



Școala doctorală de Științe Inginerești și Matematică

Domeniul de doctorat: Inginerie Industrială

TEZĂ DE DOCTORAT - REZUMAT

DEFORMAREA INCREMENTALĂ A MATERIALELOR POLIMERICE

Doctorand:

Ing. NICOLAE ALEXANDRU ROȘCA

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. VALENTIN OLEKSIK

CUPRINS

1. INTRODUCERE	1
2. DEFORMAREA INCREMENTALĂ	3
2.1. Procesul de deformare incrementală	3
2.1.1. Definiția procesului de deformare incrementală	3
2.1.2. Clasificarea proceselor de deformare incrementală	5
2.1.3. Scurt istoric	7
2.2. Materiale folosite la deformarea incrementală	12
2.2.1. Aliaje de titan	12
2.2.2. Aliaje de magneziu	12
2.3. Echipamente utilizate la deformarea incrementală	13
2.4. Mecanismul procesului de deformare la deformarea incrementală	19
2.4.1. Mecanismul de deformare și deformabilitatea materialului	19
2.4.2. Forțele la deformarea incrementală într-un singur punct	21
2.4.3. Trajectoriile utilizate în procesul de deformare incrementală	23
2.4.4. Variația grosimii pereților pieselor obținute prin procedeul de deformare incrementală	26
2.4.5. Calitatea și precizia dimensională a pieselor la procesul de deformare incrementală	27
2.4.6. Metode pentru îmbunătățirea procesului	28
2.5. Modelarea și simularea numerică a procesului de deformare incrementală	30
2.6. Aplicații	31
2.6.1. Implanturi medicale	32
2.6.2. Piese din industria automotive, transporturi și domeniul aerospațial	34
2.7. Sustenabilitatea procesului	35
2.8. Concluzii	35
3. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL DEFORMĂRII INCREMENTALE A MATERIALELOR POLIMERICE	37
3.1. Introducere	37
3.2. Istoria polimerilor	37

3.3. Polimeri. Proprietăți și clasificare	38
3.4. Istoric al cercetărilor privind deformarea materialelor polimerice	41
3.5. Materiale polimerice studiate în cadrul procesului de deformare incrementală	45
3.6. Variante ale procesului de deformare incrementală	48
3.7. Parametrii de proces	52
3.7.1. Unghiul peretelui piesei deformate.....	52
3.7.2. Grosimea inițială a semifabricatului.....	53
3.7.3. Diametrul poansonului	53
3.7.4. Temperatura de deformare	54
3.7.5. Pasul de deformare.....	54
3.7.6. Viteza de rotație a poansonului.....	55
3.8. Defecte la deformare.....	55
3.9. Mecanismul de deformare.....	58
3.10. Deformabilitatea materialului la deformarea incrementală a materialelor polimerice	60
3.11. Forțele din procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice	62
3.12. Revenirea elastică.....	64
3.13. Consumul de energie și costuri la deformarea incrementală a materialelor polimerice	66
3.14. Deformarea incrementală a polimerilor și a metalelor	68
3.15. Aplicații ale deformării incrementale a materialelor polimerice.....	69
3.16. Concluzii.....	71
3.17. Obiectivele tezei de doctorat.....	72
4. SIMULAREA PRIN METODA ELEMENTULUI FINIT A PROCESULUI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ A MATERIALELOR POLIMERICE.....	75
4.1. Tehnici de simulare prin metoda elementului finit pentru procedeele de deformare plastică la rece	75
4.2. Pregătirea analizelor pentru simularea procesului de deformare incrementală a materialelor polimerice	80
4.3. Concluzii privind simularea procesului de deformare incrementală a materialelor polimerice.....	99

5. STABILIREA FACTORILOR DE INFLUENȚĂ LA CERCETĂRILE EXPERIMENTALE. MAȘINILE, STANDURILE ȘI ECHIPAMENTELE DE CERCETARE UTILIZATE.....	101
5.1. Metodologia cercetării experimentale privind comportarea la deformare incrementală a materialelor polimerice	101
5.2. Factorii de influență la deformarea incrementală a materialelor polimerice	103
5.2.1. Factori dependenți de geometria piesei	103
5.2.2. Factori dependenți de materialul polimeric folosit, precum și de forma și dimensiunile acestuia.....	104
5.2.3. Factori dependenți de parametri tehnologici folosiți la deformare	105
5.2.4. Factori dependenți de utilajul folosit.....	106
5.2.5. Concluzii	107
5.3. Mașini și standuri utilizate la evaluarea comportării la deformare a materialelor polimerice.....	108
5.3.1. Mașina de încercare la întindere și compresiune uniaxială Instron 5587	108
5.3.2. Standul experimental pentru încercarea la întindere biaxială.....	110
5.3.3. Robotul Kuka KR210-2	111
5.3.4. Sistemul de măsurare al forțelor la procedeul de deformare incrementală.....	112
5.3.5. Echipamentul utilizat la măsurarea deformațiilor și a subțierii.....	118
5.3.6. Echipamentul utilizat la măsurarea temperaturii.....	120
5.3.7. Echipamente utilizate la măsurarea preciziei pieselor prelucrate..	121
6. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DEFORMABILITATEA MATERIALELOR POLIMERICE.....	122
6.1. Încercarea la tracțiune a materialelor polimerice	122
6.2. Încercarea la întindere biaxială a materialelor polimerice	135
7. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DEFORMAREA INCREMENTALĂ A MATERIALELOR POLIMERICE	148
7.1. Cercetări experimentale pentru determinarea forțelor în procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice	148
7.2. Cercetări experimentale pentru determinarea deformațiilor și a subțierii în procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice	179

7.3. Cercetări experimentale pentru evaluarea temperaturii degajate în timpul procesului de deformare incrementală a materialelor polimerice.....	233
7.4. Cercetări experimentale pentru evaluarea preciziei dimensionale în procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice	244
7.4.1. Precizia dimensiunilor secțiunii transversale pentru piesele din materiale polimerice deformate incremental.....	244
7.4.2. Precizia grosimii pieselor din material polimeric deformate incremental	250
8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE.....	257
8.1. Concluziile tezei de doctorat	257
8.2. Contribuții originale ale tezei de doctorat	261
8.3. Direcții de cercetare viitoare.....	262
Bibliografie	264

CUVINTE CHEIE: deformare incrementală, materiale polimerice, analiza comparativă, metoda elementului finit, model de material, factor de influență, diametru poanson, pas de deformare, unghi perete, KUKA KR210-2, sistem optic de măsurare Aramis, forțe de deformare, deformații, subțiere, temperatură degajată, precizie



Evoluția tehnologiei din ultimii ani a determinat ca materialele polimerice să fie tot mai utilizate în domenii ca automotive, industria aerospațială sau industria medicală, de unde și necesitatea utilizării unor tehnologii și procedee de prelucrare cu costuri mai reduse și prietenoase cu mediul înconjurător. Unul dintre aceste procedee este procedeul de deformare incrementală, procedeu relativ nou în comparație cu procedeele de deformare tradiționale, precum ambutisarea sau fasonarea.

În ultimii ani, a existat un interes crescând pentru deformarea incrementală a materialelor polimerice datorită răspândirii acestora în industrie și datorită necesității crescânde în realizarea de prototipuri și unicate, precum și de piese în producție de serie mică. Industria automotive este una dintre industriile care urmărește de ani buni să înlocuiască materialele metalice cu materiale mai ușoare, deoarece se caută de multă vreme să se reducă masa autovehiculului și astfel să se mărească autonomia acestuia. De asemenea, datorită biocompatibilității unor materiale polimerice cu corpul uman, s-au realizat prin deformare incrementală diverse implanturi din materiale polimerice care să înlocuiască implanturile provenite de la același corp uman sau de la cadavre, minimizând astfel gradul de respingere și riscul de infecție.

Cu toate că studiile privind comportarea materialelor polimerice la prelucrarea prin deformare plastică la rece au fost începute la mijlocul anilor 1960, studiile privind comportarea acestora la deformarea incrementală au început mult mai târziu, doar în anii 2008 - 2009. Cu toată apariția relativ recentă a procedeului de deformare incrementală, acesta este implementat deocamdată doar în producția de serie mică și unicate pentru motive care țin de timpii îndelungați de prelucrare.

Majoritatea studiilor legate de comportarea la deformare incrementală au fost orientate pe studiul influenței unui singur parametru (forțe, deformabilitate, precizia pieselor obținute, etc.) și nu există până în prezent studii care să înglobeze influența tuturor parametrilor.

Totodată există puține studii care să analizeze deformațiile care apar la procedeul de deformare incrementală a materialelor polimerice, majoritatea acestora fiind bazate doar pe simularea numerică folosind metoda elementului finit.

De asemenea, există puține studii care să analizeze comparativ comportarea mai multor materiale polimerice la procedeul de deformare incrementală.

Din considerentele prezentate mai sus s-a născut ideea prezentei teze de doctorat care și-a propus să studieze și să analizeze comparativ comportamentul la procedeul de deformare incrementală a trei materiale polimerice, și anume poliamida, polietilena și politetrafluoretilena. Inițial, am dorit să includ în studiu și polioximetilena, dar acest material a prezentat o alungire la rupere scăzută la temperatura mediului ambiant,

făcând astfel imposibilă derularea experimentelor și analizarea acestora folosind acest material polimeric.

Astfel, în prezenta teză de doctorat, mi-am propus investigarea comportamentului la deformarea incrementală atât din prisma materialului semifabricatului, cât și din prisma factorilor de influență care țin de piesa ce se dorește a fi obținută, precum și a factorilor de influență care țin de tehnologia de deformare.

Realizând cea mai mare parte a cercetărilor teoretice și experimentale în cadrul Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice a Facultății de Inginerie din Sibiu, am reușit să concretizez un studiu comprehensiv al procedurii de deformare plastică incrementală aplicat materialelor polimerice la temperatura mediului ambiant. Aceste investigații au fost axate pe determinarea forțelor de deformare, determinarea deformațiilor și subțierii materialelor polimerice, determinarea temperaturilor degajate ca urmare a procesului de auto încălzire și pe determinarea preciziei pieselor obținute prin procedeul de deformare incrementală.

Cercetările teoretice și experimentale s-au concretizat prin publicarea a opt lucrări științifice publicate atât în reviste și volume de conferințe cotate sau indexate Clarivate Analytics, cât și în reviste indexate în baze de date internaționale [159-166].

Nu în ultimul rând, lucrarea de față deschide calea cercetărilor privind comportamentul altor materiale polimerice la procedeul de deformare incrementală, studierea comportamentului materialelor polimerice la procedeul de deformare incrementală cu încălzirea locală a materialului sau a poansonului, sau utilizarea unei mașini cu comandă numerică în locul robotului industrial pentru creșterea rigidității și implicit a preciziei pieselor obținute.

Capitolul 2 prezintă evoluția și stadiul actual al cercetărilor din literatura de specialitate asupra procedurii de deformare incrementală, de unde s-au desprins următoarele posibile direcții de cercetare:

- Simularea numerică folosind metoda elementului finit a procedurii de deformare incrementală
- Cercetări experimentale privind comportarea la deformare a materialelor polimerice
- Îmbunătățirea comportării materialelor polimerice la deformarea incrementală
- Studiul influenței diferiților parametri de proces (diametrul poansonului și pasul pe direcție verticală) asupra procesului de deformare incrementală;
- Studiul influenței diferiților parametri geometrici ai pieselor deformate incremental (unghiul peretelui piesei și grosimea inițială a semifabricatului) asupra procesului de deformare incrementală.

Deoarece un procent semnificativ din materiile prime utilizate în industrie este reprezentat de materialele polimerice, am luat decizia să analizăm separat evoluția cercetărilor asupra materialelor polimerice prin procedeul de deformare incrementală într-un capitol separat și anume capitolul 3.

În urma cercetării literaturii de specialitate privind procedeul de deformare incrementală a materialelor polimerice, au rezultat următoarele aspecte:

- Deformarea polimerilor are loc pe baza unei solicitări combinate de întindere plană și întindere biaxială, depinzând de contactul pe circumferință dintre poanson și semifabricat;
- Limitările procedurii de deformare incrementală a materialelor polimerice sunt date de apariția defectelor și a ruperii materialului;
- Deformabilitatea polimerilor este mai mare decât în cazul metalelor, unghiul maxim al peretelui piesei situându-se la valori între 60° și 90° , mult mai mare decât în cazul metalelor și aliajelor metalice;
- Forțele de deformare variază pe o plajă largă, între 190N și 1500N, în funcție de tipul materialului deformat și de parametrii de proces;
- Viteza de avans este un parametru care nu influențează forțele de deformare în cazul deformării incrementale a materialelor polimerice;
- Parametrii de proces influențează diferit forțele de deformare, funcție de materialul utilizat, la momentul de față neexistând o concordanță privind influența acestora asupra forțelor de deformare;
- Cele mai mari avantaje ale procesului de deformare incrementală în cazul polimerilor sunt versatilitatea, forțele scăzute de deformare și capacitatea ridicată de deformare (deformabilitatea);
- Revenirea elastică reprezintă cea mai mare problemă în deformarea incrementală a polimerilor conducând la abateri dimensionale și de formă foarte mari;
- Viteza mică de deformare constituie un alt dezavantaj în deformarea incrementală a polimerilor dar și a materialelor metalice, obstacol ce poate fi depășit prin realizarea unor noi echipamente de deformare incrementală care să permită viteze mari sau prin creșterea pasului de deformare. Totuși, creșterea pasului de deformare conduce la utilizarea unui diametru mai mare al sculei care poate conduce la scăderea calității suprafeței dar și la prevenirea apariției premature a defectelor.

Toate cele prezentate mai sus indică faptul că este necesar ca în viitor să se realizeze și mai multe cercetări asupra deformării incrementale a polimerilor cu scopul de a face acest proces viabil în domeniul industrial.

Pe baza studiilor bibliografice prezentate în capitolele 2 și 3 ale tezei mele de doctorat am luat, împreună cu conducătorul de doctorat, decizia de a-mi axa cercetările teoretice și experimentale pe deformarea incrementală la temperatura mediului ambiant a patru tipuri de materiale polimerice: poliamida 6E (PA 6E), polietilena de înaltă densitate (PEHD 1000), politetrafluoretilena (PTFE) și polioximetilena (POM-C). Dintre acestea, pe parcursul desfășurării cercetărilor experimentale am eliminat unul dintre materiale (polioximetilena) datorită deformabilității scăzute a acesteia la temperatura mediului ambiant. Ca parametri de intrare pentru cercetările derulate au fost selectați: tipul materialului, grosimea acestuia, unghiul peretelui piesei prelucrate, pasul de deformare și diametrul poansonului. Decizia referitoare la selecția cercetărilor

din prezenta teză de doctorat a fost luată ținând cont de următoarele:

- procedeul de deformare incrementală nu mai este un procedeu cu un grad foarte ridicat de nouitate, aplicabilitatea acestuia în diferite ramuri industriale fiind deja bine implementată în producția de serie mică și unicat;
- materialele cu densitate redusă sunt din ce în ce mai folosite în industria automotive, industria aeronautică și aerospațială, industria realizării implanturilor medicale ș.a.m.d. datorită faptului că sunt ușoare dar prezintă o rezistență mecanică relativ bună în utilizare pentru greutatea pe care o dețin;
- cu toate că există studii legate de comportarea la deformare incrementală a diferitelor materiale polimerice, acestea au fost studii orientate strict către un anumit parametru de ieșire pentru procesul de deformare incrementală (forțe, deformabilitate, precizia piesei obținute, etc.), neexistând un studiu de ansamblu care să le înglobeze pe toate;
- sunt extrem de puține date care să studieze deformațiile care apar la procedeul de deformare incrementală a materialelor polimerice. Majoritatea acestor studii sunt bazate doar pe simularea numerică folosind metoda elementului finit, fapt pentru care am dorit să realizez un studiu care să permită compararea rezultatelor obținute numeric cu cele obținute experimental;
- studiile care există au luat, în general, în considerare, doar 2-3 parametri de intrare ai procesului de deformare incrementală iar eu, prin utilizarea ca metodă de proiectare a experimentului, a metodei Taguchi, am reușit să iau în considerare și alți patru parametri, fără ca numărul de experimente să crească foarte mult. Așa cum s-a putut constata în literatura de specialitate există studii cu rezultate contradictorii, datorită faptului că autorii lor nu au putut lua în considerare mai mulți factori și interacțiunile dintre aceștia;
- în literatura de specialitate există foarte puține studii comparative legate de comportarea la deformare incrementală a diferitelor tipuri de materiale polimerice, fapt pentru care mi-am dorit să realizez un astfel de studiu;
- am eliminat din parametrii de intrare obișnuiți pentru deformarea incrementală viteza de rotație a poansonului deoarece, spre deosebire de materialele metalice, aceasta nu influențează semnificativ procesul la materialele polimerice.

Având în vedere cele prezentate anterior, și pe baza cercetărilor bibliografice prezentate în cele două capitole aferente stadiului actual în domeniu am trasat obiectivele tezei de doctorat după cum urmează:

1. Analiza și prelucrarea informațiilor cuprinse în stadiul actual al prelucrărilor prin deformare incrementală a materialelor polimerice cu scopul identificării: tipurilor de

materiale care se pot prelucra la temperatura mediului ambiant, formei geometrice și a dimensiunilor pieselor din materiale polimerice care se pot prelucra și parametrilor tehnologici care pot fi luați în analiză în cercetările experimentale derulate pe parcursul tezei de doctorat;

2. Alegerea variantei optime de descriere a materialului polimeric, pe baza comportării acestuia la încercarea la întindere uniaxială, pentru utilizarea în analizele de simulare numerică;
3. Conceperea și rularea unor analize dinamice explicite, parametrizate care să simuleze procedeul de deformare incrementală a materialelor polimerice;
4. Elaborarea unui studiu care conține principalii parametri de ieșire în cazul prelucrării prin deformare incrementală a materialelor polimerice dar și principalii factori de influență ai acestora;
5. Derularea de cercetări experimentale legate de comportarea mecanică în domeniul elasto-plastic a materialelor polimerice analizate;
6. Efectuarea de cercetări experimentale legate de determinarea forțelor, deformațiilor, subțierii, temperaturii degajate din proces și a preciziei pieselor obținute la deformarea incrementală a materialelor polimerice;
7. Prelucrarea statistică a datelor experimentale obținute cu scopul optimizării procesului de deformare a materialelor polimerice în sensul reducerii forțelor, deformațiilor și subțierii dar și a creșterii preciziei pieselor și a temperaturii degajate cu scopul îmbunătățirii deformabilității materialului.

În capitolul 4 se prezintă simularea procesului de deformare incrementală a materialelor polimerice prin metoda elementului finit.

Din analiza rezultatelor obținute se desprind următoarele concluzii:

- Simularea prin metoda elementului finit a procesului de deformare incrementală a materialelor polimerice conduce la rezultate apropiate de valorile experimentale obținute, existând o bună concordanță atât din punct de vedere al distribuției deformațiilor specifice și subțierii cât și din punct de vedere al valorilor maxime ale acestora;
- Graficele de variație obținute prin simulare prin metoda elementului finit pentru forțele din procesul de deformare incrementală sunt extrem de apropiate iar diferențele dintre valorile obținute experimental și cele obținute numeric sunt mici;
- La simularea procesului de deformare incrementală, pentru o mai bună acuratețe a rezultatelor în ceea ce privește deformațiile specifice și subțierea se recomandă utilizarea modelului de material 24 din Ls-Dyna pentru poliamidă și modelul de material 89 pentru polietilenă iar pentru o mai bună acuratețe a rezultatelor din perspectiva forțelor din proces se recomandă utilizarea modelului de material 89 din Ls-Dyna pentru ambele tipuri de materiale;

- Dacă este utilizat modelul corect de material, diferența dintre rezultatele experimentale și cele din simulare, în cazul deformațiilor specifice și subțierii, cu excepția deformației secundare, este de maxim 2.55% în cazul poliamidei, respectiv 4.21% în cazul polietilenei;
- Dacă este utilizat modelul corect de material, diferența dintre rezultatele experimentale și cele din simulare, în cazul forțelor din proces, este de maxim 2.54% în cazul poliamidei, respectiv 2.71% în cazul polietilenei.

Putem astfel concluziona că simularea unui astfel de proces poate da rezultate foarte bune dacă sunt alese datele optime de intrare în analiză (densitatea rețelei de elemente finite, modelul de material utilizat, tipurile de contacte etc.), chiar dacă această simulare este mare consumatoare de timp și depinde de foarte mulți factori.

În capitolul 5 se prezintă stabilirea factorilor de influență la cercetările experimentale ale procedurii de deformare incrementală a materialelor polimerice. Pentru o cât mai corectă evaluare au fost luate în considerare în prezenta teză de doctorat două direcții de cercetare: cercetări experimentale care evaluează comportarea la deformare (deformabilitatea) acestor tipuri de materiale, în general și cercetări experimentale legate strict de procedeul de deformare incrementală a acestor tipuri de materiale.

Cercetările experimentale pentru determinarea deformabilității acestor tipuri de materiale au fost axate pe încercarea la întindere uniaxială și pe încercarea la întindere biaxială. Am ales și această încercare deoarece, la deformarea incrementală starea de deformare nu este una uniaxială ci mai degrabă o stare plană de deformare. Alegerea tipurilor de experimente s-a făcut ținând cont nu numai de stadiul actual în domeniu, de rezultatele teoretice anterioare, dar și de posibilitățile practice, concrete avute la dispoziție în laboratoarele Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări plastice și ale Facultății de Inginerie din Sibiu. Desigur, o importanță deosebită în definitivarea planurilor experimentale, au avut-o numărul mare de factori de influență ai procesului de deformare incrementală dar și costurile legate de cercetarea propriu-zisă. Am ales astfel, pentru proiectarea experimentului, metoda Taguchi care, cu un număr redus de experimente permite obținerea unor rezultate foarte bune din punct de vedere calitativ.

În urma acestor considerente, am stabilit următoarele direcții de cercetare legate de procedeul de deformare incrementală a materialelor polimerice:

- determinarea deformațiilor pe două direcții ale axelor de coordonate, a deformațiilor specifice principale și secundare, a unghiului de forfecare și a subțierii materialului;
- determinarea mărimii forțelor pe cele trei direcții ale axelor de coordonate la deformarea incrementală a materialelor polimerice;
- determinarea valorii temperaturilor pieselor apărute pe parcursul procesului de deformare incrementală (temperaturi datorate frecării poanson și semifabricat);

- evaluarea preciziei pieselor obținute prin deformarea incrementală din materialele polimerice.

În continuarea capitolului se prezintă mașinile și standurile utilizate la derularea experimentelor: mașina de încercare la întindere și compresiune uniaxială Instron 5587, standul experimental pentru încercarea la întinderea biaxială, robotul Kuka KR210-2, sistemul de măsurare al forțelor, standul de prindere al semifabricatelor, sistemul optic de măsurare Aramis, camera cu termoviziune FLIR E6 și scannerul CT Zeiss Metronom.

Capitolul 6 descrie cercetările experimentale privind deformabilitatea materialelor polimerice și anume încercările la întindere uniaxială și biaxială ale materialelor polimerice. Pentru încercarea la tracțiune am ales patru materiale polimerice: poliamida 6E (PA 6E), polietilena de înaltă densitate (PEHD 1000), polioximetilena (POM-C) și politetrafluoretilena (PTFE) de două grosimi diferite, 0.5 mm și 3 mm. Datele experimentale obținute au fost prelucrate statistic cu ajutorul programului Minitab 18 [155], aplicând testul Anderson-Darling pentru distribuție normală și testul Grubbs pentru determinarea valorilor aberante.

În urma analizelor statistice a datelor experimentale obținute la încercările la întindere uniaxială s-au putut observa următoarele:

- pentru nici una din măsurători nu există valori aberante și pentru toate rezultatele obținute există o distribuție normală a rezultatelor;
- materialul cu cea mai ridicată valoare a modulului de elasticitate longitudinal este polioximetilena (cu o valoare medie de 3063.56 MPa) iar materialul cu cea mai scăzută valoare a modulului de elasticitate este politetrafluoretilena (cu o valoare medie de 478.14 MPa) ceea ce denotă că politetrafluoretilena prezintă o elasticitate semnificativă;
- limita de curgere, care este semnificativă doar pentru polietilenă are o valoare medie de 12.63 MPa, aproximativ 50% din valoarea maximă a tensiunii din material;
- materialul care prezintă cea mai mare valoare pentru tensiunea maximă este polioximetilena cu 61.64 MPa, urmat de poliamida cu 41.54 MPa, polietilena cu 24.73 MPa respectiv politetrafluoretilena cu 22.83 MPa;
- materialul cu cea mai mare alungire, estimată pe baza deformației corespunzătoare tensiunii maxime este polietilena cu 496.7%, urmat de politetrafluoretilena cu 344.23%, poliamida cu 126.53%, respectiv polioximetilena cu doar 13.80%.

Încercarea la întindere biaxială s-a realizat cu ajutorul unui stand proiectat și executat acum câțiva ani de colectivul de specialiști ai Facultății de Inginerie.

Datele experimentale obținute au fost prelucrate statistic în mod identic cu cele de la încercările de întindere uniaxială și am ajuns la concluzia că nu există valori aberante iar datele respectă repartiția normală.

În urma analizei rezultatelor și datorită faptului că polioximetilena prezintă alungiri

scăzute și rezistențe la deformare mărite, am decis să elimin acest material din cercetările ulterioare.

Capitolul 7 prezintă cercetările experimentale privind procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice astfel:

- cercetări experimentale pentru determinarea forțelor;
- cercetări experimentale pentru determinarea deformațiilor și a subțierii;
- cercetări experimentale pentru evaluarea temperaturii degajate;
- cercetări experimentale pentru evaluarea preciziei dimensionale.

Determinarea forțelor la procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice a fost efectuată prin montarea pe brațul robotului Kuka KR210-2 a unui sistem de măsurare format din captorul PCB261A13, amplificatorul CMD600 și sistemul de achiziție Quantum X MX840B. A fost făcută calibrarea sistemului de măsurare pe cele trei axe ale sistemului și apoi verificarea procesului utilizând mașina de încercare la tracțiune Instron 5587. Curbele forță-deplasare astfel măsurate au arătat o foarte bună concordanță între valorile celor două măsurători și deci validarea calibrării captorului de forță a sistemului de măsurare.

Dorința de solicitare cât mai mult a materialelor alese, am realizat câteva experimente preliminare prin care am vrut să observ dacă toate materialele permit deformarea și nu se produce ruperea la diferite valori ale unghiului peretelui și diferite diametre ale poansonului.

În urma acestor experimente preliminare am luat decizia de eliminare din cercetările ulterioare și a politetrafluoretilenei deoarece aceasta s-a rupt în fiecare dintre experimente.

Experimentele ulterioare au fost proiectate folosind matricele ortogonale Taguchi, iar în cazul forțelor la procesele de deformare se dorește obținerea unor valori cât mai mici.

Am ales patru parametri de intrare, doi care țin de piesa care se dorește a fi realizată, materialul piesei și unghiul piesei realizate, și doi parametri care țin de parametri tehnologici, diametrul poansonului și pasul pe direcție verticală. Am obținut astfel un plan experimental cu 18 niveluri: două niveluri de variație pentru material (poliamidă și polietilena), trei niveluri de variație pentru unghiul piesei (50° , 55° și 60°), trei niveluri de variație pentru diametrul poansonului (6, 8 și 10 mm) și tot trei niveluri de variație pentru pas (0.5, 0.75 și 1 mm).

Rezultatele obținute au fost interpretate cu ajutorul a două analize statistice: rapoartele semnal zgomot pentru forțe (evaluarea rangului fiecărui parametru luat în considerare) și analiza varianței pentru forțe (evaluarea contribuției fiecărui factor de influență și interacțiunea dintre factori cei mai importanți). De asemenea, am utilizat analiza de regresie pentru găsirea unei relații între cele trei variabile de răspuns (forțele F_z , F_x și F_y) și cele trei variabile de intrare (α , D_p și p).

În urma analizării rezultatelor obținute în urma măsurării forțelor la deformarea incrementală a materialelor polimerice se pot trage o serie de concluzii:

- Forța pe direcția Oz (F_z) crește în cazul ambelor materiale având valori de maxim și de minim local de la primul contact al poansonului cu semifabricatul. Valorile de maxim local apar în zonele în care poansonul intră în material cu un pas iar cele de minim apar în momentul premergător acestui moment. Se observă un comportament ușor diferit în cazul celor două materiale diferite, în cazul poliamidei, forța crește după o pantă mai abruptă, atingând valoarea maximă undeva în apropiere de jumătatea cursei de lucru după care se menține relativ constantă sau chiar scade ușor în cazul utilizării poansoanelor cu diametre mai mici;

- Forțele F_x și F_y au o variație oarecum similară între ele dar diferită față de variația forței F_z ;

- Valorile maxime ale forțelor sunt întotdeauna mai mari în cazul poliamidei decât în cazul polietilenei atât în cazul forței F_z cât și în cazul forțelor F_x și F_y .

- Studiind analizele Taguchi și ANOVA se poate observa că ambele conduc la aceeași concluzie: ponderea cea mai importantă în valoarea maximă a forței o are materialul, urmată de diametrul poansonului, de pasul vertical și în final de unghiul peretelui piesei pentru toate cele trei tipuri de forțe și deci se poate concluziona că unghiul piesei aproape că nu influențează valorile celor trei tipuri de forțe;

- Forța F_z scade cu cât este mai mic diametrul poansonului, cu cât este mai mică valoarea pasului și cu cât este mai mare valoarea unghiului peretelui piesei;

- Forțele F_x și F_y scad cu cât este mai mic diametrul poansonului, cu cât este mai mică valoarea pasului și cu cât este mai mică valoarea unghiului peretelui piesei. Practic, cu excepția unghiului, care are o influență inversă în cazul forțelor F_x și F_y față de F_z ceilalți parametri influențează în același mod forțele.

- parametrii optimi care să conducă la scăderea valorii forței F_z sunt $D_p = 6$ mm, $p = 0.5$ mm și $\alpha = 60^\circ$.

Am realizat și două piese din poliamidă și polietilenă cu o traiectorie de tip trunchi de piramidă, obținându-se aceleași concluzii ca în cazul pieselor de tip trunchi de con.

Determinarea deformațiilor și subțierii în procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice a fost realizată cu ajutorul sistemului optic de măsurare Aramis prin depunerea pe material a unei vopsele mate, iar apoi depunerea unei pulberi fine dintr-o vopsea neagră mată. Sistemul optic măsoară, prin achiziția de imagini succesive, determină deplasarea punctelor de pe piesă și apoi le transformă în deformații și ulterior în subțieri.

Planul experimental este identic cu cel folosit la determinarea forțelor, deoarece măsurarea forțelor s-a efectuat concomitent cu măsurarea deformațiilor și subțierii.

S-au determinat deformațiile specifice ϵ_x , ϵ_y , deformațiile specifice principale ϵ_1 și secundare ϵ_2 , subțierea relativă s și unghiul de forfecare γ_{xy} . Rezultatele au fost analizate pe baza rapoartelor semnal zgomot și aceeași condiție "mai mic este mai bun", observându-se că unghiul peretelui are influența cea mai mare.

Rezultatele obținute au fost interpretate cu ajutorul a două analize statistice: rapoartele semnal zgomot pentru forțe (evaluarea rangului fiecărui parametru luat în considerare) și analiza varianței pentru forțe (evaluarea contribuției fiecărui factor de influență și interacțiunea dintre factori cei mai importanți). De asemenea, am utilizat analiza de regresie pentru găsirea unei relații între cele trei variabile de răspuns (forțele F_z , F_x și F_y) și cele trei variabile de intrare (α , D_p și p). Din analiza varianței reiese că pasul și interacțiunile dintre material și pas și material și diametrul poansonului au o contribuție nesemnificativă. Din analiza de regresie reiese că, în cazul subțierii, aceasta depinde doar de unghiul peretelui.

S-au analizat și piese de formă de tip trunchi de piramidă, observându-se că toate deformațiile au avut valori mai mari decât în cazul pieselor de tip trunchi de con datorită geometriei pieselor cu muchii liniare care constituie concentratori pentru tensiuni și deformații.

S-a observat de asemenea că, la ambele materiale se produce o rotire a materialului în jurul axei Oz, datorită rigidității scăzute a acestor materiale.

Comparând rezultatele deformațiilor se observă că piesele realizate din oțel au toate deformațiile mai mici decât cele realizate din poliamidă sau polietilenă, tot datorită rigidității crescute față de cele realizate din materiale polimerice.

Datorită faptului că materialele polimerice suferă o creștere a temperaturii în timpul procesului de deformare plastică, am tratat și acest fenomen în cazul poliamidei și polietilenei la procedeul de deformare incrementală. Planul experimental a fost schimbat prin eliminarea unghiului peretelui ca factor de influență deoarece are influență cea mai mică în cazul forțelor și am introdus grosimea materialului ca parametru cu o variație a tuturor parametrilor pe două niveluri. S-a observat obținerea de temperaturi maxime obținute la finalul procesului de deformare incrementală chiar și peste 100°C. Din analiza rapoartelor semnal zgomot cu condiția “mai mare este mai bun” (încălzirea materialului contribuie la creșterea deformabilității), a reieșit că grosimea materialului are influența cea mai mare asupra temperaturii. Din analiza de regresie reiese că diametrul poansonului este factorul cel mai nesemnificativ.

În cazul procedeelor de deformare plastică la rece principalul fenomen care contribuie la reducerea preciziei pieselor obținute este revenirea elastică a materialului piesei după înlăturarea efectului forțelor de deformare.

Astfel, am decis să realizez un experiment cu patru cazuri (repetate de două ori) pentru două geometrii diferite (unghiuri ale peretelui piesei diferite) din cele două materiale analizate până acum, poliamida și polietilena. Unghiurile selectate au fost 55° și 60°, grosimea materialului $g = 3$ mm, pasul $p = 0.75$ mm și diametrul poansonului $D_p = 8$ mm. Măsurătorile au fost realizate tot cu sistemul optic Aramis surprinzând atât ultima poziție a traiectoriei poansonului în material, dar și la două minute după ieșirea acestuia din piesă. S-a observat că revenirea elastică are valori semnificative, acestea putând fi îmbunătățite prin optimizarea traiectoriei.

Pentru a evidenția că măsurătorile grosimii materialului prin sistemul optic de măsurare Aramis sunt bune, am scanat piesele cu ajutorul unui scanner CT și am observat o bună concordanță cu cele obținute prin măsurători optice.

Concluziile tezei de doctorat

Scopul acestei teze de doctorat a fost acela de a identifica comportarea la deformare incrementală a materialelor polimerice. Procedeu de deformare incrementală este un procedeu relativ nou, la care forma finală a piesei se obține ca urmare a deplasării poansonului nu doar pe o direcție ci pe o traiectorie programată, existând componente ale deplasării pe toate cele trei direcții ale axelor sistemului de coordonate. Acest procedeu de deformare incrementală a apărut din necesitatea reducerii costurilor cu matrițele și echipamentele de deformare în cazul producției de serie mică și unicat. Chiar dacă până în momentul de față au fost realizate cercetări asupra acestui procedeu de deformare, majoritatea acestor cercetări au fost axate pe deformarea tablelor metalice (oțeluri, aliaje de aluminiu, aliaje de titan, etc.). Au fost realizate și cercetări incipiente referitoare la deformarea anumitor materiale plastice cum ar fi policlorura de vinil, unele tipuri de policarbonați și chiar poliamidă sau polietilenă. În teza de față mi-am propus investigarea comportării la deformare nu doar prin prisma materialului semifabricatului ci și prin prisma factorilor de influență care țin de piesă (forma acesteia, unghiul peretelui, grosimea semifabricatului) și a factorilor de influență care țin de tehnologia de deformare (diametrul poansonului și pasul pe direcție verticală).

Rezultatele investigațiilor teoretice și experimentale au fost axate pe: determinarea forțelor din procesul de deformare al materialelor polimerice, determinarea deformațiilor și a subțierii acestor materiale, determinarea temperaturilor degajate ca urmare a frecării dintre poanson și semifabricat și pe determinarea preciziei pieselor obținute.

În urma investigațiilor teoretice și experimentale am putut ajunge la următoarele concluzii:

- se pot realiza prin deformare incrementală piese care au ca domeniu de utilizare industria automotive sau a bunurilor de larg consum din materiale polimerice cu un raport înălțime/diametru sau înălțime/latură de până la $\frac{1}{2}$ la temperatura mediului ambiant;

- o primă limitare a procedurii constă în faptul că nu toate materialele polimerice analizate în teza de față se pretează procedurii de deformare incrementală la temperatura mediului ambiant și în condițiile tehnologice impuse în prezentul studiu. Astfel, polioximetilena și politetrafluoretilena nu pot fi prelucrate prin deformare incrementală la temperatura mediului ambiant și la o viteză de deplasare a poansonului de 2400 mm/min;

- dacă în cazul polioximetilenei era de așteptat să nu se preteze la deformarea incrementală, datorită faptului că și la întindere uniaxială prezenta o alungire la rupere scăzută, în cazul politetrafluoretilenei care la solicitarea la întindere uniaxială are o alungire ridicată s-a observat că la deformarea biaxială și la deformarea incrementală nu rezistă, apărând ruperea materialului chiar în fazele incipiente de deformare;

- o altă limitare a procedurii este constituită din timpii de prelucrare deosebit de mari, de unde derivă și concluzia că acest procedeu este economic doar în cazul producției de serie mică și de unicat, unde, costurile cu matrițele de deformare nu s-ar amortiza;

- cercetările teoretice realizate pe baza unor simulări folosind metoda elementului finit au aproximat cu o precizie foarte bună rezultatele obținute experimental legate de variația forțelor și a deformațiilor în procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice;

- forțele în procesul de deformare incrementală, diferă atât ca variație cât și ca valori maxime față de forțele obținute la deformare prin alte procedee convenționale atât în situația materialelor polimerice cât și a altor tipuri de materiale. Acest lucru este absolut normal, forțele apărând după trei direcții și nu după una ca în cazul deformărilor convenționale. Valorile cele mai mari, le au întotdeauna forțele care apar pe direcția verticală (pe direcția pătrunderii poansonului în material) iar forțele din planul perpendicular pe această direcție au valori mai mici ele variind între o valoare minimă și una maximă situate simetric față de 0. Și forțele pe direcția verticală au maxime locale ale căror valori continuă să crească până către finalul cursei de lucru în cazul polietilenei, respectiv până la aproximativ jumătatea cursei în cazul poliamidei. De asemenea valorile maxime ale forțelor sunt mai mari în cazul poliamidei decât în cazul polietilenei;

- chiar dacă acest procedeu de deformare incrementală substituie într-o oarecare măsură procedeele convenționale de deformare (ambutisarea de exemplu), am constatat că distribuția deformațiilor specifice principale și a subțierii diferă de distribuția acestora la procedeele convenționale. Acest fapt este cât se poate de normal deoarece modul de deformare este diferit, realizându-se în urma parcurgerii de către poanson a unor traiectorii programate și este normal ca deformațiile specifice și subțierea să aibă valori mai mari de-a lungul acestor traiectorii. Acest lucru este valabil în cazul prelucrării prin deformare incrementală a tuturor materialelor, nu doar a materialelor polimerice. Deformațiile specifice care apar în cazul polietilenei sunt mai mici decât cele care apar în cazul poliamidei în aceleași condiții de deformare;

- în cazul prelucrării prin deformare incrementală a materialelor polimerice, datorită frecării continue dintre poanson și material se produce o creștere a temperaturii de-a lungul traiectoriei urmate de poanson;

- datorită fenomenului de revenire elastică, piesele din materiale polimerice prelucrate prezintă abateri de formă și geometrică, abateri care se materializează prin reducerea înălțimii piesei, prin modificarea unghiului peretelui piesei și prin modificarea razei de racordare dintre peretele piesei și zona de flanșă a acesteia;

- cea mai mare importanță dintre factorii de influență analizați din perspectiva forțelor la operația de deformare incrementală o are materialul semifabricatului. Forțele de deformare, fie că e vorba de forța pe direcția Oz, fie că e vorba de celelalte două forțe din plan sunt mai mari în cazul în care materialul semifabricatului este poliamida decât dacă materialul semifabricatului este polietilena, desigur, în aceleași condiții de deformare;

- creșterea diametrului poansonului conduce la creșterea tuturor forțelor de deformare din procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice;

- creșterea pasului de deformare conduce de asemenea la creșterea tuturor forțelor de deformare din procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice;

- creșterea unghiului peretelui piesei conduce la scăderea forței pe direcția Oz și la creșterea forțelor care acționează în planul xOy la procesul de deformare incrementală a materialelor polimerice;

- factorul de influență cu cea mai importantă contribuție pentru deformațiile specifice, subțiere și unghiul de forfecare este unghiul peretelui piesei. Pe măsură ce valoarea unghiului peretelui piesei crește, cresc și valorile deformațiilor specifice ϵ_x și ϵ_y , crește deformația specifică principală ϵ_1 și unghiul de forfecare γ_{xy} și scade deformația specifică secundară ϵ_2 ;

- materialul piesei influențează și el deformațiile în sensul că deformațiile specifice ϵ_x și ϵ_y , deformația specifică principală ϵ_1 și unghiul de forfecare γ_{xy} sunt mai mari la poliamidă decât la polietilenă iar deformația specifică secundară ϵ_2 este mai mare la polietilenă decât la poliamidă;

- pe măsură ce diametrul poansonului scade, cresc valorile deformațiilor specifice ϵ_x și ϵ_y , crește valoarea deformației specifice principale ϵ_1 și a unghiului de forfecare γ_{xy} și scade deformația specifică secundară ϵ_2 ;

- pentru o valoare medie a pasului (0.75 mm) scad valorile deformațiilor specifice ϵ_x și ϵ_y , scade valoarea deformației specifice principale ϵ_1 și a deformației specifice secundare ϵ_2 și crește valoarea unghiului de forfecare γ_{xy} ;

- factorul de influență care are cea mai importantă contribuție asupra temperaturii datorate frecării dintre poanson și material este grosimea inițială a semifabricatului. Creșterea grosimii semifabricatului conduce la creșterea temperaturii piesei în procesul de deformare incrementală;

- temperatura provenită din frecarea dintre poanson și material este întotdeauna mai mare în cazul poliamidei decât în cazul polietilenei;

- odată cu scăderea pasului din procesul de deformare valoarea temperaturii degajate din procesul de deformare crește;

- cu cât diametrul poansonului este mai mare, datorită creșterii suprafeței de contact, crește și forța de frecare și, implicit, și valoarea temperaturii degajate din procesul de deformare;

- abaterile geometrice și dimensionale sunt mai mari la piesele de polietilenă decât la piesele de poliamidă datorită unei rigidități scăzute a materialului și unei elasticități mai ridicate;

- cu cât unghiul peretelui piesei este mai mare, scade abaterea la înălțimea piesei, scade abaterea la unghiul peretelui piesei și crește raza de racordare dintre peretele conic și flanșa piesei deformată.

Direcții de cercetare viitoare

Câteva din direcțiile de cercetare viitoare legate de acest procedeu de deformare și de aceste materiale sunt:

- prelucrarea prin deformare incrementală la rece a altor tipuri de materiale polimerice cum ar fi policarbonatul sau a unor materiale compozite din poliamidă sau polietilenă ranforsate cu fibră de carbon sau de sticlă;

- realizarea deformării incrementale la cald, cu încălzirea locală a materialului de pe partea opusă celei pe care acționează poansonul;

- studiul temperaturii degajate în procesul de deformare incrementală prin luarea în considerație și a altor factori cum ar fi: rugozitatea poansonului și coeficientul de frecare, materializat prin utilizarea unor lubrifianți;

- efectuarea de cercetări care să țină cont de viteza de deplasare a poansonului.;

- utilizarea unei mașini cu comandă numerică în locul robotului sau utilizarea pe robot a unui sistem care să permită imprimarea unei mișcări rotative poansonului;

- proiectarea unui alt sistem de fixare care să permită un spațiu mai mic între marginea fixată a semifabricatului și zona efectivă de prelucrare pentru a reduce cedarea semifabricatului și diminuarea abaterilor la piesele deformată incremental;

- utilizarea altei variante tehnologice, având în vedere că aceste materiale polimerice necesită forțe de deformare relativ reduse.

BIBLIOGRAFIE

1. Afonso D, Alves de Sousa R, Torcato R. Integration of design rules and process modelling within SPIF technology-a review on the industrial dissemination of single point incremental forming. *Int J Adv Manuf Technol.* februarie 2018;94(9–12):4387–99.
2. Blaga A. Contribuții la deformarea incrementală a tablelor metalice subțiri, Teză de doctorat. Sibiu: Universitatea „Lucian Blaga”; 2011.
3. Li Y, Chen X, Liu Z, Sun J, Li F, Li J, et al. A review on the recent development of incremental sheet-forming process. *Int J Adv Manuf Technol.* septembrie 2017;92(5–8):2439–62.
4. Emmens WC, Sebastiani G, van den Boogaard AH. The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. *J Mater Process Technol.* iunie 2010;210(8):981–97.
5. Leszak E. Apparatus and process for incremental deiless forming. US3342051A, 1967.
6. Berghahn GB, Murray JGF. Method of dielessly forming surfaces of revolution. US3316745A, 1965.
7. Iseki H, S. Sakamoto KK. Flexible and incremental sheet metal forming. În: *Proc 40th JJCTP* (in japoneza. 1989. p. 41-44,.
8. Matsubara S. Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool: a study of a numerical control forming system. *II J JSTP.* 1994;1311-1316,.
9. Matsubara S. Method and device for forming metal plate. JP 07-132329, 1995.
10. Luttgarm CA. Numerically controlled forming method. US6532786B1, US6748780B1, 2003.
11. Jeswiet J. Incremental single point forming. *Trans North Am Manuf Res Inst SME.* ianuarie 2000;29:75-79,.
12. Filice L, Fratini L, Micari F. Analysis of Material Formability in Incremental Forming. *CIRP Ann.* 2002;51(1):199–202.
13. Marabuto SR, Afonso D, Ferreira JAF, Melo FQ, Martins MABE, de Sousa RJA. Finding the Best Machine for SPIF Operations - a Brief Discussion. *Key Eng Mater.* martie 2011;473:861–8.
14. Bagudanch I, García-Romeu ML, Ferrer I, Ciurana J. Customized cranial implant manufactured by incremental sheet forming using a biocompatible polymer. *Rapid Prototyp J.* 2 ianuarie 2018;24(1):120–9.
15. Song T, Qiu ZY, Cui FZ. Biomaterials for reconstruction of cranial defects. *Front Mater Sci.* decembrie 2015;9(4):346–54.
16. Bonda DJ, Manjila S, Selman WR, Dean D. The Recent Revolution in the Design and Manufacture of Cranial Implants. *Neurosurgery.* 1 noiembrie 2015;77(5):814–24.

17. Ambrogio G, Sgambitterra E, De Napoli L, Gagliardi F, Fragomeni G, Piccininni A, et al. Performances Analysis of Titanium Prostheses Manufactured by Superplastic Forming and Incremental Forming. *Procedia Eng.* 2017;183:168–73.
18. Eksteen P. Development of incrementally formed patient-specific titanium knee prosthesis. Stellenbosch; 2013.
19. Sy LV. Modeling of Single Point Incremental Forming Process for Metal and Polymeric Sheet. Teză de doctorat. Universitatea din Padua; 2009.
20. Behera AK, de Sousa RA, Ingarao G, Oleksik V. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *J Manuf Process.* iunie 2017;27:37–62.
21. Jeswiet J, Micari F, Hirt G, Bramley A, Duflou J, Allwood J. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Ann.* 2005;54(2):88–114.
22. Amino M, Mizoguchi M, Terauchi Y, Maki T. Current Status of “Dieless” Amino’s Incremental Forming. *Procedia Eng.* 2014;81:54–62.
23. Ambrogio G, Gagliardi F, Bruschi S, Filice L. On the high-speed Single Point Incremental Forming of titanium alloys. *CIRP Ann.* 2013;62(1):243–6.
24. Hamilton K, Jeswiet J. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences. *CIRP Ann.* 2010;59(1):311–4.
25. Sena JIVD. Advanced numerical framework to simulate incremental forming process [PhD Disserttion.,]. Universite de Liege and University of Aveiro; 2015.
26. Vanhove H, Mohammadi A, Guo YS, Duflou JR. High-Speed Single Point Incremental Forming of an Automotive Aluminium Alloy. *Key Eng Mater.* septembrie 2014;622–623:433–9.
27. Pereira Bastos RN, Alves de Sousa RJ, Fernandes Ferreira JA. Enhancing time efficiency on single point incremental forming processes. *Int J Mater Form.* noiembrie 2016;9(5):653–62.
28. Ham M, Powers BM, Loisel J. Surface Topography from Single Point Incremental Forming Using an Acetal Tool. *Key Eng Mater.* aprilie 2013;549:84–91.
29. McAnulty T, Jeswiet J, Doolan M. Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. *CIRP J Manuf Sci Technol.* ianuarie 2017;16:43–54.
30. Jeswiet J, Adams D, Doolan M, McAnulty T, Gupta P. Single point and asymmetric incremental forming. *Adv Manuf.* decembrie 2015;3(4):253–62.
31. Gupta P, Jeswiet J. Observations on Heat Generated in Single Point Incremental Forming. *Procedia Eng.* 2017;183:161–7.
32. 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.* februarie 2010;46(9–12):1113–8.
33. Jeswiet J, Young D. Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 1 aprilie 2005;219(4):359–64.

34. Hussain G, Gao L, Dar NU. An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming. *J Mater Process Technol.* mai 2007;186(1–3):45–53.
35. Suresh K, Bagade SD, Regalla SP. Deformation Behavior of Extra Deep Drawing Steel in Single-Point Incremental Forming. *Mater Manuf Process.* 3 octombrie 2015;30(10):1202–9.
36. Hussain G, Gao L, Hayat N, Qijian L. The effect of variation in the curvature of part on the formability in incremental forming: An experimental investigation. *Int J Mach Tools Manuf.* noiembrie 2007;47(14):2177–81.
37. Filice L, Ambrogio G, Micari F. On-Line Control of Single Point Incremental Forming Operations through Punch Force Monitoring. *CIRP Ann.* 2006;55(1):245–8.
38. Szekeres A, Ham M, Jeswiet J. Force Measurement in Pyramid Shaped Parts with a Spindle Mounted Force Sensor. *Key Eng Mater.* iulie 2007;344:551–8.
39. Hassan M, Hussain G, Wei H, Qadeer A, AlKahtani M. Progress on single-point incremental forming of polymers. *Int J Adv Manuf Technol.* mai 2021;114(1–2):1–26.
40. Nasulea D, Oancea G. Incremental deformation: A literature review. Bondrea I, Simion C, Ință M, editori. *MATEC Web Conf.* 2017;121:03017.
41. Aerens R, Eyckens P, Van Bael A, Duflou JR. Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *Int J Adv Manuf Technol.* februarie 2010;46(9–12):969–82.
42. Pérez-Santiago R, Bagudanch I, García-Romeu ML. Force Modeling in Single Point Incremental Forming of Variable Wall Angle Components. *Key Eng Mater.* martie 2011;473:833–40.
43. Eyckens P, Van Bael A, Aerens R, Duflou J, Van Houtte P. Small-scale Finite Element Modelling of the Plastic Deformation Zone in the Incremental Forming Process. *Int J Mater Form.* aprilie 2008;1(S1):1159–62.
44. Skjoedt M, Hancock MH, Bay N. Creating Helical Tool Paths for Single Point Incremental Forming. *Key Eng Mater.* iulie 2007;344:583–90.
45. Bambach M, Taleb Araghi B, Hirt G. Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming. *Prod Eng.* iunie 2009;3(2):145–56.
46. Essa K, Hartley P. An assessment of various process strategies for improving precision in single point incremental forming. *Int J Mater Form.* decembrie 2011;4(4):401–12.
47. Duflou JR, Callebaut B, Verbert J, De Baerdemaeker H. Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement. *CIRP Ann.* 2007;56(1):273–6.
48. Rauch M, Hascoet JY, Hamann JC, Plenel Y. Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *Comput-Aided Des.* decembrie 2009;41(12):877–85.
49. Skjoedt M, Bay N, Endelt B, Ingarao G. Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup. *Int J Mater Form.* aprilie 2008;1(S1):1199–202.

50. Ambrogio G, De Napoli L, Filice L. A novel approach based on multiple back-drawing incremental forming to reduce geometry deviation. *Int J Mater Form.* august 2009;2(S1):9–12.
51. Allwood JM, Houghton NE, Jackson KP. The Design of an Incremental Sheet Forming Machine. *Adv Mater Res.* mai 2005;6–8:471–8.
52. Behera AK, Lauwers B, Duflou JR. Tool path generation framework for accurate manufacture of complex 3D sheet metal parts using single point incremental forming. *Comput Ind.* mai 2014;65(4):563–84.
53. Malhotra R, Reddy NV, Cao J. Automatic 3D Spiral Toolpath Generation for Single Point Incremental Forming. *J Manuf Sci Eng.* 1 decembrie 2010;132(6):061003.
54. Duflou JR, Verbert J, Belkassam B, Gu J, Sol H, Henrard C, et al. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. *CIRP Ann.* 2008;57(1):253–6.
55. Bambach M. A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming for the prediction of membrane strains and sheet thickness. *J Mater Process Technol.* septembrie 2010;210(12):1562–73.
56. Kim TJ, Yang DY. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. *Int J Mech Sci.* iulie 2000;42(7):1271–86.
57. Young D, Jeswiet J. Wall thickness variations in single-point incremental forming. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf.* 1 noiembrie 2004;218(11):1453–9.
58. Micari F, Ambrogio G, Filice L. Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends. *J Mater Process Technol.* august 2007;191(1–3):390–5.
59. Malhotra R, Bhattacharya A, Kumar A, Reddy NV, Cao J. A new methodology for multi-pass single point incremental forming with mixed toolpaths. *CIRP Ann.* 2011;60(1):323–6.
60. Liu Z, Li Y, Meehan PA. Vertical Wall Formation and Material Flow Control for Incremental Sheet Forming by Revisiting Multistage Deformation Path Strategies. *Mater Manuf Process.* mai 2013;28(5):562–71.
61. Vanhove H, Gu J, Sol H, Duflou J. Process window extension for incremental forming through optimal work plane rotation. *Spec Ed 10th Int Conf Technol Plast ICTP 2011.* 1 ianuarie 2011;508–12.
62. Eyckens P, He S, Van Bael A, Van Houtte P, Duflou J. Forming Limit Predictions for the Serrated Strain Paths in Single Point Incremental Sheet Forming. În: *AIP Conference Proceedings.* Porto (Portugal): AIP; 2007. p. 141–6.
63. Bambach M, Hirt G. Performance Assessment of Element Formulations and Constitutive Laws for the Simulation of Incremental Sheet Forming (ISF). 1 ianuarie 2005;
64. Bambach M, Cannamela M, Azaouzi M, Hirt G, Batoz JL. Computer-Aided Tool Path Optimization for Single Point Incremental Sheet Forming. În: *Advanced Methods in Material Forming.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007. p. 233–50.

65. Yamashita M, Gotoh M, Atsumi SY. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *J Mater Process Technol.* aprilie 2008;199(1–3):163–72.
66. Delamézière A, Yu Y, Robert C, Ayed LB, Nouari M, Batoz JL, et al. Numerical Simulation of Incremental Sheet Forming by Simplified Approach. În Paris, (France); 2011. p. 619–24.
67. Sebastiani G, Brosius A, Tekkaya AE, Homberg W, Kleiner M. Decoupled Simulation Method For Incremental Sheet Metal Forming. În: AIP Conference Proceedings. Porto (Portugal): AIP; 2007. p. 1501–6.
68. Hadoush A, van den Boogaard AH. Efficient implicit simulation of incremental sheet forming: EFFICIENT IMPLICIT SIMULATION OF INCREMENTAL SHEET FORMING. *Int J Numer Methods Eng.* 4 mai 2012;90(5):597–612.
69. Martins PAF, Kwiatkowski L, Franzen V, Tekkaya AE, Kleiner M. Single point incremental forming of polymers. *CIRP Ann.* 2009;58(1):229–32.
70. Barimani-Varandi A, Nasrabadi MK, Ravan BA, Javadi M. Rapid prototyping of aircraft canopy based on the incremental forming process. *J Braz Soc Mech Sci Eng.* februarie 2021;43(2):59.
71. Diabb Zavala JM, Leija Gutiérrez HM, Segura-Cárdenas E, Mamidi N, Morales-Avalos R, Villela-Castrejón J, et al. Manufacture and mechanical properties of knee implants using SWCNTs/UHMWPE composites. *J Mech Behav Biomed Mater.* august 2021;120:104554.
72. Duflou JR, Behera AK, Vanhove H, Bertol LS. Manufacture of Accurate Titanium Cranio-Facial Implants with High Forming Angle Using Single Point Incremental Forming. *Key Eng Mater.* aprilie 2013;549:223–30.
73. Bagudanch I, Lozano-Sánchez LM, Puigpinós L, Sabater M, Elizalde LE, Elías-Zúñiga A, et al. Manufacturing of Polymeric Biocompatible Cranial Geometry by Single Point Incremental Forming. *Procedia Eng.* 2015;132:267–73.
74. Vanhove H, Carette Y, Vancleef S, Duflou JR. Production of thin Shell Clavicle Implants through Single Point Incremental Forming. *Procedia Eng.* 2017;183:174–9.
75. Ambrogio G, Napoli LD, Filice L, M. Muzzupappa FG. Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. *J Mater Process Technol.* 2005;162–163:156-162,.
76. Jackson KP, Allwood JM, Landert M. Incremental forming of sandwich panels. *J Mater Process Technol.* august 2008;204(1–3):290–303.
77. Ingarao G, Ambrogio G, Gagliardi F, Di Lorenzo R. A sustainability point of view on sheet metal forming operations: material wasting and energy consumption in incremental forming and stamping processes. *J Clean Prod.* iulie 2012;29–30:255–68.
78. Dittrich MA, Gutowski TG, Cao J, Roth JT, Xia ZC, Kiridena V, et al. Exergy analysis of incremental sheet forming. *Prod Eng.* aprilie 2012;6(2):169–77.
79. Silva MB, Marques T, Martins PAF. Single-point incremental forming of polymers. În: *Mechatronics and Manufacturing Engineering.* Elsevier; 2012. p. 293–331.

80. Groover MP. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. Seventh edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc; 2020. 1 p.
81. Feldman D. Polymer History. Des Monomers Polym. ianuarie 2008;11(1):1–15.
82. Scutaru MLuminița, Chiru A, Vlase S. Materiale plastice și compozite în ingineria autovehiculelor. Ed. rev. și adăug. București: Matrix Rom; 2013.
83. Mocanu F. Elemente de elasticitate și plasticitate. TEHNOPRESS. Iași; 2010.
84. Marciniak Z, Duncan JL, Hu SJ. Mechanics of sheet metal forming. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2002.
85. Deutsch I. Rezistența materialelor. a II-a revizuită. București: Editura Didactică și Pedagogică; 1979.
86. Whitney W, Andrews RD. Yielding of Glassy Polymers: Volume Effects. J Polym Sci. 1967;Part C(16):2981–90.
87. Ongchin L, Sternstein SS. Yield criteria for plastic deformation on glassy high polymers in general stress fields. În 1969.
88. O'Connell PA, McKenna GB. Yield and Crazing in Polymers. În: John Wiley & Sons, Inc., editor. Encyclopedia of Polymer Science and Technology. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2004. p. pst463.
89. Caddell RM, Raghava RS, Atkins AG. Pressure dependent yield criteria for polymers. Mater Sci Eng. februarie 1974;13(2):113–20.
90. Franzen V, Kwiatkowski L, Martins PAF, Tekkaya AE. Single point incremental forming of PVC. J Mater Process Technol. ianuarie 2009;209(1):462–9.
91. Lu K. The Future of Metals. Science. 16 aprilie 2010;328(5976):319–20.
92. Shaw MT. Cold Forming of Polymeric Materials. Annu Rev Mater Sci. august 1980;10(1):19–42.
93. Zhu H, Ou H, Popov A. Incremental sheet forming of thermoplastics: a review. Int J Adv Manuf Technol. noiembrie 2020;111(1–2):565–87.
94. Le VS, Ghiotti A, Lucchetta G. Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials. Int J Mater Form. aprilie 2008;1(S1):1179–82.
95. Franzen V, Kwiatkowski L, Neves J, Martins PAF, Tekkaya AE. On the capability of single point incremental forming for manufacturing polymer sheet parts. În: ICTP2008, 9th International Conference on Theory of Plasticity. 2008.
96. Silva MB, Alves LM, Martins PAF. Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation. Eur J Mech - ASolids. iulie 2010;29(4):557–66.
97. Marques TA, Silva MB, Martins PAF. On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts. Int J Adv Manuf Technol. aprilie 2012;60(1–4):75–86.
98. Alkas Yonan S, Soyarslan C, Haupt P, Kwiatkowski L, Tekkaya AE. A simple finite strain non-linear visco-plastic model for thermoplastics and its application to the simulation of incremental cold forming of polyvinylchloride (PVC). Int J Mech Sci. ianuarie 2013;66:192–201.

99. Alkas Yonan S, Silva MB, Martins PAF, Tekkaya AE. Plastic flow and failure in single point incremental forming of PVC sheets. *Express Polym Lett.* 2014;8(5):301–11.
100. Bagudanch I, Garcia-Romeu ML, Centeno G, Elías-Zúñiga A, Ciurana J. Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *J Mater Process Technol.* mai 2015;219:221–9.
101. Rajenthirakumar D, Sridhar R. Single Point Incremental Sheet Forming of Polymer on Computer Numerically Controlled (CNC) Milling Machine Tool. *Key Eng Mater.* septembrie 2014;622–623:420–6.
102. Davarpanah MA, Mirkouei A, Yu X, Malhotra R, Pilla S. Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers. *J Mater Process Technol.* august 2015;222:287–300.
103. Bagudanch I, Garcia-Romeu ML, Sabater M. Incremental forming of polymers: process parameters selection from the perspective of electric energy consumption and cost. *J Clean Prod.* ianuarie 2016;112:1013–24.
104. Hussain G, Mahna A, Iqbal A. Response surface analysis of cold formability of polymers in Incremental Sheet Forming: Effect of parameters and associated thermal softening. *Int J Precis Eng Manuf.* mai 2016;17(5):613–21.
105. Lublasser E, Braumann J, Goldbach D, Brell-Çokcan S. Robotic Forming: Rapidly Generating 3D Forms and Structures through Incremental Forming. *CAADRIA Proc.* 2016;
106. Sridhar R, Rajenthirakumar D. Incremental Forming of Polymer-Numerical and Experimental Investigation. *Polym Polym Compos.* septembrie 2016;24(7):489–98.
107. Sridhar R, Rajenthirakumar D. Polymer Sheet Hot Incremental Forming - an Innovative Polymer Forming Approach. *Polym Polym Compos.* septembrie 2016;24(7):447–54.
108. Zhang XB, Wang J, Zhang SQ. Study on Process Parameters on Single Point Incremental Forming of PVC. *Mater Sci Forum.* noiembrie 2016;878:74–80.
109. Bagudanch I, Centeno G, Vallellano C, Garcia-Romeu ML. Revisiting formability and failure of polymeric sheets deformed by Single Point Incremental Forming. *Polym Degrad Stab.* octombrie 2017;144:366–77.
110. Conte R, Gagliardi F, Ambrogio G, Filice F, Russo P. Performance analysis of the incremental sheet forming on PMMA using a combined chemical and mechanical approach. În Penang, Malaysia; 2017. p. 080026.
111. Edwards WL, Grimm TJ, Ragai I, Roth JT. Optimum Process Parameters for Springback Reduction of Single Point Incrementally Formed Polycarbonate. *Procedia Manuf.* 2017;10:329–38.
112. Medina-Sánchez G, Torres-Jimenez E, Lopez-Garcia R, Dorado-Vicente R, Cazalla-Moral R. Temperature influence on Single Point Incremental Forming of PVC parts. *Procedia Manuf.* 2017;13:335–42.

113. Zha G cheng, Zhou X, Lu C kai, Zhao W, Sun S, Yan A xin, et al. Experimental study on the limit test method of polypropylene sheet incremental forming. *Int J Adv Manuf Technol.* noiembrie 2017;93(5–8):2369–74.
114. Clavijo-Chaparro SL, Iturbe-Ek J, Lozano-Sánchez LM, Sustaita AO, Elías-Zúñiga A. Plasticized and reinforced poly(methyl methacrylate) obtained by a dissolution-dispersion process for single point incremental forming: Enhanced formability towards the fabrication of cranial implants. *Polym Test.* iulie 2018;68:39–45.
115. Durante M, Formisano A, Lambiase F. Incremental forming of polycarbonate sheets. *J Mater Process Technol.* martie 2018;253:57–63.
116. Medina-Sanchez G, Garcia-Collado A, Carou D, Dorado-Vicente R. Force Prediction for Incremental Forming of Polymer Sheets. *Materials.* 3 septembrie 2018;11(9):1597.
117. Sabater M, Garcia-Romeu M, Vives-Mestres M, Ferrer I, Bagudanch I. Process Parameter Effects on Biocompatible Thermoplastic Sheets Produced by Incremental Forming. *Materials.* 8 august 2018;11(8):1377.
118. Ambrogio G, Gagliardi F, Conte R, Russo P. Feasibility analysis of hot incremental sheet forming process on thermoplastics. *Int J Adv Manuf Technol.* mai 2019;102(1–4):937–47.
119. Thangavel Karthik, DURAISWAMY Rajenthirakumar, NAGARAJAN Srinivasan, RAMASAMY Sridhar. Influence of Roller Ball Tool in Single Point Incremental Forming of Polymers. *Teh Vjesn - Tech Gaz.* februarie 2019;26(1).
120. Formisano A, Lambiase F, Durante M. Polymer self-heating during incremental forming. *J Manuf Process.* octombrie 2020;58:1189–99.
121. Durante M, Formisano A, Boccarusso L, Langella A. Influence of cold-rolling on incremental sheet forming of polycarbonate. *Mater Manuf Process.* 17 februarie 2020;35(3):328–36.
122. Hou C, Su X, Peng X, Wu X, Yang D. Thermal-Assisted Single Point Incremental Forming of Jute Fabric Reinforced Poly(lactic acid) Biocomposites. *Fibers Polym.* octombrie 2020;21(10):2373–9.
123. Ostasevicius V, Eidukynas D, Jurenas V, Paleviciute I, Gudauskis M, Grigaliunas V. Investigation of Advanced Robotized Polymer Sheet Incremental Forming Process. *Sensors.* 10 noiembrie 2021;21(22):7459.
124. Conte R, Ambrogio G, Pulice D, Gagliardi F, Filice L. Incremental Sheet Forming of a Composite Made of Thermoplastic Matrix and Glass-Fiber Reinforcement. *Procedia Eng.* 2017;207:819–24.
125. Okada M, Kato T, Otsu M, Tanaka H, Miura T. Development of optical-heating-assisted incremental forming method for carbon fiber reinforced thermoplastic sheet—Forming characteristics in simple spot-forming and two-dimensional sheet-fed forming. *J Mater Process Technol.* iunie 2018;256:145–53.
126. Bagudanch I, Vives-Mestres M, Sabater M, Garcia-Romeu ML. Polymer incremental sheet forming process: Temperature analysis using response surface methodology. *Mater Manuf Process.* 2 ianuarie 2017;32(1):44–53.

127. Silva MB, Skjoedt M, Martins PAF, Bay N. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. *Int J Mach Tools Manuf.* ianuarie 2008;48(1):73–83.
128. Silva MB, Skjoedt M, Atkins AG, Bay N, Martins PAF. Single-point incremental forming and formability—failure diagrams. *J Strain Anal Eng Des.* 1 ianuarie 2008;43(1):15–35.
129. Kumar AL, Reddy KB. Experimental investigation of incremental sheet metal forming on polyvinylchloride (PVC) by using CNC vertical milling machine. În 2016.
130. Lozano-Sánchez L, Bagudanch I, Sustaita A, Iturbe-Ek J, Elizalde L, Garcia-Romeu M, et al. Single-Point Incremental Forming of Two Biocompatible Polymers: An Insight into Their Thermal and Structural Properties. *Polymers.* 1 aprilie 2018;10(4):391.
131. Ai S, Long H. A review on material fracture mechanism in incremental sheet forming. *Int J Adv Manuf Technol.* septembrie 2019;104(1–4):33–61.
132. Al-Ghamdi KA. Spring back analysis in incremental forming of polypropylene sheet: An experimental study. *J Mech Sci Technol.* octombrie 2018;32(10):4859–69.
133. Dufloou JR, Sutherland JW, Dornfeld D, Herrmann C, Jeswiet J, Kara S, et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Ann.* 2012;61(2):587–609.
134. Branker K. A study of energy, carbon dioxide emissions and economics in machining: milling and single point incremental forming. Queen's University (Canada); 2011.
135. Centeno G, Morales-Palma D, Gonzalez-Perez-Somarriba B, Bagudanch I, Egea-Guerrero JJ, Gonzalez-Perez LM, et al. A functional methodology on the manufacturing of customized polymeric cranial prostheses from CAT using SPIF. *Rapid Prototyp J.* 20 iunie 2017;23(4):771–80.
136. Centeno G, Bagudanch I, Morales-Palma D, García-Romeu ML, Gonzalez-Perez-Somarriba B, Martinez-Donaire AJ, et al. Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming. *Procedia Eng.* 2017;183:180–7.
137. Zienkiewicz OC, Taylor RL. *The Finite Element Method.* 5-lea ed. Vol. 1. Butterworth-Heinemann; 2000.
138. Leoveanu IS, Tiorean MH. *Metode numerice avansate. Aplicatii in modelarea metalelor.* Universitatea Transilvania din Brasov; 2009.
139. Owen DRJ. *Finite Element In Plasticity: Theory and Practice.* Pineridge Press Limited; 1980.
140. Katsikadelis JT. *The boundary element method for engineers and scientists: theory and applications.* Second edition. London: Academic Press; 2016. 446 p.
141. *LS-DYNA Keyword User's Manual, Version R7.0.* Vol. I, II, III. 2013.
142. Dușe DM, Cofaru NF. *Bazele cercetării experimentale.* Sibiu; 2001.
143. Ungureanu I. *Bazele cercetării experimentale.* Editura Universității din Pitești; 2002.

144. Oleksik M. Cercetări teoretice și experimentale privind comportarea mecanică a materialelor compozite cu suport textil. [Sibiu]: Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu; 2014.
145. KUKA High Payload Robot Series [Internet]. Disponibil la: <https://www.robots.com/robots/kuka-kr-210>
146. KUKA KR C2 Controller [Internet]. RobotWorx. [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://robots.com/controllers/kuka-kr-c2-controller>
147. SprutCAM Tech | Multipurpose CAD/CAM solutions | CAD/CAM software [Internet]. sprutcaml.com. [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://sprutcaml.com/>
148. PCB261A13 [Internet]. Disponibil la: http://pcbpiezotronics.co.uk/contentstore/docs/PCB_Corporate/ForceTorque/Products/Manuals/261A13.pdf
149. CMD600 Data sheet [Internet]. Disponibil la: <http://www.sensorhbm.com/upload/product-file/b2823.pdf>
150. QuantumX MX840B/MX440B: Universal Data Acquisition Module [Internet]. HBM. 2022 [citată 23 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.hbm.com/en/2129/quantumx-mx840b-8-channel-universal-amplifier/>
151. ARAMIS Multi Sensor: Measure all around strains and displacements [Internet]. [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.gom.com/en/topics/aramis-multisensor-dic-systems>
152. FLIR E6-XT Infrared Camera with Extended Temperature Range | Teledyne FLIR [Internet]. [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.flir.eu/products/e6-xt?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>
153. GOM Inspect Pro: Making quality easily visible | Software for 3D inspections [Internet]. [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.gom.com/en/products/zeiss-quality-suite/gom-inspect-pro>
154. ZEISS METROTOM [Internet]. [citată 23 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/computed-tomography/metrotom.html>
155. Data Analysis, Statistical & Process Improvement Tools [Internet]. wwwSite. [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.minitab.com/content/www/websites/en-us.html>
156. The Anderson-Darling statistic [Internet]. [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/>
157. Stephanie. Grubbs' Test for Outliers (Maximum Normed Residual Test) [Internet]. Statistics How To. 2016 [citată 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.statisticshowto.com/grubbs-test/>

158. CMD Charge Amplifier for Piezoelectric Sensors [Internet]. HBM. 2020 [citat 28 septembrie 2022]. Disponibil la: <https://www.hbm.com/en/2659/paceline-cmd-digital-charge-amplifier/>
159. Rosca N, Trzepieciński 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*. 17 septembrie 2022;15(18):6453.
160. Rosca N, Oleksik M, Rosca L. Numerical-Experimental Study Regarding the Single Point Incremental Forming Process. Cofaru NF, Ință M, editori. *MATEC Web Conf.* 2021;343:03008.
161. Rosca N, Oleksik M, Oleksik V. Experimental Study Regarding PA and PE Sheets on Single Point Incremental Forming Process. Cofaru NF, Ință M, editori. *MATEC Web Conf.* 2021;343:03009.
162. Rosca NA. A Succint Review Of Single Point Incremental Forming Of Polymers. *ACTA Univ Cibiniensis Tech Ser.* 2021;Technical Series(73:1-5).
163. Rosca N, Oleksik V, Pascu A, Oleksik M, Avrigean E. Optical study for springback prediction, thickness reduction and forces variations on single point incremental forming. *Mater Today Proc.* 2019;12:213–8.
164. Roșca NA, Oleksik M. Simulation of the Single Point Incremental Forming of Polyamide and Polyethylene Sheets. Bondrea I, Cofaru NF, Ință M, editori. *MATEC Web Conf.* 2019;290:03014.
165. Pascu A, Oleksik M, Roșca N, Avrigean E, Oleksik V. Experimental studies on uniaxial and echi biaxial tensile tests applied to plastic materials sheets. *Mater Today Proc.* 2019;12:271–8.
166. Rosca NA. A Brief Review of Manufacturing Medical Implants by Single Point Incremental Forming. *ACTA Univ Cibiniensis.* 1 decembrie 2018;70(1):15–20.