi de piramidă		✓

### Contribuții originale ale tezei de doctorat

Ținând cont de scopul tezelor de doctorat și anume de a aduce cunoștințe în plus în domeniul studiat, acestea sunt materializate prin contribuțiile originale ale tezei doctorale. Aceste contribuții originale au fost publicate pe parcursul elaborării tezei de doctorat în diferite jurnale indexate în baze de date internaționale cu factor de impact și în lucrări susținute la conferințe științifice.

În cazul acestei teze am adus următoarele contribuții originale:

- 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 evaluat parametrii tehnologic ai procesului privind tipurile de material care se pot prelucra, regimuri de deformare, scule și echipamente utilizate, elemente de fixare și tipuri de traiectorii utilizate;

- am realizat un studiu bibliografic al procesului de sudare a tablelor subțiri și am identificat principale metode de sudare a acestora;
- am realizat o clasificare riguroasă a proceselor de sudare prin topire;
- am identificat parametrii tehnologici optimi utilizați de alți autori la realizarea sudurii tablelor subțiri;
- am identificat și am analizat principalele probleme apărute în cazul deformării incrementale a tablelor subțiri;
- pe baza acestor considerente am conturat nișa de cercetare reprezentată de studiul comportării la deformare incrementală a pieselor sudate prin procese clasice de sudare prin topire și necesitate de a cerceta posibilitatea de deformare incrementală a tablelor sudate și în urma acestora 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 teoretic prin comparația acestora cu cele obținute experimental conform tendințelor actuale din industrie;
- am implementat o metodă de a simula semifabricatele sudate supuse procesului de deformare incrementală în vederea determinării posibilităților de deformare a acestora cu scopul de a reduce numărul încercărilor experimentale conform trendului din industria producătoare de autovehicule;
- am conceput și dezvoltat un algoritm în limbajul de programare Python în vederea automatizării extragerii datelor necesare determinării revenirii elastice a materialului și implementarea acestuia în interfața programului de analiză cu elemente finite ABAQUS;
- am realizat testul de întindere uniaxială pentru materialele studiate: aliajul de aluminiu AA1050 și oțelurile DC01 și S355 pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale acestora;
- am verificat rezistența cordonului de sudură prin testul de întindere uniaxială a epruvetelor sudate de diferite grosimi prin următoarele procese: TIG, WIG și MAG;
- am transformat curbele obținute din testul de întindere uniaxială în curbele reale pentru zona plastică a materialelor în vederea implementării acestora în software-ul de analiză cu elemente finite;
- am împărțit cercetările experimentale în patru etape: studiul comportamentului la deformare incrementală a tablelor nesudate, a tablelor sudate prin TIG, a tablelor sudate prin WIG și a tablelor sudate prin MAG;
- am utilizat metode statistice pentru planificarea experimentelor prin intermediul metodei Taguchi;
- am analizat graficele privind raportul semnal – zgomot și a interacțiunilor dintre combinațiile de grosimi ale tablelor și unghiurile pieselor cu formă de trunchi de con și piramidă;



- 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 a tablelor sudate, iar pentru realizarea procesului de sudare a tablelor subțiri am colaborat cu partenerii industriali utilizând echipamentele acestora;
- am pregătit și generat traiectoriile pe care poansonul le-a urmărit în timpul procesului și le-am adaptat pentru a putea fi folosit pe robotul industrial KUKA KR210;
- am pregătit toate sistemele de achiziție de date pentru traductorul de forță montat pe robotul industrial și pentru sistemul optic de măsurarea a deformațiilor ARAMIS;
- am analizat rezultatelor 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.

### **10.3 Direcții de cercetare viitoare**

În industria constructoare de autovehicule există tendința de a înlocui procesele clasice de deformare plastică (ambutisarea) cu procese noi care să permită o flexibilitate mai mare, cum ar fi deformarea incrementală. Acest proces are avantajul unei flexibilități ridicate cu un cost redus ceea ce se potrivește tendințelor actuale. În prezent, necesitatea utilizării tablelor sudate este tot mai mare mai ales în industria constructoare de autovehicule. Procesul de deformare incrementală este o alternativă mai eficientă din punct de vedere economic pentru producerea elementelor de întărire, suport și susținere din cadrul autovehiculelor, astfel tema tezei de doctorat se încadrează perfect în tendințele actuale urmărite de producătorii de autovehicule. Totuși, oricât de complex este studiul procesului de deformare incrementală a tablelor sudate prezentat în această teză de doctorat, bineînțeles există și direcții viitoare de cercetare pentru a îmbunătăți deformabilitatea tablelor sudate în cadrul acestui proces. Voi enumera în continuare câteva din direcțiile de cercetare viitoare:

- realizarea unui studiu amplu privind deformabilitatea tablelor sudate prin procedee de sudare clasice prin topire;
- implementarea unor modele constitutive în programe de analiză cu elemente finite pentru a descrie comportarea tablelor sudate cât mai precis;
- realizarea unui studiu care să analizeze influența tuturor factorilor tehnologici (diametrul poansonului, lubrifiția utilizată, pasul vertical, tipul traiectoriei, viteza de avans a poansonului și viteza de rotație în jurul axei proprii) asupra comportamentului tablelor sudate deformate incremental;
- dezvoltarea unor traiectorii complexe care să permită realizarea unor piese cu o înălțime și un unghi al peretelui piesei mai mare decât cele realizate în această teză de doctorat.



- [ABA, 16] – Abass, K. I., A study to comparing spherical, ellipse and flat forming tool profile effect in single point incremental forming by finite element analysis, U. P. B. Sci. Bull., Vol. 78, (2016).
- [ABD, 19] – Abd Ali, R., Chen, W., Jin, K., Bao, Y., Hussein, A.W., Formability and failure analyses of Al/SUS bilayer sheet in single point incremental forming, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 105, p. 2785-2798, (2019).
- [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, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 46, p. 969–982, (2010).
- [AFZ, 21] – Afzal, M. J., Israr, A., Akram, M. S., Muqet, A., Study on the single point incremental sheet forming of AISI 321 variable wall angle geometry, Research Square, (2021).
- [ALG, 14] – Al-Ghamdi, K. A., Hussain, G., Threshold tool-radius condition maximizing the formability in SPIF considering a variety of materials: Experimental and FE investigations, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 88, p. 82–94, (2014).
- [ALG, 15] – Al-Ghamdi, K., Hussain, G., The pillowing tendency of materials in single-point incremental forming: Experimental and finite element analyses, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., Vol. 229, Nr. 5, p. 744–753, (2015).
- [ALI, 17] – Alinaghian I., Ranjbar H., Beheshtizad M. A., Forming Limit Investigation of AA6061 Friction Stir Welded Blank in a Single Point Incremental Forming Process: RSM Approach, Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol. 70, p. 2303–2318, (2017).
- [ALL, 05 a] – 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, Vol. 219, Nr. 2, p. 239–244, (2005).
- [ALL, 05 b] – Allwood, J., Houghton, N., Jackson, K., The Design of an Incremental Sheet Forming Machine, Advanced Materials Research, Vol. 6-8, p. 471-478, (2005).

- [ALV, 14] – Alves de Sousa, R. J., Ferreira, J. A. F., Sá de Farias, J. B., Torrão, J. N. D., Afonso, D. G., Martins, M. A. B. E., SPIF – A: on the development of a new concept of forming machine, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 49, Nr. 5, p. 645 – 660, (2014).
- [AMB, 06 a] – Ambrogio, G., Filice, L., Micari, F., A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, p. 413–416, (2006).
- [AMB, 06 b] – Ambrogio G., Fratini L., Micari F., Incremental Forming of Friction Stir Welded Tailored Sheets, *Fatigue and Fracture, Heat Transfer, Internal Combustion Engines, Manufacturing, and Technology and Society*, Vol. 4, (2006).
- [AMB, 07] – Ambrogio, G., Cozza, V., Filice, L., Micari, F., An analytical model for improving precision in single point incremental forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 191, Nr. 1–3, p. 92–95, (2007).
- [AMB, 08] – Ambrogio, G., Filice, L., Manco, G. L., Warm incremental forming of magnesium alloy AZ31, *CIRP Ann*, Vol. 57, Nr. 1, p. 257–260, (2008).
- [AMB, 09 a] – Ambrogio, G., Napoli, L., Filice, L., A novel approach based on multiple back-drawing incremental forming to reduce geometry deviation, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, (2009).
- [AMB, 09 b] – Ambrogio, G., Bruschi, S., Ghiotti, A., Filice, L., Formability of AZ31 magnesium alloy in warm incremental forming process, *Int J Mater Form*, Vol. 2, (2009).
- [AMB, 13] – Ambrogio, G., Gagliardi, F., Filice, L., Robust Design of Incremental Sheet forming by Taguchi's Method, *Procedia CIRP*, Vol. 12, p. 270–275, (2013).
- [AMB, 19] – Ambrogio, G., Gagliardi, F., Serratore, G., Ramundo, E., Filice, L., SPIF of tailored sheets to optimize thickness distribution along the shaped wall, *Procedia Manufacturing*, Vol. 29, p. 80 – 87, (2019).
- [ARF, 13] – Arfa, H., Bahloul, R., BelHadjSalah, H., Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts, *Int J Mater Form*, Vol. 6, Nr. 4, p. 483–510, (2013).
- [ASG, 13] – Asghar, J., Reddy, N. V., Importance of tool configuration in incremental sheet metal forming of difficult to form materials using electro-plasticity, *Proceedings of the world congress on engineering*, vol. 3, p. 1734–1738, (2013).
- [AZE, 15] – Azevedo, N. G., Farias, J. S., Bastos, R. P., Teixeira, P., Davim, J. P., Alves de Sousa, R. J., Lubrication aspects during Single Point Incremental Forming for steel and

- aluminum materials, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 16, Nr. 3, p. 589–595, (2015).
- [AZO, 12] – Azaouzi, M., Lebaal, N., Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method, *Simul. Model. Pract. Theory*, Vol. 24, p. 49–58, (2012).
- [BAG, 15] – Bagudanch, I., Lozano-Sánchez, L. M., Puigpinós, L., Sabater, M., Elizalde, L. E., Elías-Zúñiga, A., Garcia-Romeu, M. L., Manufacturing of Polymeric Biocompatible Cranial Geometry by Single Point Incremental Forming, *Procedia Engineering*, Vol. 132, p. 267–273, (2015).
- [BAG, 17] – Bagudanch, I., Sabater, M., Garcia-Romeu, M. L., Single Point versus Two Point Incremental Forming of thermoplastic materials, *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 3, Nr. 1, p. 135 – 144, (2017).
- [BAG, 20] – Bagheri B., Abbasi M., Hamzeloo R., Comparison of different welding methods on mechanical properties and formability behaviors of tailor welded blanks (TWB) made from AA6061 alloys, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, (2020).
- [BAM, 09] – Bambach, M., Taleb Araghi, B., Hirt, G., Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming, *Prod. Eng. Res. Devel.*, Vol. 3, Nr. 2, p. 145–156, (2009).
- [BAR, 05] – Barlat, F., Constitutive Modeling for Sheet Metal Forming, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 778, (2005).
- [BÂR, 20/1] – Bârsan, A., Crenganiş, M., Popp, M. O., Rusu, G. P., Roboforming - Investigations regarding forming forces in SPIF process, *ACTA Universitatis Cibiniensis. Technical Series*, Vol. 72, p. 37 – 41, (2020).
- [BÂR, 20/2] – 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*, Vol. 5, p. 152 – 161, (2020).
- [BÂR, 21] – Bârsan, A., Popp, M. O., Rusu, G. P., Maroşan, A. I., Robot-based incremental sheet forming – the tool path planning, *IOP Conferences Series Materials Science and Engineering*, Vol. 1009, (2021).
- [BEH, 17] – Behera, A. K., Avles de Sousa, R., Ingarao, G., Oleksik, V., Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 27, p. 37 – 62, (2017).

- [BEN, 21] – Ben Said, L., Bouhamed, A., Wali, M., Ayadi, B., Betrouni, S. A., Hajji, H., Dammak, F., SPIF Manufacture of a Dome Part Made of AA1060-H14 Aluminum Alloy Using CNC Lathe Machine: Numerical and Experimental Investigations, *Arab J Sci Eng*, Vol. 46, p. 12207–12220, (2021).
- [BLA, 11] – Blaga, A., Bologa, O., Oleksik, V., Breaz, R., Influence of tool path on main strains, thickness reduction and forces in single point incremental forming, *Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol. 6, (2011).
- [BLA, 13] – Blaga, A., Oleksik, V., A study on the influence of the forming strategy on the main strains, thickness reduction, and forces in a single point incremental forming process, *Adv Mater Sci Eng*, (2013).
- [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, p. 317 – 320, (2005).
- [BOȘ, 17] – Boșneag A., Constantin M. A., Nițu E., Iordache M., Friction Stir Welding of three dissimilar aluminium alloy used in aeronautics industry, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 252, (2017).
- [BRA, 12] – Branker, K., Adams, D., Jeswiet, J., Initial analysis of cost, energy and carbon dioxide emissions in single point incremental forming – producing an aluminium hat, *Int. J. Sustain. Eng.*, Vol. 5, Nr. 3, p. 188–198, (2012).
- [BUF, 13] – Buffa, G., Campanella, D., Fratini, L., On the improvement of material formability in SPIF operation through tool stirring action, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 66, p. 1343-1351, (2013).
- [BUF, 20] – Buffa, G., Gucciardi, M., Fratini, L., Micari, F., Multi-directional vs. mono-directional multi-step strategies for single point incremental forming of non-axisymmetric components, *J. Manuf. Processes*, Vol. 55, p. 22-30, (2020).
- [CAM, 20] – Andrade-Campos A., Thuillier S., Martins J., Carlone P., Tucci F., Valente R., Paulo R. M., de Sousa, R. J. A., Integrated Design in Welding and Incremental Forming: Material Model Calibration for Friction Stir Welded Blanks, *Procedia Manufacturing*, Vol. 47, p. 429–434, (2020).
- [CAR, 21] – Carlone P., Thuillier S., Andrade-Campos A., de Sousa, R. J. A., Valente, R., Incremental forming of friction-stir welded aluminium blanks: an integrated approach, *International Journal of Material Forming*, Vol. 14, p. 1121–1137, (2021).

- [CEN, 14] – Centeno, G., Bagudanch, I., Martínez-Donaire, A. J., García-Romeu, M. L., Vallellano, C., Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming, *Materials & Design*, Vol. 63, p. 20-29, (2014).
- [CEN, 17] – Centeno, G., Martínez-Donaire, A. J., Bagudanch, I., Domingo, M. P., García-Romeu, M. L., Vallellano, C., Revisiting formability and failure of AlSi304 sheets in SPIF: Experimental approach and numerical validation, *Metals*, Vol. 7, Nr. 12, (2017).
- [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).
- [CON, 22] – Conte, R., Serratore, G., Ambrogio, G., Gagliardi, F., Numerical analyses of long fiber-reinforced polymeric sheets processed by Single Point Incremental Forming, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 123, p. 1203 - 1214, (2022).
- [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.*, Vol. 116, p. 1023-1039, (2021).
- [DAV, 15] – Davarpanah, M. A., Mirkouei, A., Yu, X., Malhotra, R., Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 222, p. 287 – 300, (2015).
- [DEV, 14] – Devarajan, N., Sivaswamy, G., Bhattacharya, R., Heck, D. P., Siddiq, M. A., Complex Incremental Sheet Forming Using back Die Support on Aluminium 2024, 5083 and 7075 Alloys, *Procedia Eng.*, Vol. 81, p. 2298–2304, (2014).
- [DIA, 17] – Diabb, J., Rodríguez, C. A, Mamidi, N., Sandoval, J. A., Taha-Tijerina, J., Martínez-Romero, O., Elías-Zúñiga, A., Study of lubrication and wear in single point incremental sheet forming (SPIF) process using vegetable oil nanolubricants, *Wear*, Vol. 376–377, p. 777-785, (2017).
- [DUF, 07] – Duflou, J. R., Callebaut, B., Verbert, J., De Baerdemaeker, H., Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement, *CIRP Annals*, Vol. 56, Nr. 1, p. 273 – 276, (2007).
- [DUR, 09] – Durante, M., Formisano, A., Langella, A., Capece Minutolo, F. M., The influence of tool rotation on an incremental forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209, p. 4621–4626, (2009).

- [DUR, 11] – Durante, M., Formisano, A., Langella, A. Observations on the influence of tool-sheet contact conditions on an incremental forming process, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, Nr. 6, p. 941–946, (2011).
- [EBR, 17] – Ebrahimzadeh P., Baseri H., Mirnia M. J., Formability of aluminum 5083 friction stir welded blank in two-point incremental forming process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 232, p. 267–280, (2017).
- [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.*, Vol. 10, p. 329–338, (2017).
- [ESM, 17] – Esmailpour, 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*, Vol. 133, p. 544 – 554, (2017).
- [ESM, 20] – Esmailpour, R., Kim, H., Park, T., Pourboghraat, F., Agha, A., Abu-Farha, F., Effect of hardening law and process parameters on finite element simulation of single point incremental forming (SPIF) of 7075 aluminum alloy sheet, *Mechanics and Industry*, Vol. 21, (2020).
- [EYC, 09] – Eyckens, P., Van Bael, A., Van Houtte, P., Marciniak-Kuczynski Type Modelling of the Effect of Through-Thickness Shear on the Forming Limits of Sheet Metal, *International Journal of Plasticity*, Vol. 25, Nr. 12, p. 2249-2268, (2009).
- [EYC, 10] – Eyckens, P., Formability in Incremental Sheet Forming: Generalization of the Marciniak-Kuczynski Model, Teză de doctorat, Universitatea Catolică Leuven, Leuven, (2010).
- [EYC, 11] – Eyckens, P., Belkassam, B., Henrard, C., Strain evolution in the single point incremental forming process: digital image correlation measurement and finite element prediction, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 4, Nr. 1, p. 55-71, (2011).
- [FAR, 14] – Faridmehr, I., Osman, M. H., Adnan, A. B., Nejad, A. F., Hodjati, R., Azimi, M. A., Correlation between Engineering Stress - Strain and True Stress - Strain Curve, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 2, p. 53 – 59, (2014).
- [FIG, 11] – Figueiredo, L., Ramalho, A., Oliveira, M. C., Menezes, L. F., Experimental Study of Friction in Sheet Metal Forming, *Wear*, Vol. 271, Nr. 9, p. 1651-1657, (2011).
- [FIL, 03] – Filice, L., Fratini, L., Micari, F., Analysis of Material Formability in Incremental Forming, *CIRP Ann*, Vol. 51, p. 199-202, (2002).

- [FIL, 06] – Filice, L., Ambrogio, G., Micari, F., On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring, *CIRP Ann Manuf Techn*, Vol. 55, p. 245-248, (2006).
- [FIO, 09] – Fiorentino, A., Ceretti, E., Attanasio, A., Mazzoni, L., Giardini, C., Analysis of forces, accuracy and formability in positive die sheet incremental forming, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, p. 805–808, (2009).
- [FIS, 35] – Fisher, R. A., *The design of experiments*, Oliver and Boyd, (1935).
- [FRA, 08] – Franzen, V., Kwiatkowski, L., Neves, J., Martins, P. A. F., Tekkaya, A., On the Capability of Single Point Incremental Forming for Manufacturing PVC Sheet Parts, Conference: ICTP-2008, 9th International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, Korea, (2008).
- [FRA, 09] – Franzen, V., Kwiatkowski, L., Martins, P. A. F., Tekkaya, A. E., Single point incremental forming of PVC, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, Nr.1, p. 462–469, (2009).
- [FU, 13] – Fu, Z., Mo, J., Han, F., Gong, P., Tool path correction algorithm for single-point incremental forming of sheet metal, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 64, p. 1239–1248, (2013).
- [GOL, 14] – Golabi, S., Khazaali, Determining frustum depth of 304 stainless steel plates with various diameters and thicknesses by incremental forming, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, Nr. 8, p. 3273–3278, (2014).
- [GOT, 11] – Göttmann, A., Diettrich, J., Bergweiler, G., Bambach, M., Hirt, G., Loosen, P., Poprawe, R., Laser-assisted asymmetric incremental sheet forming of titanium sheet metal parts, *Production Engineering*, Vol. 5, p. 263-271, (2011).
- [GUP, 18] – Gupta, P., Jeswiet, J., Effect of temperatures during forming in single point incremental forming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 95, p. 3693-3706, (2018).
- [HAM, 06] – Ham, M., Jeswiet, J., Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 55, Nr. 1, p. 241-244, (2006).
- [HAM, 07] – Ham, M., Jeswiet, J., Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming, *CIRP Annals*, Vol. 56, Nr. 1, p. 277-280, (2007).
- [HAN, 13] – Han, F., Mo, J., Qi, H., Long, R., Cui, X., Li, Z., Springback prediction for incremental sheet forming based on FEM-PSO technology, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 23, Nr. 4, p. 1061–1071, (2013).



- [HER, 19] – Hernández-Ávila, M., Lozano-Sánchez, L. M., Perales-Martínez, I. A., Elías-Zúñiga, A., Bagudanch, I., García-Romeu, M. L., Elizalde, L. E., Barrera, E. V., Single point incremental forming of bilayer sheets made of two different thermoplastics, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 136, Nr. 8, (2019).
- [HON, 16] – Honarpisheh, M., Abdolhoseini, M. J., Amini, S., Experimental and numerical investigation of the hot incremental forming of Ti–6Al–4V sheet using electrical current, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, p. 2027–2037, (2016).
- [HUS, 08 b] – Hussain, G., Gao, L., Zhang, Z. Y., Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 37, p. 920 – 926, (2008).
- [HUS, 08 b] – Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., Cui, Z., Pang, Y., Dar, N., Tool and Lubrication for Negative Incremental Forming of a Commercially Pure Titanium Sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, Nr. 1, p. 193-201, (2008).
- [HUS, 10] – Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., Dar, N. U., The formability of annealed and pre-aged AA-2024 sheets in single-point incremental forming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 46, p. 543-549, (2010).
- [HUS, 14] – Hussain, G., Al-Ghamdi, K. A., PEO coating as lubrication means for SPIF of titanium sheet: characteristics and performance, *Materials Research Innovations*, Vol. 18, p. 727 – 733, (2014).
- [HWA, 19] – Hwang, J. -K., Effects of diameter and preparation of round shaped tensile specimen on mechanical properties, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 763, (2019).
- [ILY, 19] – Ilyas, M., Hussain, G., Espinosa, C., Failure and strain gradient analyses in incremental forming using GTN model, *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, Vol. 2, p. 177-185, (2019).
- [ING, 14] – Ingarao, G., Vanhove, H., Kellens, K., Duflou, J. R., A comprehensive analysis of electric energy consumption of single point incremental forming processes, *J. Clean. Prod.*, Vol. 67, p. 173–186, (2014).
- [ISE, 01] – Iseki, H., Flexible and Incremental Bulging of Sheet Metal Using High-Speed Water Jet, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, Vol. 44, Nr. 2, p. 486 – 493, (2001).

- [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.*, Vol. 30, nr. 5, p. 2151–2161, (2016).
- [JAD, 04] – Jadhav, S., Basic investigations of the incremental sheet metal forming process on a CNC milling machine, *Lucrare de dizertație, Universitatea din Dortmund*, (2004).
- [JES, 05] – Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., Allwood, J., Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal, *CIRP Annals*, Vol. 54, Nr. 2, p. 88 – 114, (2005).
- [JEY, 15] – Jeyaprakash, N., Haile, A., Arunprasath, M., The Parameters and Equipments Used in TIG Welding: A Review, *The International Journal of Engineering And Science*, Vol. 4, p. 11 – 20, (2005).
- [JUR, 06] – Jurisevic, B., Kuzman, K., Junkar, M., Water Jetting Technology: An Alternative in Incremental Sheet Metal Forming, *Int. J. Adv. Manufact. Technol.*, Vol. 31, p. 18–23, (2006).
- [KAR, 20] – Karpagaraj A., Rajesh Kumar N., Thiyaneshwaran N., Siva Shanmugam N., Cheepu M., Sarala R., Experimental and numerical studies on gas tungsten arc welding of Ti–6Al–4V tailor-welded blank, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, (2020).
- [KAS, 12] – Kasolang, S., Ahmad, M. A., Bakar, M. A. A., Hamid, A. H. A., Specific wear rate of kenaf epoxy composite and oil palm empty fruit bunch (OPEFB) epoxy composite in dry sliding, *J. Teknol*, Vol. 58, p. 85–88, (2012).
- [KIM, 02] – Kim, Y. H, Park, J. J, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, p. 42–46, (2002).
- [KUM, 18] – Kumar, A, Gulati, V., Experimental investigations and optimization of forming force in incremental sheet forming, *Sādhanā*, Vol. 43, Nr. 10, p. 159, (2018).
- [KUM, 19] – Kumar, A., Gulati, V., Kumar, P., Singh, H., Forming force in incremental sheet forming: a comparative analysis of the state of art, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, (2019).
- [KUM, 21] – Kumar, G., Maji, K., Formability of AA7075 sheet in single point incremental forming, *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, Vol. 11, p. 40-54, (2021).

- [LE, 08] – Le, V. S., Ghiotti, A., Lucchetta, G., Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, Nr. 1, p. 1179–1182, (2008).
- [LEE, 02] – Lee, B. H., Keum, Y. K., Wagoner, R. H., Modeling of the Friction Caused by Lubrication and Surface Roughness in Sheet Metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, p. 60-63, (2002).
- [LEM, 16] – Lemopi Isidore, B. B., Hussain, G., Pourhassan Shamchi, S., Khan, W. A., Prediction and control of pillow defect in single point incremental forming using numerical simulations, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, p. 2151–2161, (2016).
- [LES, 67] – Leszak, E., Apparatus and process for incremental dieless forming, Nr. brevetului 3342051, (1967).
- [LI, 14] – Li, Y., Zhaobing, L., Lu, H., Daniel, W. J. T., Liu, S., Meehan, P. A., Erratum to: Efficient force prediction for incremental sheet forming and experimental validation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, p. 571 – 587, (2014).
- [LI, 15] – Li, J., Yang, F., Zhou, Z., Thickness distribution of multi-stage incremental forming with different forming stages and angle intervals, *J. Cent. South Univ.*, Vol. 22, nr. 3, p. 842–848, (2015).
- [LIU, 13] – Liu, Z., Li, Y., Meehan, P.A., Experimental investigation of mechanical properties, formability and force measurement for AA7075-O aluminum alloy sheets formed by incremental forming, *Int J Precis Eng Manuf*, Vol. 14, p. 1891–1899, (2013).
- [LOG, 20] – Loganathan, D., Satish Kumar, S., Ramadoss, R., Grey Relational Analysis-Based Optimisation of Input Parameters of Incremental Forming Process Applied to the AA6061 Alloy, *Trans. FAMENA*, Vol. 44, Nr. 1, p. 93–104, (2020).
- [LU, 14] – Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ou, H., Moser, N. H., Cao, J., Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 85, p. 14–29, (2014).
- [LU, 16] – Lu, B., Ou, H., Shi, S. Q., Long, H., Chen, J., Titanium based cranial reconstruction using incremental sheet forming, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 9, Nr. 3, p. 361–370, (2016).
- [LU, 17] – Lu, B., Bazeer, M. W. M., Cao, J. F., Ai, S., Chen, J., Ou, H., Long, H., A Study of Incremental Sheet Forming by Using Water Jet, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 91, p. 2291–2301, (2017).

- [MAJ, 19] – Maji K., Kumar S., Kumar G., Experimental study on the effects of incremental forming and friction stir welding on formability of AA5083 sheet, IOP Conference Series: Journal of Physics, Vol. 1240, (2019).
- [MAL, 75] – Mallows, C. L., Sloane, N. J. A., Two-graphs, switching classes and Euler graphs are equal in number, SIAM Journal of Applied Mathematics, Vol. 28, p. 876 – 880, (1975).
- [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, Vol. 136, p. 279 – 292, (2018).
- [MAQ, 21] – Maqbool, F., Targeted Generation and Suppression of the Deformation Mechanism and Residual Stresses in Incremental Sheet Forming to Improve the Geometric Accuracy, Teză de doctorat, BTU Cottbus – Senftenberg, Brandenburg, Germania, (2021).
- [MAR, 09] – Martins, P. A. F., Kwiatkowski, L., Franzen, V., Tekkaya, A. E., Kleiner, M., Single point incremental forming of polymers, CIRP Annals, Vol. 58, Nr. 1, p. 229-232, (2009).
- [MAR, 11] – Marabuto, S., Afonso, D., Ferreira, J.A.F., Melo, F. J., Martins, M., Alves de Sousa, R., Finding the Best Machine for SPIF Operations - a Brief Discussion, Key Engineering Materials, Vol. 473, p. 861-868, (2011).
- [MAR, 12] – Marques, T. A., Silva, M. B., Martins, P. A. F., On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 60, p. 75-86, (2012).
- [MAR, 19] – Marathe S. P., Raval, H. K., Numerical investigation on forming behavior of friction stir tailor welded blanks (FSTWBs) during single-point incremental forming (SPIF) process, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 41, (2019).
- [MAR, 20] – Marathe S., Raval H., Simulation study on single point incremental forming of tailor welded blanks, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, Vol. 12, p. 93-101, (2020).
- [MAR, 21] – Marathe S., Raval H., Investigation on effect of weld yield strength during single point incremental forming of tailor welded blanks, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, Vol. 12, p. 123-131, (2021).
- [MAT, 94] – Matsubara, S., Computer numerical control incremental forming, Journal Japan Society Technology of Plasticity, Vol. 35, p. 1258 – 1263, (1994).
- [MEI, 07] – Meier, H., Smukala, V., Dewald, O., Zhang, J., Two point incremental forming with two moving forming tools, Key Engineering Materials, Vol. 344, p. 599 – 605, (2007).

- [MEI, 11] – Meier, H., Magnus, C., Smukala, V., Impact of Superimposed Pressure on Dieless Incremental Sheet Metal Forming with Two Moving Tools, *CIRP Annals Manufact. Technol.*, Vol. 60, p. 327–330, (2011).
- [MER, 14] – Merklein M., Johannes M., Lechner M., Kuppert A., A review on tailored blanks-Production, applications and evaluation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, p. 151–164, (2014).
- [MEZ, 21] – Mezher, M. T., Barrak, O. S., Nama, S. A., Shakir, R. A., Predication of Forming Limit Diagram and Spring-back during SPIF process of AA1050 and DC04 Sheet Metals, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Vol. 44, Nr. 1, p. 337 – 345, (2021).
- [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*, Vol. 191, p. 390–395, (2007).
- [MIR, 17] – Mirnia, M. J., Shamsari, M., Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 244, p. 17-43, (2017).
- [MOD, 00] – Modenesi, P. J., Apolinário, E. R., Pereira, I. M., TIG welding with single-component fluxes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 99, p. 260–265, (2000).
- [MOH, 15] – Mohammadi, A., Vanhove, H., Van Bael, A., Wiese, D., Dufloy, J., Formability enhancement in incremental forming for an automotive aluminium alloy using laser assisted incremental forming, *Key Engineering Materials*, Vol. 639, p. 195 – 202, (2015).
- [MON, 17] – Montgomery, D. C., *Design and analysis of experiments*, Wiley, (2017).
- [MOR, 21] – More, S., Kumar, A., Narasimhan, K., Parameter identification of GTN damage model using response surface methodology for single point incremental sheet forming of IF steel, *Adv. Mater. Process. Technol.*, (2021).
- [MU, 12] – Mu, M., Zhou, X., Xiao, Q., Liang, J., Huo, X., Preparation and tribological properties of self-lubricating TiO<sub>2</sub>/graphite composite coating on Ti6Al4V alloy, *Applied Surface Science*, Vol. 258, Nr. 22, p. 8570-8576, (2012).
- [MUG, 17] – Mugendiran, V., Gnanavelbabu, A., Comparison of plastic strains on AA5052 by single point incremental forming process using digital image processing, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 31, Nr. 6, p. 2943–2949, (2017).

- [MUG, 18] – Mugendiran, V., Gnanavelbabu, A., Analysis of formability and twist angle in AA5052 alloy by single point incremental forming process, *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, Vol. 25, Nr. 2, p. 163–168, (2018).
- [NAJ, 20] – Najm, S. M., Paniti, I., Viharos, Z. J., Lubricants and affecting parameters on hardness in SPIF AA1100 Aluminium, 17th IMEKO TC 10 and EUROLAB Virtual Conference, (2020).
- [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*, Vol. 114, p. 2591–2615, (2021).
- [NAS, 21] – Nasulea, D., Oancea, G., Achieving Accuracy Improvements for Single-Point Incremental Forming Process Using a Circumferential Hammering Tool, *Metals (Basel)*, Vol. 11, nr. 3, p. 482, (2021).
- [OEH, 10] – Freeman, W. H., *A first course in design and analysis of experiments*, (2010).
- [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, p. 1187 – 1190, (2008).
- [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, (2009).
- [OLE, 18] – Oleksik, M., Comparative Study About Different Experimental Layouts Used on Single Point Incremental Forming Process, *Acta Universitatis Cibiniensis*, 70, p. 21 – 27, (2018).
- [OLE, 21] – Oleksik V., Dobrota 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*, Vol. 11, nr.198, (2021).
- [ORT, 19] – Ortiz, M., Penalva, M., Iriando, E., López de Lacalle, L. N., Investigation of Thermal-Related Effects in Hot SPIF of Ti-6Al-4V Alloy, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 7, p. 299-317, (2020).
- [PAL, 19] – Palumbo, G., Cusanno, A., Garcia Romeu, M. L., Bagudanch, I., Contessi Negrini, N., Villa, T., Farè, S., Single Point Incremental Forming and Electrospinning to produce biodegradable magnesium (AZ31) biomedical prostheses coated with porous PCL, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 7, p. 394 – 401, (2019).

- [PAN, 20] – Panahi liavoli R., Gorji H., Bakhshi-Jooybari M., Mirnia M. J., Investigation on Formability of Tailor-Welded Blanks in Incremental Forming, *International Journal of Engineering*, Vol. 33, Nr. 5, p. 906-915, (2020).
- [PAN, 21] – Pandre, S., Morchhale, A., Mahalle, G., Kotkunde, N., Suresh, K., Singh, S. K., Fracture limit analysis of DP590 steel using single point incremental forming: experimental approach, theoretical modeling and microstructural evolution, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, Vol. 21, (2021).
- [PET, 09 b] – Petek, A., Jurisevic, B., Kuzman, K., Junkar, M., Comparison of alternative approaches of single point incremental forming processes, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, p. 1810 – 1815, (2009).
- [PET, 09 b] – Petek, A., Kuzman, K., Kopac, J., Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming, *Archives of Materials science and Engineering*, Vol. 35, Nr. 2, p. 35–42, (2009).
- [PIC, 22] – Piccininni, A., Guglielmi, P., Cusanno, A., Pitton, M., Serratore, G., Ambrogio, G., Farè, S., Chiesa, R., Palumbo, G., The influence of the manufacturing process conditions on the in-vitro bio-performance of Titanium alloys, *Procedia CIRP*, Vol. 110, p. 111 – 116, (2022).
- [POP, 19/1] – Popp, M., Rusu, G., Racz, S. G., Popp, I. O., Force and thickness prediction with FEA of the cranial implants manufactured through SPIF, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 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 Cibiniensis Technical Series*, Vol. 71, p. 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 Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 968, (2020).
- [POP, 21] – Popp, M. O., Rusu, G. P., Racz, S. -G., Oleksik, V., Common defects of parts manufactured through single point incremental forming, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 343, (2021).
- [POP, 22/1] – Popp, M. O., Racz, S. G., Oleksik, M., Gîrjob, C., Biriş, C., Analysis of forming forces at SPIF using Taguchi method, *Newtech 2022 Booklet*, (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*, Vol. 74, p. 21 – 25, (2022).

- [POP, 23] – Popp, M, Studii și cercetări privind îmbunătățirea preciziei dimensionale și de formă a pieselor prelucrate prin deformare incrementală, Sibiu, România, Teză de doctorat, (2023).
- [RAC, 18] – Racz, S. G., Breaz, R. E., Tera, M., Gîrjob, C., Biriș, C., Chicea, A. L., Bologa, O., Incremental forming of titanium Ti6Al4V alloy for cranioplasty plates – decision-making process and tehnological approaches, *Metals*, Vol. 8, p. 626, (2018).
- [RAG, 10] – Raghavan, K. S., Garrison, W. M., An investigation of the relative effects of thickness and strength on the formability of steel sheet, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 527, p. 5565 – 5574, (2010).
- [RAJ, 18] – Raja, J. I. S., Arulmanikandan, A., Sathishkumar, G., Sivaganesan, S., Formability and thickness distribution analysis on aluminium alloy 5052 using single point incremental forming, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, Vol. 2018, p. 306-315, (2018).
- [RAT, 14] – Rattanachan K., Sirivedin K., Chungchoo C., Formability of Tailored Welded Blanks in Single Point Incremental Forming Process, *Advanced Materials Research*, Vol. 979, p. 339–342, (2014).
- [RAU, 01] – Raulea, L.V., Goijaerts, A. M., Govaert, L. E., Baaijens, F. P., Size effects in the processing of thin metal sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, p. 44 – 48, (2001).
- [RAU, 09] – Rauch, M., Hascoet, J. Y., Hamann, J. C., Plenel, Y., Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications, *Computer-Aided Design*, Vol. 41, p. 877 – 855, (2009).
- [RAU, 18] – Raut J., Marathe S., Raval H., Numerical Investigation on Single Point Incremental Forming (SPIF) of Tailor Welded Blanks (TWBs), *Proceedings of AIMTDR*, (2018).
- [RAV, 12] – Ravindra Reddy, P. V. R., Chandra Mohan Reddy, G., Radhakrishna Prasad, P., A review on Finite Element Simulations in Metal Forming, *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 2, p. 2326 – 2330, (2012).
- [RIA, 21] – Riaz, A. A., Hussain, G., Ullah, N., Wei, H., Alkahtani, M., Khan, M. N. An investigation on the effects of tool rotational speed and material temper on post-ISF tensile properties of Al2219 alloy, *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 10, p. 853–867, (2021).
- [ROM, 22] – Roman-Ramirez, L. A., Marco, J., Design of experiments applied to lithium-ion batteries: A literature review, *Applied Energy*, Vol. 320, (2022).



- [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,21] – Rosa-Sainz, A., Centeno, G., Silva, M. B., Vallellano, C. Experimental failure analysis in polycarbonate sheet deformed by spif, Journal of Manufacturing Processes, Vol, 64, p. 1153 – 1168, (2021).
- [ROS, 22] – Rosca, N., Trzepiecinski, 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).
- [RUB, 20] – Rubino F., Esperto V., Ferreira Paulo R. M., Tucci F., Carlone P., Integrated Manufacturing of AA6082 by Friction Stir Welding and Incremental Forming: Strain Analysis of Deformed Samples, Procedia Manufacturing, Vol. 47, p. 440–444, (2020).
- [RUS, 19] – Rusu, G. P., Popp, M. O., Oleksik, M., Rodean, C., Numerical simulation of material failure in single point incremental forming process, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 564, (2019).
- [RUS, 21] – Rusu, G. P., Bârsan, A., Popp, M. O., Maroşan, A., Comparison between aluminum alloys behavior in incremental sheet metal forming process of frustum pyramid shaped parts, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., Vol. 1009, (2021).
- [RUS, 22 a] – Rusu, G. P., Oleksik, V. Ş., Breaz, R. E., Dobrotă, D., Popp, I. O., Analysis of the metal sheets formability at single point incremental forming, MATEC Web of Conferences, Vol. 368, (2022).
- [RUS, 22 b] – Rusu, G. P., Popp, M. O., Chicea, A. L., Popp, I. O., Determining the forming limit diagram by experimental methods, ACTA Universitatis Cibiensis – Technical Series, Vol. 74, (2022).
- [SAL, 16] – Salem, E., Shin, J., Nath, M., Banu, M., Taub, A. I., Investigation of Thickness Variation in Single Point Incremental Forming, Procedia Manuf., Vol. 5, p. 828–837, (2016).
- [SBA, 20] – Sbayti, M., Bahloul, R., Belhadjsalah, H., Efficiency of optimization algorithms on the adjustment of process parameters for geometric accuracy enhancement of denture

- plate in single point incremental sheet forming, *Neural Comput. Appl.*, Vol. 32, Nr. 13, p. 8829–8846, (2020).
- [SCH, 92] – Schedin, E., Sheet metal forming, *Mater. Des.*, Vol. 13, p. 366-367, (1992).
- [SER, 19] – Serratore, G., Gagliardi, F., Filice, L., Benvato, R., Ambrogio G., 3D numerical analyses of SPIF performed on tailored sheets to control their thinning, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2113, (2019).
- [SHA, 13] – Shanmuganathan, S. P., Senthil Kumar, V. S., Metallurgical analysis and finite element modelling for thinning characteristics of profile forming on circular cup, *Materials and Design*, Vol. 44, p. 208–215, (2013).
- [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*, Vol. 141, nr. 4, (2019).
- [SIL, 08] – Silva, M. B., Skjoedt, M., Atkins, A. G., Bay, N., Martins, P. A. F., Single Point Incremental Forming and Formability/Failure Diagrams, *J. Strain Anal. Eng. Des.*, Vol. 43, p. 15 – 36, (2008).
- [SIL, 09] – Silva M. B., Skjoedt M., Vilaça P., Bay N., Martins P. A. F., Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, p. 811–820, (2009).
- [SIL, 10] – Silva, M. B., Alves, L. M., Martins, P. A. F., Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation, *European Journal of Mechanics, A/Solids*, Vol. 29, Nr. 4, p. 557–566, (2010).
- [SIL, 11] – Silva, M. B., Nielsen, P.S., Bay, N., Martins, P. A. F. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 56, p. 893 – 903, (2011).
- [SIL, 14] – Silva, M. B., Martins, P. A. F., *Comprehensive Materials Processing*, 3.02 – Incremental Sheet Forming, Elsevier, p. 7 – 26, (2014).
- [SKJ, 07] – Skjoedt, M., Hancock, M. H., Bay, N., Creating 3D forming, *Key Eng Mater*, Vol. 344, p. 583 – 590, (2007).
- [SMI, 13] – Smith, J., Malhotra, R., Liu, W., Cao, J., Deformation mechanics in single-point and accumulative double-sided incremental forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69, p. 1185 – 1201, (2013).

- [SOB, 20] – Sobotka, J., Solfronk, P., Korecek, D., Pilar, P., Influence of testing methodology on position of the forming limit curve, METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings, p. 234 – 239, (2020).
- [STR, 05] – Strano, M., Technological representation of forming limits for negative incremental forming of thin aluminum sheets, Journal of Manufacturing Processes, Vol. 7, Nr. 2, p. 122–129, (2005).
- [SUN, 21] – Sun, Y., Lu, Z., Li, C., Wang, R., Zhai, W., Study on the Springback Effect and Surface Property for Ultrasonic-Assisted Incremental Sheet Forming of Aluminum Alloy, Symmetry (Basel), Vol. 13, nr. 7, p. 1217, (2021).
- [SUR, 13] – Suresh, K., Khan, A., Regalla, S. P., Tool path definition for numerical simulation of single point incremental forming, Proc Eng, Vol. 64, p. 536–545, (2013).
- [SYA, 13] – Syahrullail, S., Kamitani, S., Shakirin, A., Performance of vegetable oil as lubricant in extreme pressure condition, Procedia Engineering, Vol. 68., p. 172-177, (2013).
- [SZE, 07] – Szekeres, A., Ham, M., Jeswiet, J., Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor, Key Engineering Materials, Vol. 344, p. 551-558, (2007).
- [TAL, 11] – Taleb Araghi, B., Göttmann, A., Bergweiler, G., Saeed-Akbari, A., Bültmann, J., Zettler, J., Bambach, M., Hirt, G., Investigation on incremental sheet forming combined with laser heating and stretch forming for the production of lightweight structures, Key Engineering Materials, Vol. 473, p. 919 – 928, (2011).
- [TAY, 19] – Tayebi P., Fazli A., Asadi P., Soltanpour M., Formability analysis of dissimilar friction stir welded AA 6061 and AA 5083 blanks by SPIF process, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, (2019).
- [TER, 14] – Tera, M., Breaz, R., Bologa, O., Racz, G. S., Using a CNC milling machine for incremental forming, Proceedings in Manufacturing Systems, Vol. 6, Nr., 2, p. 99 – 104, (2014).
- [THI, 12] – Thibaud, S., Hmida, R. B., Richard, F., Malécot, P., A fully parametric toolbox for the simulation of single point incremental sheet forming process: numerical feasibility and experimental validation, Simul Model Pract Theory, Vol. 29, p. 32–43, (2012).
- [TOA, 10] – Toan, N. D., Gee, P.J., Suk, K.Y., Combined kinematic/isotropic hardening behavior study for magnesium alloy sheets to predict ductile fracture of rotational incremental forming, International Journal of Material Forming, Vol. 3, p. 939–942, (2010).
- [TRZ, 21] – Trzepieciński, T., Kubit, A., Dzierwa, A., Krasowski, B., Jurczak, W., Surface Finish Analysis in Single Point Incremental Sheet Forming of Rib-Stiffened 2024-T3 and 7075-T6 Alclad Aluminium Alloy Panels, Materials, Vol. 14, Nr. 7, p. 1640, (2021).

- [TUC, 19] – Tucci, F., Valente, R. A. F., de Sousa, R. J. A., Rubino, F., Carlone, P., A finite element approach to the integrated modelling of the incremental forming of friction stir welded sheets, Proceedings of the 22nd International Esaform Conference on material forming, (2019).
- [VAH, 19] – Vahdani, M., Mirnia, M. J., Bakhshi-Jooybari, M., Gorji, H., Electric hot incremental sheet forming of Ti-6Al-4V titanium, AA6061 aluminum, and DC01 steel sheets, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 103, Nr. 1–4, p. 1199–1209, (2019).
- [VAN, 13] – Van Sy, L., Thanh Nam, N., Hot incremental forming of magnesium and aluminum alloy sheets by using direct heating system, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., Vol. 227, Nr. 8, p. 1099–1110, (2013).
- [VAN, 16] – Vanhove, H., Mohammadi, A., Duflou, J. R., Incremental forming of aluminium alloys in cryogenic environment, AIP Conference Proceedings, Vol. 1769, (2016).
- [VAN, 17] – Vanhove, H., Carette, Y., Vancleef, S., Duflou, J. R., Production of thin Shell Clavicle Implants through Single Point Incremental Forming, Procedia Eng., Vol. 183, p. 174–179, (2017).
- [VAN, 19] – Vanhove, H., Carette, Y., Duflou, J., An explorative study on, the influence of an elliptical tool on incremental forming, Procedia Manufacturing, Vol. 29, p. 74–79, (2019).
- [VER, 10] – Verbert, J., Computer Aided Process Planning for Rapid Prototyping With Incremental Sheet Forming Techniques, Teză de doctorat, Universitatea Catolică Leuven, Leuven, (2010).
- [WAN, 05] – Wan Nik, W. B., Ani, F.N., Masjuki, H. H., Eng Giap, S. G., Rheology of bio-edible Oils according to several rheology models and its potential as hydraulic fluid, Ind.Crop. Prod., Vol. 22, p. 249–255, (2005).
- [WAN, 08] – Wang, Y., Huang, Y., Cao, J., Reddy, N. V., Experimental Study on a New Method of Double Side Incremental Forming, ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Vol. 1, p. 601–607, Evanston, Illionois, SUA, (2008).
- [WEI, 19] – Wei, H., Zhou, L., Heidarshenas, B., Ashraf, I. K., Han, C., Investigation on the influence of springback on precision of symmetric-cone-like parts in sheet metal incremental forming process, Int. J. Light. Mater. Manuf., Vol. 2, nr. 2, p. 140–145, (2019).
- [WU, 16] – Wu, S. H., Song, N. N., Andrade Pires, F. M., A comparative study of failure with incremental forming, Journal of Physics, Vol. 734, (2016).

- [WU, 21] – Wu, R., Liu, X., Li, M., Chen, J., Investigations on deformation mechanism of double-sided incremental sheet forming with synchronous thermomechanical steel-aluminum alloy bonding, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 294, (2021).
- [ZHA, 08] – Zhao, Y. H., Guo, Y. Z., Wei, Q., Dangelewicz, A. M., Xu, C., Zhu, Y. T., Langdon, T. G., Zhou, Y. Z., Lavernia, E. J., Influence of specimen dimensions on the tensile behavior of ultrafine-grained Cu, *Scripta Materialia*, Vol. 59, p. 627 – 630, (2008).
- [ZHA, 10] – Zhang, Q., Xiao, F., Guo, H., Li, C., Gao, L., Guo, X., Han, W., Bondarev, A. B., Warm Negative Incremental Forming of Magnesium Alloy AZ31 Sheet: New Lubricating Method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, Nr. 2, p. 323-329, (2010).
- [ZHA, 15] – Zhang, Y., Li, P., Wang, Q., Yao, Z., Xu, H., Based on abaqus single point incremental forming numerical analysis, *Jixie Qiangdu/Journal of Mechanical Strength*, Vol. 37, nr. 1, p. 99 – 103, (2015).
- [ZHA, 17] – Zhang, H., Lu, B., Chen, J., Feng, S., Li, Z., Long, H., Thickness control in a new flexible hybrid incremental sheet forming process, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, Vol. 231, nr. 5, p. 779–791, (2017).
- [ZHA, 21] – Zhang, L., Wu, C., Sedaghat, H., Ultrasonic vibration–assisted incremental sheet metal forming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 114, p. 3311–3323, (2021).
- [ZHU, 21] – Zhu, H., Cheng, G., Jung, D., Toolpath Planning and Generation for Multi-Stage Incremental Forming Based on Stretching Angle, *Materials (Basel)*, Vol. 14, nr. 17, p. 4818, (2021).
- [ZIR, 10] – Ziran, X., Gao, L., Hussain, G., Cui, Z., The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 46, p. 1113-1118, (2010).
- [1] – Sudarea metalelor și procedee conexe, note de curs, <https://sim.utcluj.ro/stm/download/Sudura/Curs%20Sudura.pdf>.
- [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).