



UNIVERSITATEA  
LUCIAN BLAGA  
— DIN SIBIU —



Școala doctorală interdisciplinară  
Domeniul de doctorat: INGINERIE INDUSTRIALĂ

## TEZĂ DE DOCTORAT - REZUMAT

### STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA ROBOȚILOR INDUSTRIALI ÎN PROCESELE DE DEFORMARE PLASTICĂ

Doctorand:  
Alexandru BÂRSAN

Conducător Doctorat:  
Prof. dr. ing. Sever-Gabriel RACZ



Prezenta teză de doctorat intitulată “Studii și cercetări privind utilizarea roboților industriali în procesele de deformare plastică” cuprinde:

- 6 capitole, precedate de o parte introductivă;
- 17 tabele;
- 80 de ecuații;
- 82 de figuri;
- 193 de referințe bibliografice.

Direcțiile de cercetare abordate în cadrul acestei teze de doctorat, desprinse în urma analizei și sintezei stadiului actual, sunt structurate în două părți: cercetări teoretice și cercetări experimentale.

Cercetările teoretice și experimentale s-au desfășurat în perioada 2017 – 2022, în cadrul Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice (CSCDP) din cadrul Universității „Lucian Blaga” din Sibiu.

**CUVINTE CHEIE:** proces mecanic, deformare incrementală, robot industrial, consum energetic, metoda elementului finit, sistem flexibil de fabricație, CAD, CAM, CAE, deformații, subțiere relativă, forțe din proces, traiectorii inovative, precizie dimensională, precizie geometrică, KUKA KR 210-2, poziția semifabricatului, momente diferențiale, cuplă cinematică.



<b>PREFAȚĂ</b> .....	5
<b>INTRODUCERE</b> .....	6
<b>1. STADIUL ACTUAL PRIVIND UTILIZAREA ROBOȚILOR INDUSTRIALI ÎN PROCESELE DE PRELUCRARE MECANICĂ</b> .....	12
1.1. Utilizarea roboților industriali în procesele de prelucrare mecanică .....	12
1.1.1. <i>Prelucrarea materialelor moi prin intermediul roboților industriali</i> .....	14
1.1.2. <i>Prelucrarea materialelor dure prin intermediul roboților industriali</i> .....	18
1.1.3. <i>Utilizarea roboților industriali în cadrul proceselor de deformare incrementală</i> .....	21
1.2. Procedeele de deformare incrementală .....	26
1.2.1. <i>Aspecte fundamentale ale procedeeului de deformare incrementală</i> .....	29
1.2.2. <i>Limitările procedeeului de deformare incrementală</i> .....	33
1.2.3. <i>Strategii pentru creșterea preciziei dimensionale și geometrice</i> .....	41
1.2.4. <i>Domenii de utilizare ale deformării incrementale</i> .....	44
1.3. Concluzii și obiective ale cercetărilor .....	46
<b>2. CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRELIMINARE PRIVIND PROCESUL DE DEFORMARE INCREMENTALĂ</b> .....	49
2.1. Considerații generale.....	49
2.2. Standuri experimentale.....	49
2.3. Generarea traiectoriilor .....	57
2.4. Determinarea caracteristicilor mecanice prin încercare la tracțiune uniaxială .....	63
2.5. Simularea numerică prin metoda elementului finit .....	71
2.6. Concluzii .....	78
<b>3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PROCESUL DE DEFORMARE INCREMENTALĂ</b> ..	79
3.1. Analiza stării de deformații .....	79
3.2. Determinarea forțelor din proces.....	86
3.3. Analiza comparativă a rezultatelor teoretice și experimentale .....	91
3.4. Precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate.....	95
3.5. Concluzii .....	100
<b>4. CERCETĂRI PRIVIND MODELUL DINAMIC AL ROBOTULUI INDUSTRIAL UTILIZAT ÎN CADRUL PROCESULUI DE DEFORMARE INCREMENTALĂ</b> .....	102
4.1. Aspecte teoretice privind cinematica roboților industriali.....	103
4.2. Mediul computațional MATLAB® .....	124
4.3. Simulări ale cinematicii robotului KUKA KR 210-2 bazate pe ecuații matematice .....	125
4.4. Simulări ale cinematicii bazate pe modelul virtual al robotului KUKA KR 210-2 .....	131
4.5. Dezvoltarea modelului dinamic al robotului KUKA KR 210-2 utilizat în cadrul procesului de deformare incrementală .....	133
4.6. Concluzii .....	142
<b>5. CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CONSUMULUI ENERGETIC ÎN PROCESUL DE DEFORMARE INCREMENTALĂ</b> .....	143
5.1. Determinarea influenței poziției relative a semifabricatului asupra consumului energetic .....	143
5.2. Concluzii .....	151

---

<b>6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.</b> .....	<b>153</b>
6.1. Concluzii finale .....	153
6.2. Contribuții personale.....	156
6.3. Direcții viitoare de cercetare .....	158
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	<b>159</b>
<b>ANEXE</b> .....	<b>172</b>
<b>LISTA DE LUCRĂRI</b> .....	<b>183</b>



## JUSTIFICAREA TEMATICII LUCRĂRII

Evoluția economică și socială, adeseori legată de impactul revoluției digitale, al tranziției energetice și al globalizării, are loc în toate domeniile de activitate. Globalizarea a creat noi oportunități, reprezentând o provocare pentru industrie. Companiile industriale sunt forțate să-și îmbunătățească sistemele de producție, astfel încât să fie capabile să reacționeze rapid și eficient din punct de vedere economic la condițiile imprevizibile de pe piață.

Pe de altă parte, criza economico-financiară, alături de criza sanitară, care s-au manifestat la nivel global, au obligat firmele să-și regândească strategiile de producție și să investească în tehnologii de prelucrare cu grad ridicat de inovație.

Dacă până nu de mult, utilizarea unui robot industrial pe o linie de fabricație era accesibilă doar întreprinderilor mari, acum acest lucru este accesibil pentru organizații de toate dimensiunile, inclusiv IMM-uri. Deoarece roboții industriali pot fi programați pentru a efectua sarcini periculoase, extenuante și/sau repetitive cu o precizie ridicată, aceștia sunt folosiți din ce în ce mai mult într-o mare varietate de industrii și aplicații.

Procedeele de prelucrare prin așchiere, împreună cu procedeele de prelucrare prin deformare plastică, reprezintă cele mai răspândite și utilizate metode de generare a formei pieselor finite cu aplicabilitate în industria constructoare de autovehicule, industria aeronautică, industria electronică și electrotehnică, industria bunurilor de larg consum și industria alimentară.

Între cele două mari grupe de procedee de prelucrare exista o diferență bine definită, însă la ora actuală, datorită evoluțiilor tehnologice, precum și condițiilor de natură economică, cercetările din domeniul prelucrărilor prin așchiere sau prin deformare plastică au extins mult zona de aplicabilitate a acestora.

Ținând cont de evidenta tendință spre personalizarea produselor, creșterea gradului de flexibilitate a proceselor de deformare plastică reprezintă un subiect dezbătut intens în ultimii ani mediul industrial. Este cunoscut faptul că procedeele convenționale de presare la rece permit fabricarea de piese în serie mare și de masă, asigurând un nivel ridicat de automatizare a producției, dar totuși atingând un nivel scăzut de flexibilitate. În cazul producției de serie mică sau unicat a pieselor din tablă, costurile extrem de ridicate ale matrițelor își pun amprenta în mod negativ asupra producției.

Procedeele de deformare incrementală cu contact singular reprezintă unul dintre noile procedee apărute pentru deformarea tablelor. Această metodă modernă de deformare plastică

---

este utilizată în deformarea pieselor din tablă metalică, și nu numai, având ca rezultat fabricarea de piese în serie mică și mijlocie sau unicat. Pentru fabricarea unor tipuri diferite de produse se utilizează o sculă simplă și relativ ieftină, universală. Printr-o succesiune de apăsări repetate ale sculei asupra piesei se obține forma finală a piesei. Apăsarea se realizează incremental, pe întreaga suprafață a semifabricatului. În cele mai multe cazuri, placa activă realizează o mișcare în plan, în timp ce poansonul realizează o mișcare de avans axial, perpendicular pe direcția tablei, continuu sau în trepte.

În cazul prelucrării unui lot mic sau mediu de piese, utilizând acest procedeu de prelucrare, costurile și timpul de dezvoltare sunt semnificativ diminuate în comparație cu utilizarea procedeelor convenționale de deformare plastică. Procedeu prezintă o flexibilitate ridicată, deoarece prin utilizarea unor traiectorii de deplasare incrementală diferite, dar cu utilizarea aceluiași poanson și aceleiași plăci active, se pot obține o multitudine de forme cave.

Ținând cont de simplitatea cinematicii procedeuului de deformare incrementală, acesta se poate realiza pe diverse echipamente industriale (mașini specializate, mașini-unelte de frezat cu comandă numerică, roboți cu topologie serială etc.). Datorită rigidității ridicate și a disponibilității, principalele echipamente utilizate la deformarea incrementală sunt mașinile-unelte cu comandă numerică (CNC). Ținând cont de flexibilitatea ridicată, dată de cinematica superioară și de mărimea spațiului de lucru, precum și de vitezele mari de deplasare pe traiectorii complexe, o alternativă la mașinile-unelte CNC o poate reprezenta robotul industrial. Este cunoscut că procesul de deformare incrementală este unul lent, iar viteza mare de deplasare a unui robot industrial poate compensa acest dezavantaj. De asemenea, flexibilitatea ridicată a unui robot industrial poate permite realizarea unor piese de forme complexe la o precizie ridicată.

Mulți roboți funcționează pe liniile de producție, unde se consumă cel mai mare procent de energie. De exemplu, în industriile constructoare de autovehicule, consumul de energie al roboților industriali este de aproximativ 8% din consumul total de energie în faza de producție [128]. Energia este o componentă vitală pentru dezvoltarea economică și pentru progresul societății în ansamblu. Un obiectiv specific regăsit în planurile de acțiune în domeniul eficienței energetice, la nivel național și european, este reprezentat de reducerea consumului de energie la nivelul consumatorilor industriali [186].

Prin urmare, reducerea consumului de energie a devenit un subiect major pentru mulți producători de roboți, dar și pentru grupurile academice de cercetare. Cu toate acestea, reducerea acestui consum este încă o sarcină dificilă, care necesită o înțelegere profundă a comportării cinemate și dinamice ale echipamentului tehnologic utilizat în procesele de prelucrare.

# EVOLUȚIA CERCETĂRILOR ÎN CADRUL TEZEI DE DOCTORAT

În urma celor menționate anterior, această teză de doctorat se concentrează pe studiul utilizării roboților industriali în cadrul unui proces de deformare incrementală, pe îmbunătățirea consumului energetic al procesului de prelucrare cu roboți, precum și asupra preciziei dimensionale și de formă a pieselor prelucrate prin dezvoltarea unor modele cinematice și dinamice integrate.

Tema tezei de doctorat se înscrie în preocupările colectivului Centrului de Studii și Cercetări pentru Deformări Plastice (CSCDP) din cadrul Universității „Lucian Blaga” din Sibiu și a fost abordată în vederea cercetării unor aspecte legate de utilizarea roboților cu topologie serială ca echipament tehnologic în cadrul procesului de deformare incrementală cu contact singular.

După o analiză critică a literaturii de specialitate, asupra procedurii de deformare incrementală, cât și asupra roboților industriali cu topologie serială, lucrarea de față are printre obiective dezvoltarea unui algoritm pentru determinarea consumului energetic în timpul procesului de deformare incrementală cu ajutorul robotului industrial KUKA KR 210-2. Un consum energetic redus al echipamentului tehnologic în timpul procesului ar putea conduce spre o creștere a preciziei dimensionale și de formă a pieselor obținute [89, 90]. Pașii parcurși pentru dezvoltarea algoritmului sunt reprezentați sub formă grafică în figura de mai jos.

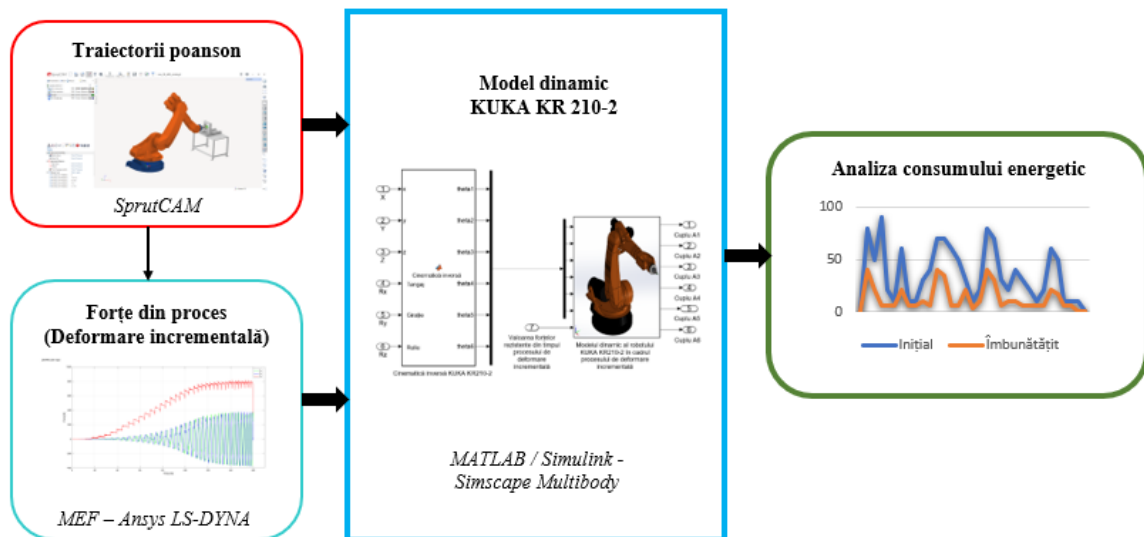


Fig. 1: Diagrama bloc corespunzătoare dezvoltării algoritmului pentru determinarea consumului energetic.

Pentru a atinge obiectivele principale ale tezei de doctorat, au fost definite o serie de direcții de cercetare care sunt prezentate în continuare.

O primă direcție de cercetare a fost dezvoltarea unor traiectorii inovative ce trebuie urmărite de către poanson în vederea generării formei finale a piesei. Aceste traiectorii au fost realizate utilizând un software de fabricație asistată de calculator (CAM), SprutCAM. Odată stabilite traiectoriile poansonului, acestea vor reprezenta date de intrare pentru modelul dinamic dezvoltat în teză, cât și pentru analizele prin metoda elementului finit (MEF).

A doua direcție de cercetare a fost reprezentată de determinarea forțelor din proces, precum și de determinarea deformațiilor și a subțierii relative pe parcursul procesului de deformare. În scopul dezvoltării unor metode practice, eficiente și rapide de determinare a forțelor apărute în timpul procesului de deformare incrementală, s-a realizat un model care să permită analiza procesului prin MEF. Verificarea acestui model de analiză utilizând MEF s-a realizat prin compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele obținute experimental. Diagrama bloc de verificare a modelului de analiză utilizând MEF este prezentată în figura de mai jos.

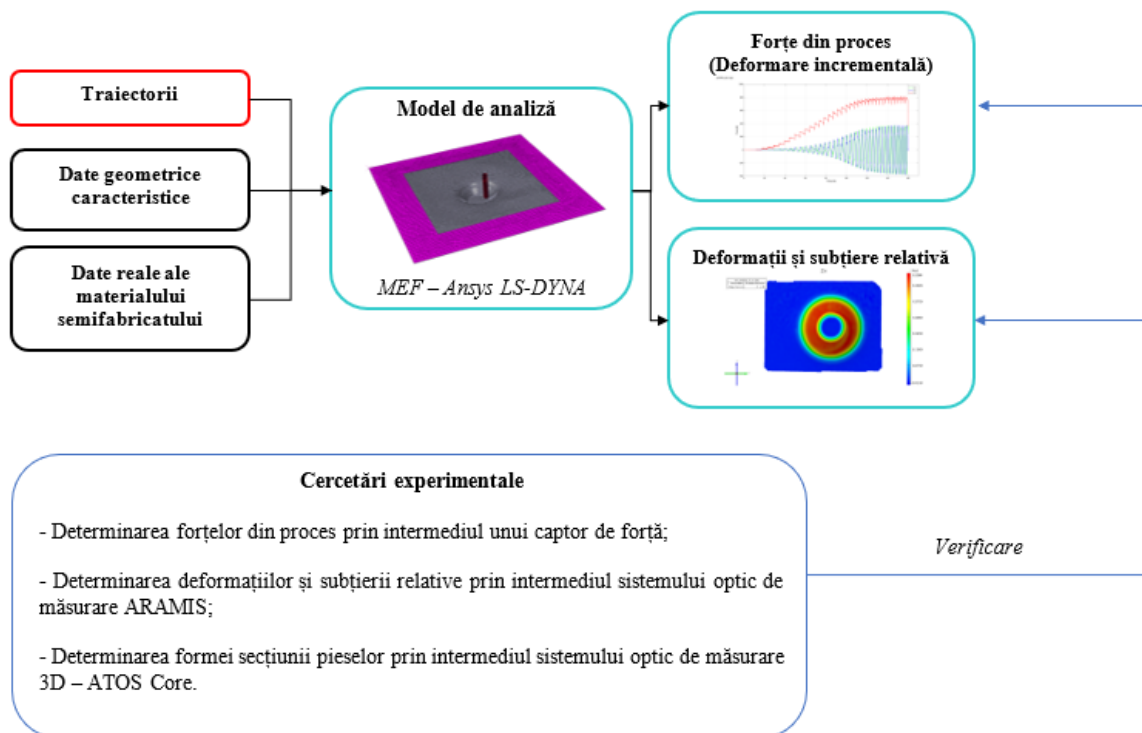


Fig. II: Diagrama bloc de verificare a modelului de analiză utilizând MEF.

Odată validat modelul de analiză prin MEF, acesta va permite determinarea forțelor din procesele de prelucrare, fără a mai fi necesare determinări experimentale. Astfel, prin modificarea caracteristicilor procesului (date geometrice caracteristice, parametrii mecanici ai semifabricatului, traiectorii impuse de utilizator) se pot determina, pe baza simulării MEF,



---

valorile forțelor din proces. Aceste valori vor fi utilizate ca și date de intrare în modelul dinamic al robotului KUKA KR 210-2, utilizat în cadrul procesului de deformare incrementală.

Odată obținute traiectoriile ce trebuie parcurse de poanson în vederea obținerii formei finale a piesei, precum și a forțelor din timpul procesului, s-a realizat modelul dinamic al întregului proces de deformare incrementală prin intermediul robotului în mediul de lucru Matlab/Simulink - Simscape-Multibody.

Cu ajutorul modelului dinamic dezvoltat, prin introducerea traiectoriei impuse de utilizator și a valorilor forțelor din proces, se pot determina valorile momentelor rezistente la nivelul cuplelor cinematice ale robotului în timpul procesului de deformare incrementală. Pentru aceeași traiectorie impusă, prin alegerea unei configurații a robotului sau prin modificarea poziției semifabricatului în spațiu de lucru al robotului se pot obține momente rezistente reduse. Obținerea unor momente rezistente reduse conduce la scăderea consumului energetic.

Pentru construcția modelului dinamic al robotului, un prim pas a fost soluționarea problemei cinematice a robotului cu topologie serială KUKA KR 210-2. Această rezolvare a problemei cinematice oferă posibilitatea de a conduce robotul după o traiectorie impusă de utilizator. Abordarea problemei menționate anterior începe prin rezolvarea problemei cinematice inverse. Problema cinematică inversă se ocupă cu determinarea pozițiilor relative dintre elementele cinematice ale robotului dacă se cunoaște traiectoria impusă a efectorului terminal (poansonului). Rezolvarea cinematicii inverse este de obicei un pas dificil de soluționat care necesită analize aprofundate. În cazul de față, pentru robotul studiat s-a abordat ca și metodă de rezolvare a cinematicii inverse, metoda analitică. Următorul pas în crearea modelului dinamic a fost reprezentat de dezvoltarea modelului virtual al robotului în mediul de lucru Simulink-Simscape-Multibody. Crearea modelului virtual al robotului în Simulink-Simscape-Multibody s-a realizat prin importul și procesarea (separarea și definirea modulelor componente ale structurii) modelului tridimensional (3D) al robotului KUKA KR 210-2 într-un software de proiectarea asistată de calculator (CAD), urmată de exportul ulterior al acestui model procesat în Simulink-Simscape-Multibody. Modelul CAD al robotului a fost preluat de pe site-ul producătorului de roboți industriali KUKA, acesta respectând caracteristicile mecanice ale robotului real KUKA KR 210-2. Aceste caracteristici se raportează la masa elementelor aflate în mișcare, momente de inerție, lungimi ale elementelor și centre de greutate. Prin importarea modelului CAD în Simulink-Simscape au fost importate toate caracteristicile mecanice ale robotului: dimensiunile elementelor, sistemele de coordonate, relațiile vectoriale dintre elemente, masa și volumul acestora, respectiv forțele gravitaționale și momentele de inerție. Pentru determinarea momentului rezistent s-au realizat diferite simulări ale procesului de deformare incrementală. În urma simulărilor s-au determinat momentele rezistente la nivelul cuplelor cinematice ale robotului KUKA KR 210-2 în timpul procesului de deformare incrementală. Totuși, având în vedere

---

---

că nu toate proprietățile mecanice ale structurii robotice sunt cunoscute cu exactitate, pentru a depăși acest impediment, s-a decis determinarea diferenței dintre valorile momentelor rezistente măsurate în sarcină și măsurate la mers în gol. Astfel, prin utilizarea acestui artificiu de calcul, s-au luat în considerare doar efectele dinamice datorate procesului, momente suplimentare, eliminându-se din sistem influența centrului de masă și a momentului de inerție al structurii robotice, care nu sunt cunoscute cu precizie.

Cea de-a patra direcție de cercetare a fost reprezentată de realizarea unor cercetări privind îmbunătățirea preciziei dimensionale și geometrice (de formă) a pieselor obținute, prin reducerea încărcărilor asupra structurii robotice. Planificarea traiectoriei reprezintă unul dintre aspectele importante de control, reprezentând o problemă fundamentală în robotică. O traiectorie bine planificată garantează o urmărire bună a traseului și solicită mai puțin structura mecanică a robotului, astfel încât calitatea suprafețelor prelucrate nu va fi afectată. Pe baza studiului literaturii de specialitate s-a observat că a fost acordată o atenție redusă variantei când axa de simetrie a poansonului este păstrată perpendicular în raport cu suprafața deformată a semifabricatului, pe întreg parcursul procesului de deformare a piesei. Astfel, s-a realizat un set de determinări experimentale în scopul determinării influenței parametrilor procesului asupra preciziei dimensionale și de formă a pieselor prelucrate.

O etapă finală a cercetărilor a fost reprezentată de analiza consumului energetic din timpul procesului de deformare incrementală cu contact singular. Această analiză energetică se bazează pe măsurarea curentului electric consumat de motoarele electrice din fiecare cuplă cinematică. Prin intermediul achiziției valorilor curenților din articulațiile robotului, s-a putut analiza gradul de încărcare pentru fiecare cuplă cinematică, respectiv pentru fiecare motor electric. Evoluția curenților a fost utilizată pentru a valida, într-un mod calitativ, valorile momentelor din cuplele cinematice determinate prin simulare. În final, s-a studiat influența poziției piesei de prelucrat în spațiul de lucru al robotului asupra valorilor momentelor din cuplele cinematice. Această analiză poate fi utilizată ulterior pentru optimizarea consumului energetic al proceselor de prelucrare mecanică.

---

# CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.

## 1.1. Concluzii finale

Lucrarea de față a urmărit studiul utilizării roboților industriali în cadrul unui proces de deformare incrementală, influența utilizării acestora asupra îmbunătățirii consumului energetic în procesul de prelucrare, precum și asupra preciziei dimensionale și de formă a pieselor, prin reducerea solicitărilor dinamice de tip moment rezistent asupra structurii robotice.

În urma concluziilor rezultate din analiza stadiului actual în domeniu, s-au ales direcțiile de cercetare și s-au inițiat cercetările teoretice și experimentale.

În vederea desfășurării cercetărilor teoretice și experimentale prin procesul de deformare incrementală, s-a ales un semifabricat din tablă cu grosimea de 0,67 mm din oțel de ambutisare DC04. Forma pieselor prelucrate a fost de tip trunchi de con la care s-au variat trei parametri reprezentativi, geometrici și de proces: unghiul de înclinare al trunchiului de con, pasul incremental și tipul traiectoriei utilizate. Pentru generarea formei pieselor s-au utilizat patru tipuri de traiectorii: circulară și spirală, pentru fiecare dintre acestea utilizându-se variantele cu axă fixă și axă înclinată.

Pentru cercetările teoretice și experimentale desfășurate s-au utilizat mai multe pachete software specifice:

- Bluehill 2, pentru prelucrarea și interpretarea rezultatelor obținute în urma încercării la tracțiune uniaxială;
- SprutCAM, pentru generarea comenzilor pentru deplasarea poansonului pe traiectoriile necesare pentru obținerea formei finale a piesei (codul pentru comanda deplasărilor robotului);
- ANSYS LS-DYNA, pentru analiza numerică prin MEF a procesului de deformare incrementală;
- Catman, pentru achiziționarea și analiza valorilor celor trei componente ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) ale forței din proces;
- GOM Correlate, pentru vizualizarea și evaluarea datelor obținute în urma măsurării deformațiilor cu sistemul optic ARAMIS;
- GOM Inspect, pentru vizualizarea și evaluarea datelor obținute în urma măsurătorilor efectuate cu sistemul optic de măsurare 3D – ATOS Core;
- MATLAB – Simulink, pentru realizarea și simularea modelelor cinematice și dinamice ale robotului KUKA KR 210-2.

---

Cercetările teoretice și experimentale desfășurate pe parcursul elaborării lucrării au permis formularea următoarelor concluzii:

- din punct de vedere al echipamentului tehnologic utilizat în generarea unei configurații flexibile care să satisfacă cerințele mediului industrial în ceea ce privește timpul, performanțele și costurile de producție, în cazul procesului de deformare incrementală, un bun compromis poate fi oferit de utilizarea roboților industriali;
- forțele dezvoltate în timpul proceselor de deformare incrementală reprezintă un subiect de interes major în cercetare, datorită influenței acestora asupra limitărilor procesului (în special din punct de vedere al preciziei pieselor prelucrate), iar valorile acestora au un efect direct asupra consumului energetic din timpul procesului de prelucrare;
- datorită posibilității de a poziționa vertical semifabricatul din tablă ce urmează a fi prelucrat prin deformare incrementală cu roboții industriali, comportarea la deformare a pieselor se poate evalua online, prin măsurarea deformațiilor materialului prelucrat, în timpul prelucrării, prin intermediul unui sistem de măsurare optic;
- rezultatele obținute experimental privind valorile și distribuțiile deformațiilor principale  $\varepsilon_1$ , deformațiilor secundare  $\varepsilon_2$ , deformațiilor echivalente Von Mises  $\varepsilon_{VM}$ , și a subțierii relative, au fost similare cu cele obținute prin simularea numerică prin MEF, fapt care a condus la validarea modelului de analiză prin MEF elaborat;
- în urma comparării rezultatelor experimentale cu cele teoretice (rezultate din simularea numerică) a variației forțelor din procesul de deformare atât din punct de vedere al evoluției în timp, cât și al valorilor maxime și minime obținute, s-a observat o bună concordanță;
- în urma comparării celor două tipuri de traiectorii, cu axă fixă și cu axă înclinată a elementului efector terminal (poanson), se remarcă faptul că prelucrarea cu traiectorii cu axă fixă, păstrarea paralelismului între axa poansonului și axa piesei, conduce la o distribuție uniformă din punct de vedere al deformațiilor, precum și a subțierii relative;
- pe baza analizei rezultatelor obținute în urma determinărilor experimentale, din punct de vedere al preciziei dimensionale și geometrice (de formă), strategia de prelucrare cu traiectorii având axa de simetrie a poansonului orientată perpendicular pe suprafața peretelui piesei (axă înclinată), permite obținerea unor piese cu un profil real mai apropiat de profilul teoretic, fiind superioare traiectoriilor cu axă fixă;
- rezultatele măsurărilor au validat ipoteza că prelucrarea cu traiectorii cu axă înclinată reprezintă cel mai bun compromis între valoarea maximă și distribuția uniformă a deformațiilor și a subțierii relative;
- scăderea pasului incremental al poansonului duce la obținerea unor valori mai apropiate de profilul etalon în ceea ce privește diferența de nivel la fundul piesei;

- 
- din punctul de vedere al forței din proces, s-a observat că o influență semnificativă asupra acesteia, după cele trei direcții, în cadrul procesului de deformare incrementală, o are strategia de deformare (din punctul de vedere al traiectoriilor utilizate), urmată de pasul incremental și de unghiul de înclinare al peretelui piesei;
  - dezvoltarea modelului dinamic al robotului KUKA KR 210-2 a condus la posibilitatea determinării momentelor rezistente de la nivelul cuplelor cinematice ale robotului în timpul procesului de deformare incrementală;
  - analiza consumului energetic din timpul procesului de deformare incrementală cu contact singular s-a realizat într-un mod calitativ, pe baza comparației evoluției curenților în raport cu momentele din cuplele cinematice calculate prin simulare;
  - s-a observat că variația în timp a momentelor diferențiale din articulații și a curenților consumați în cuplele cinematice are o evoluție similară din punct de vedere calitativ;
  - cu privire la poziția semifabricatului în spațiul de lucru al robotului (repoziționarea, reorientarea semifabricatului în raport cu baza robotului, precum și modificarea traiectoriilor ce trebuie parcurse de către poanson pentru realizarea unei piese), atât momentele rezistente, cât și curenții devin mai mici pe măsură ce distanța dintre piesa de prelucrat și robot scade;
  - valoarea minimă a distanței dintre robot și piesă este dată de limitele funcționale ale sistemului de prelucrare;
  - nu s-a putut realiza o analiză cantitativă pentru a valida valorile calculate ale momentelor din cuplele cinematice, pe baza curenților măsurați, datorită valorilor necunoscute ale momentele de inerție ale elementelor structurale de legătură (brațelor robotului) și a elasticității din structura robotică, care sunt extrem de dificil de determinat în faza de exploatare a robotului;
  - modelul dezvoltat și validat permite utilizatorului să evalueze influența poziției piesei de prelucrat asupra valorilor momentelor din cuplele cinematice;
  - prin integrarea traiectoriilor, obținute pe baza modelului CAM, și al forțelor din proces, obținute pe baza modelului CAE, în modelul MATLAB / Simulink-Simscape al structurii robotice utilizatorul va putea să calculeze/controlaze mișcarea structurii robotice în cinematică directă și inversă, precum și solicitările dinamice asupra acesteia.

## **1.2. Contribuții personale**

Pe parcursul elaborării acestei teze de doctorat, s-au adus o serie de contribuții la studiul privind utilizarea roboților industriali în procesele de deformare plastică, cele mai semnificative dintre acestea fiind enumerate în continuare.

---

*Din punct de vedere al cercetărilor teoretice:*

- a fost realizată o sinteză a principalelor rezultate din literatura de specialitate aferentă domeniului abordat, referitoare la utilizarea roboților industriali în procesele de prelucrare mecanică (cu precădere în cadrul procedeelelor de deformare incrementală), fiind identificate limitările procesului de deformare incrementală și strategiile existente pentru îmbunătățirea preciziei dimensionale și geometrice a pieselor obținute prin deformare incrementală;
- pe baza analizei critice a stadiului actual în domeniu, s-au stabilit principalele direcții și obiective de cercetare;
- s-au propus și dezvoltat traiectorii inovative (cu axă înclinată a efectorului terminal) parcurse de poanson în vederea obținerii formei finale a piesei;
- în scopul determinării unor metode practice, eficiente și rapide de calcul a forțelor dezvoltate în timpul procesului de deformare incrementală a fost creat un model care să permită analiza procesului prin MEF;
- pe baza modelului MEF elaborat au fost realizate o serie de simulări numerice ale procesului de deformare incrementală pe baza cărora s-au determinat valorile și distribuțiile deformațiilor, a subțierii relative, precum și a forțelor din proces;
- s-a dezvoltat un model matematic al cinematicii robotului necesar pentru comanda robotului KUKA KR 210-2 după o traiectorie impusă;
- s-a dezvoltat un model dinamic în Matlab / Simulink Simscape (CAE) în care, prin introducerea traiectoriei impuse de utilizator, determinate în programul SprutCAM (CAM) și a valorilor forțelor din proces, determinate prin MEF, prin intermediul programului LS-DYNA (CAE), se pot determina valorile momentelor rezistente la nivelul cuplelor cinematice ale robotului în timpul procesului de deformare incrementală;
- s-a realizat o integrare CAD/CAM/CAE a procesului de prelucrare prin deformare plastică, care permite atât un control mai bun al acestuia, precum și o îmbunătățire a parametrilor din proces, în special a preciziei de prelucrare și a solicitărilor asupra structurii robotice (cu influență directă asupra reducerii consumului energetic).

*Din punct de vedere al cercetărilor experimentale:*

- s-a proiectat și realizat un stand experimental care permite utilizarea robotului industrial în cadrul procesului de deformare incrementală;
- s-au adaptat, calibrat și implementat pentru procesul studiat sisteme de achiziții de date, precum și sisteme de achiziții și prelucrare de imagini asistate de calculator;
- s-au realizat programe pentru achiziția, filtrarea și prelucrarea datelor experimentale;

- 
- în scopul determinării caracteristicilor mecanice s-a determinat comportarea elasto-plastică a materialului utilizat (oțel de ambutisare DC04), prin încercare la tracțiune uniaxială;
  - au fost realizate piese de tip trunchi de con utilizând diferiți parametrii geometrici și de proces;
  - s-au determinat experimental valorile și distribuțiile deformațiilor și a subțierii relative ale materialului semifabricatului utilizat la realizarea pieselor prin deformare incrementală cu contact singular;
  - rezultatele obținute au validat modelul cu elemente finite dezvoltat;
  - s-a stabilit influența unor parametri de intrare, geometrici și de proces, asupra mărimilor care caracterizează comportarea la deformare plastică incrementală;
  - s-a determinat influența modului de variație al forțelor din proces asupra preciziei finale a piesei pentru diferite traiectorii și diferiți parametri tehnologici;
  - a fost evaluată precizia dimensională și de formă a pieselor prelucrate, rezultatele obținute indicând faptul că strategia de prelucrare cu traiectorii având axa de simetrie a poansonului orientată perpendicular pe suprafața peretelui piesei (axă înclinată), permite obținerea unor piese cu un profil real mai apropiat de profilul teoretic, fiind superioare traiectoriilor cu axă fixă;
  - s-a propus și validat o metodologie de analiză a consumului energetic din timpul procesului de deformare incrementală cu contact singular, care permite utilizatorului să evalueze influența poziției piesei de prelucrat în spațiul de lucru al robotului asupra valorilor momentelor din cuplele cinematice;
  - s-au realizat cercetări privind influența poziției relative a semifabricatului față de sistemul de prelucrare asupra consumului energetic, observându-se că atât momentele rezistente, cât și curenții devin mai mici pe măsură ce distanța dintre piesa de prelucrat și robot scade.

### **1.3. Direcții viitoare de cercetare**

Având în vedere rezultatele obținute în această teză de doctorat, există desigur posibilitatea de dezvoltare a cercetărilor pe următoarele direcții:

- evaluarea calității suprafețelor (rugozitatea) pieselor prelucrate;
  - realizarea unor piese de formă complexă cu traiectorii având axa de simetrie a poansonului orientată perpendicular pe suprafața peretelui piesei (axă înclinată);
  - dezvoltarea unor programe software CAM care să țină cont de particularitățile specifice pentru prelucrările prin deformare incrementală;
  - realizarea unei analize cantitative pentru a valida valorile calculate ale momentelor din cuplele cinematice, pe baza curenților mășurați.
-



1. Adams, D. W. (2012). Energy consumption in single point incremental forming. *Proc. 40th NAMRC*, 2012, 7704.
2. Adams, D. W. (2013). Improvements on single point incremental forming through electrically assisted forming, contact area prediction and tool development (Doctoral dissertation, Queen's University).
3. Aerens R, Eyckens P, Van Bael A, Duflou JR (2010) Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations. *Int J Adv Manuf Technol* 46(9–12):969–982.
4. Akrichi, S., Abbassi, A., Abid, S., Ben Yahia, N. (2019). Roundness and positioning deviation prediction in single point incremental forming using deep learning approaches. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(7).
5. Allwood, J. M., Houghton, N. E., Jackson, K. P. (2005). The design of an incremental sheet forming machine. In *Advanced Materials Research* (Vol. 6, pp. 471-478).
6. Al-Obaidi A, Kräusel V, Landgrebe D (2016) Hot single-point incremental forming assisted by induction heating. *Int J Adv Manuf Technol* 82(5–8):1163–1171.
7. Altintas, Y. (2012). Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. *Cambridge university press*.
8. Ambrogio G, Filice L, Micari F (2006) A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming. *J Mater Process Technol* 177(1–3):413–416.
9. Ambrogio G, Napoli L de, Filice L (2009) A novel approach based on multiple back-drawing incremental forming to reduce geometry deviation. *International Journal of Material Forming* 2(1): 9.
10. Amino, H., Lu, Y., Maki, T., Osawa, S., Fukuda, K. (2002). Dieless NC forming, prototype of automotive service parts. In *Proceedings of the 2nd international conference on rapid prototyping and manufacturing (ICRPM), Beijing*
11. Amino, M., Mizoguchi, M., Terauchi, Y., Maki, T. (2014). Current status of “Dieless” Amino's incremental forming. *Procedia Engineering*, 81, 54-62.
12. Arfa, H., Bahloul, R., BelHadjSalah, H. (2013). 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. *International journal of material forming*, 6(4), 483-510.
13. Asghar J, Reddy NV (2013) Importance of tool configuration in incremental sheet metal forming of difficult to form materials using electro-plasticity. In: *Proceedings of the world congress on engineering*, vol 3, pp 1734–1738.
14. Azevedo NG, Farias JS, Bastos RP, Teixeira P, Davim JP, de Sousa RJA (2015) Lubrication aspects during single point incremental forming for steel and aluminum materials. *Int J Precis Eng Manuf* 16(3):589–595.



- 
15. Bagudanch I, Centeno G, Vallellano C, Garcia-Romeu ML (2013) Forming force in single point incremental forming under different bending conditions. *Proc Eng* 63:354–360.
  16. Bagudanch, I., Garcia-Romeu, M. L., Centeno, G., Elías-Zúñiga, A., Ciurana, J. (2015). Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride. *Journal of materials processing technology*, 219, 221-229.
  17. Baharudin, B. T. H. T., Azpen, Q. M., Sulaima, S., Mustapha, F. (2017). Experimental investigation of forming forces in frictional stir incremental forming of aluminum alloy AA6061-T6. *Metals*, 7(11), 484.
  18. Bambach M, Cannamela M, Azaouzi M, Hirt G, Batoz J. Computer-aided toolpath optimization for single point incremental sheet forming. In: *Advanced methods in material forming*. Springer; 2007. p. 233–50.
  19. Baranes, A., & Oudeyer, P. Y. (2013). Active learning of inverse models with intrinsically motivated goal exploration in robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(1), 49-73.
  20. **Bârsan, A.** (2019). A Brief Review of Robotic Machining. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, 71(1), 9-13.
  21. **Bârsan, A.**, Crenganis, M., Marosan, A. I., & Chicea, A. L. (2020, November). Tool-holder working unit used for robot-based incremental sheet forming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 968, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
  22. **Bârsan A.**, Popp M.O., Rusu G.P., Maroşan I.A. (2020). Robot-Forming - Industrial Robots Used In Single Point Incremental Forming Process, *The Scientific Bulletin Addendum of the Land Forces Academy*, 5, 152-161.
  23. **Bârsan, A.**, Crenganiş, M., Popp, M. O., Rusu, G. P. (2020). Roboforming-Investigations Regarding Forming Forces in SPIF Process. *Acta Universitatis Cibiniensis. Technical Series*, 72(1), 37-41
  24. **Bârsan, A.**, Popp, M. O., Rusu, G. P., Maroşan, I.A. (2021). Robot-based incremental sheet forming – the tool path planning, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1009, 012004, IOP Publishing.
  25. **Bârsan, A.**, Racz, S. G., Breaz, R. (2021). Incremental forming using KUKA KR210-2 industrial robot-research regarding design rules and process modelling. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 343, p. 08005). EDP Sciences.
  26. Behera, A.K.; Verbert, J.; Lauwers, B.; Duflou, J.R. Tool path compensation strategies for single point incremental sheet forming using multivariate adaptive regression splines. *Comput. Aided Des.* 2013, 45, 575–590.
  27. Behera, A. K., de Sousa, R. A., Ingarao, G., & Oleksik, V. (2017). Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, 37-62.
  28. Belchior J, Guines D, Leotoing L, Ragneau E (2013) Force prediction for correction of robot tool path in single point incremental forming. *Key Eng Mater* 554:1282–1289
  29. Belchior J, Leotoing L, Guines D, Courteille E, Maurine P (2014) A process/machine coupling approach: application to robotized incremental sheet forming. *J Mater Process Technol* 214(8):1605–1616.
-

- 
30. Bhoyar, P. K., & Borade, A. B. (2015). The use of single point incremental forming for customized implants of unicondylar knee arthroplasty: a review. *Research on Biomedical Engineering*, 31(4), 352-357.
  31. Blaga A, Bologna O, Oleksik V, Breaz R (2011) Influence of tool path on main strains, thickness reduction and forces in single point incremental forming process. *Proc Manuf Syst* 6(4):191–196.
  32. Blaga, A., Bologna, O., Oleksik, V., & Pirvu, B. (2012). Experimental researches regarding the influence of geometric parameters on the principal strains and thickness reduction in single point incremental forming. *UPB Sci. Bull., Series D*, 74, 111-120
  33. Blaga A, Oleksik V (2013) 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*.
  34. Bogue R (2009) Finishing robots: a review of technologies and applications. *Ind Robot* 36(1):6–12.
  35. Bondarenko D, Pashkevich A, Briot S, Ritou M, Furet B (2012) Elasto-Dynamic Model of Robotic Milling Process Considering Interaction between Tool and Workpiece. *Proceedings of ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* 1–10.
  36. Bouffioux, C., Eyckens, P., Henrard, C., Aerens, R., Van Bael, A., Sol, H., Habraken, A. M. (2008). Identification of material parameters to predict Single Point Incremental Forming forces. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 1147-1150.
  37. Breaz, R. E., Bologna, O., Racz, S. G. (2017). Selecting industrial robots for milling applications using AHP. *Procedia computer science*, 122, 346-353.
  38. Breaz, R. E., Tera, M., Ciubotariu, V. A., Cohal, V., Maier, C., Plăiașu, G. (2018). Single Point Incremental Forming. Comparison Between Technological Equipment By an Overall Processing Time Point of View. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 13(3), 121-126.
  39. Brossog, M., Bornschlegl, M., Franke, J. (2015). Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5), 1315-1328.
  40. Brunete, A., Gambao, E., Koskinen, J., Heikkilä, T., Kaldestad, K. B., Tyapin, I., Anton, S. (2018). Hard material small-batch industrial machining robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 54, 185-199.
  41. Bruyninckx, H. (2001, May). Open robot control software: the OROCOS project. In *Proceedings 2001 ICRA. IEEE international conference on robotics and automation* (Cat. No. 01CH37164) (Vol. 3, pp. 2523-2528). IEEE.
  42. Carrino, L., Di Meo, N., Sorrentino, L., Strano, M. (2006). The influence of friction in the negative dieless incremental forming process. In *ESAFORM* pp. 207-210.
  43. Cen L, Melkote SN (2017) Effect of Robot Dynamics on the Machining Forces in Robotic Milling. *Procedia Manufacturing* 10:486–496.
  44. Chen, Y., Dong, F. (2013). Robot machining: recent development and future research issues. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9-12), 1489-1497.
-

- 
45. Cheng, K. (Ed.). (2008). *Machining dynamics: fundamentals, applications and practices*. Springer Science & Business Media.
  46. Chera I, Bologna O, Racz G, Breaz R, Crenganis M (2013) FEM researches regarding incremental forming process. *Ann Oradea Univ Fascicle Manag Technol Eng* 1:53–58.
  47. Chera, I., Bologna, O., Racz, G., Breaz, R., Crenganis, M. (2013). FEM researches regarding incremental forming process. *Annals of the Oradea University Fascicle of Management and Technological Engineering*, 1.
  48. Chiaverini, S., Siciliano, B., & Egeland, O. (1994). Review of the damped least-squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulator. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2(2), 123-134.
  49. Constantinescu D, Croft EA (2000) Smooth and Time-Optimal Trajectory Planning for Industrial Manipulators Along Specified Paths. *Journal of Robotic Systems* 17(5):233–249.
  50. Crenganiş, M., Bârsan, A., Racz, S. G., Iordache, M. D. (2018). Single point incremental forming using kuka kr6-2 industrial robot-a dynamic approach. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 13(3), 133-140.
  51. Crenganis, M., Csiszar, A. (2019). A Dynamic Model for KUKA KR6 in SPIF Processes. In *Materials Science Forum* (Vol. 957, pp. 156-166). Trans Tech Publications Ltd.
  52. Davim J.P., *Machining of Hard Materials*; Springer-Verlag 2011. ISBN 978-1-84996-449-4.
  53. Denavit, J., Hartenberg, R. S. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.
  54. Denkena B, Bergmann B, Lepper T (2017) Design and optimization of a machining robot. In: *Procedia Manufacturing*. Elsevier B.V., pp 89–96.
  55. DePree, J., Gesswein, C. (2008). *Robotic machining white paper project*. Halcyon Development-Robotic Industries Association (RIA).
  56. Ding Y, Min X, FuW, Liang Z (2018) Research and application on force control of industrial robot polishing concave curved surfaces. *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 0954405418802309.
  57. Domroes F, Krewet C, Kuhlenkoetter B (2013) Application and analysis of force control strategies to deburring and grinding. *ModMech Eng* 3:11–18.
  58. Duflou JR (2005) Force measurements for single point incremental forming: an experimental study. *Adv Mater Res* 6-8:441–448.
  59. Duflou JR, Callebaut B, Verbert J, De Baerdemaeker H (2008) Improved SPIF performance through dynamic local heating. *Int J Mach Tools Manuf* 48(5):543–549.
  60. Duflou, J. R., Behera, A. K., Vanhove, H., Bertol, L. S. (2013). Manufacture of accurate titanium cranio-facial implants with high forming angle using single point incremental forming. In *Key Engineering Materials* (Vol. 549, pp. 223-230). Trans Tech Publications Ltd.
  61. Duflou, J. R., Habraken, A. M., Cao, J., Malhotra, R., Bambach, M., Adams, D., Jeswiet, J. (2018). Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects. *International Journal of Material Forming*, 11(6), 743-773.
-

- 
62. Dufou J, Tunckol Y, Szekeres A, Vanherck P (2007) Experimental study on force measurements for single point incremental forming. *J Mater Process Technol* 189(1–3):65–72.
  63. Dumas, C., Caro, S., Garnier, S., Furet, B. (2011). Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(4), 881-888.
  64. Durante, M., Formisano, A., Langella, A., Minutolo, F. M. C. (2009). The influence of tool rotation on an incremental forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4621-4626.
  65. Durante M, Formisano A, Langella A (2011) Observations on the influence of tool-sheet contact conditions on an incremental forming process. *J Mater Eng Perform* 20(6):941–946.
  66. Echrif SBM, Hrairi M (2011) Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes. *Materials and Manufacturing Processes* 26(11): 1404–1414.
  67. Edward, L. (1967). U.S. Patent No. 3,342,051. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
  68. Elford, M., Saha, P., Seong, D., Haque, M. Z., Yoon, J. W. (2013, December). Benchmark 3-Incremental sheet forming. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1567, No. 1, pp. 227-261). American Institute of Physics.
  69. Emmens WC, Sebastiani G, van den Boogaard AH (2010) The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history. *Journal of Materials Processing Technology* 210(8): 981–997.
  70. Filice L, Ambrogio G, Micari F (2006) On-line control of single point incremental forming operations through punch force monitoring. *CIRP Ann Manuf Technol* 55(1):245–248.
  71. Fiorentino, A., Ceretti, E., Feriti, G. C., Giardini, C. (2015). Improving accuracy in aluminum incremental sheet forming of complex geometries using iterative learning control. In *Key Engineering Materials* (Vol. 651, pp. 1096-1102). Trans Tech Publications Ltd.
  72. Gatea, S., Ou, H., McCartney, G. (2016). Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming. *Int J Adv Manuf Technol*, 87(1), 479-499.
  73. Governale, A., Lo Franco, A., Panzeca, A., Fratini, L., Micari, F. (2007). Incremental forming process for the accomplishment of automotive details. In *Key Engineering Materials* (Vol. 344, pp. 559-566). Trans Tech Publications Ltd.
  74. Grand, C., Benamar, F., Plumet, F. (2010). Motion kinematics analysis of wheeled-legged rover over 3D surface with posture adaptation. *Mechanism and Machine Theory*, 45(3), 477-495.
  75. Gupta P, Szekeres A, Jeswiet J (2019) Design and development of an aerospace component with single-point incremental forming. *Int J Adv Manuf Technol* 229(5): 754.
  76. Ham, M., Powers, B. M., Loiselle, J. (2013). Surface topography from single point incremental forming using an acetal tool. In *Key Engineering Materials* (Vol. 549, pp. 84-91). Trans Tech Publications Ltd.
-

- 
77. Hartenberg, R., Danavit, J. (1964). Kinematic synthesis of linkages. New York: McGraw-Hill.
  78. He, S., Van Bael, A., Van Houtte, P., Duflou, J. R., Szekeres, A., Henrard, C., Habraken, A. M. (2005). Finite element modeling of incremental forming of aluminum sheets. In *Advanced Materials Research* (Vol. 6, pp. 525-532). Trans Tech Publications Ltd.
  79. Henrard, C., Bouffioux, C., Eyckens, P., Sol, H., Duflou, J. R., Van Houtte, P., Habraken, A. M. (2011). Forming forces in single point incremental forming: prediction by finite element simulations, validation and sensitivity. *Computational mechanics*, 47(5), 573-590.
  80. Hirt G, Bambach M (2012) Incremental Sheet Forming. In: *Altan T, Tekkaya AE (eds) Sheet metal forming: processes and applications*. ASM International, Materials Park, Ohio.
  81. Hsu, F. Y., Fu, L. C. (2000). Intelligent robot deburring using adaptive fuzzy hybrid position/force control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(4), 325-335.
  82. Huang H, Gong ZM, Chen XQ, Zhou L (2002) Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul. *J Mater Process Technol* 127:140–145 .
  83. Huang H, Zhou L, Chen XQ, Zhou L (2003) SMART robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair. *Int J Adv Manuf Technol* 21(4):275–283.
  84. Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., Cui, Z., Pang, Y. C., Dar, N. U. (2008). Tool and lubrication for negative incremental forming of a commercially pure titanium sheet. *Journal of materials processing technology*, 203(1-3), 193-201.
  85. Hussain, G., Khan, H. R., Gao, L., Hayat, N. (2013). Guidelines for tool-size selection for single-point incremental forming of an aerospace alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(3), 324-329.
  86. Huynh, H. N., Assadi, H., Riviere-Lorphevre, E., Verlinden, O., Ahmadi, K. (2020). Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101852.
  87. IFR. (2019). Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots.
  88. Iglesias, I., Sebastián, M. A., Ares, J. E. (2015). Overview of the state of robotic machining: Current situation and future potential. *Procedia engineering*, 132, 911-917.
  89. Ingarao, G., Vanhove, H., Kellens, K., Behera, A. K., Micari, F., Duflou, J. R. (2013). Energy consumption analysis of robot based SPIF.
  90. Ingarao, G., Vanhove, H., Kellens, K., Duflou, J. R. (2014). A comprehensive analysis of electric energy consumption of single point incremental forming processes. *Journal of Cleaner Production*, 67, 173-186.
  91. Ismail, N. A., Ismail, M. I. S., Radzman, M. A. M., Ariffin, M. K. A. M., As' arry, A. (2019). Parametric Optimization of Robot-based Single Point Incremental Forming Using Taguchi Method. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(1).
  92. Jeswiet, J., Hagan, E. (2001). Rapid prototyping of a headlight with sheet metal. *Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum(Canada)*,109-114.
-

- 
93. Jeswiet J, Micari F, Hirt G et al. (2005) Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. *CIRP Annals* 54(2): 88–114.
  94. Ji, W., Wang, L. (2019). Industrial robotic machining: a review. *The International Journal of Advanced manufacturing Technology*, 103(1-4), 1239-1255.
  95. Kaldestad, K. B., Tyapin, I., Hovland, G. (2015, July). Robotic face milling path correction and vibration reduction. In *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 543-548). IEEE.
  96. Kilani, L., Mabrouki, T., Ayadi, M., Chermiti, H., Belhadi, S. (2020). Effects of rolling ball tool parameters on roughness, sheet thinning, and forming force generated during SPIF process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9-10), 4123-4142.
  97. Kim J, Kim SR, Kim SJ, Kim DH (2010) A Practical Approach for Minimum-Time Trajectory Planning for Industrial Robots. *Industrial Robot: An International Journal* 37(1):51–61.
  98. Krüger, J., Lien, T. K., Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP annals*, 58(2), 628-646.
  99. Krüger, J., Surdilovic, D., Nguyen, T. M., Zhao, H., Tan, P., Dräger, K. (2011). Efficient Application of Industrial Robots for Automated Stone Sculptures Milling. In *1st International Conference on Stone and Concrete Machining*, Hannover, Hannover, Germany (pp. 105-110).
  100. Kuhlenkoetter B, Zhang X (2006) A robot system for high quality belt grinding and polishing processes. *Cutting Edge Robotics* 2006:755–770.
  101. Kumar A, Gulati V, Kumar P (2018) Investigation of process variables on forming forces in incremental sheet forming. *Int J Eng Technol* 10:680–684.
  102. Kumar, A., Gulati, V. (2018). Experimental investigations and optimization of forming force in incremental sheet forming. *Sādhanā*, 43(10), 1-15.
  103. Kumar, A., Gulati, V., Kumar, P., Singh, H. (2019). Forming force in incremental sheet forming: a comparative analysis of the state of the art. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(6), 1-45.
  104. Kumar, S. P., Elangovan, S., Mohanraj, R., Boopathi, S. (2021). Real-time applications and novel manufacturing strategies of incremental forming: An industrial perspective. *Materials Today: Proceedings*.
  105. Lamminen, L. (2005). Incremental Sheet Forming with an Industrial Robot – Forming Limits and Their Effect on Component Design. *Advanced Materials Research*, 6–8, 457–464.
  106. Le, V. S., Ghiotti, A., Lucchetta, G. (2008). Preliminary studies on single point incremental forming for thermoplastic materials. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 1179-1182.
  107. Leali F, Pellicciari M, Pini F, Berselli G, Vergnano A (2013) An offline programming method for the robotic deburring of aerospace components. In: *Neto P, Moreira AP (eds) Robotics in Smart Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 1–13.
  108. Lehmann C, Olofsson B, Nilsson K, Halbauer M, Haage M, Robertsson A, Sörnmo O, Berger U (2013) Robot Joint Modeling and Parameter Identification Using the
-

- 
- Clamping Method. *7th IFAC Conf on Manuf Modelling, Management, and Control*, 813–818.
109. Li Y, Liu Z, Daniel WJT, Meehan PA (2014) Simulation and experimental observations of effect of different contact interfaces on the incremental sheet forming process. *Mater Manuf Process* 29(2):121–128.
  110. Li Y, Daniel WJ, Liu Z, Lu H, Meehan PA (2015) Deformation mechanics and efficient force prediction in single point incremental forming. *J Mater Process Technol* 221:100–111.
  111. Li Y, Daniel WJ, Meehan PA (2017) Deformation analysis in single-point incremental forming through finite element simulation. *Int J Adv Manuf Technol* 88(1–4):255–267.
  112. Li, Y., Chen, X., Liu, Z., Sun, J., Li, F., Li, J., Zhao, G. (2017). A review on the recent development of incremental sheet-forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5-8), 2439-2462.
  113. Liu Z, Li Y, Meehan PA (2013) Experimental investigation of mechanical properties, formability and force measurement for AA7075-O aluminum alloy sheets formed by incremental forming. *Int J Precis Eng Manuf* 14(11):1891–1899.
  114. Liu, H., Wan, Y., Zeng, Z., Xu, L., Zhao, H., & Fang, K. (2016, October). Freeform surface grinding and polishing by CCOS based on industrial robot. In *8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies* (Vol. 9683, p. 96832D). International Society for Optics and Photonics.
  115. Lozano-Sánchez, L. M., Sustaita, A. O., Soto, M., Biradar, S., Ge, L., Segura-Cárdenas, E., Elías-Zúñiga, A. (2017). Mechanical and structural studies on single point incremental forming of polypropylene-MWCNTs composite sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 242, 218-227.
  116. Lozano-Sánchez, L.M.; Bagudanch, I.; Sustaita, A.O.; Iturbe-Ek, J.; Elizalde, L.E.; Garcia-Romeu, M.L.; Elías-Zúñiga, A. Single-Point Incremental Forming of Two Biocompatible Polymers: An Insight into Their Thermal and Structural Properties. *Polymers* 2018, 10, 391.
  117. Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ou, H., Moser, N. H., Cao, J. (2014). 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*, 85, 14-29.
  118. Lu, H.B.; Kearney, M.; Liu, S.; Daniel, W.J.T.; Meehan, P.A. Two-directional toolpath correction in single-point incremental forming using model predictive control. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, 91, 91–106.
  119. Lublasser, E., Braumann, J., Goldbach, D., Brell-Cokcan, S. (2016). Robotic forming: rapidly generating 3d forms and structures through incremental forming.
  120. Marques TA, Silva MB, Martins PAF (2012) On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts. *Int J Adv Manuf Technol* 60(1): 75–86.
  121. McAnulty T, Jeswiet J, Doolan M (2017) Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 16: 43–54.
-

- 
122. Meier H, Buff B, Laurischkat R, Smukala V (2009) Increasing the Part Accuracy in Dieless Robot-Based Incremental Sheet Metal Forming. *CIRP Annals Manufacturing Technology* 58:233–238.
  123. Meier, H., Zhu, J., Buff, B., Laurischkat, R. (2012). CAx process chain for two robots based incremental sheet metal forming. *Procedia CIRP*, 3, 37-42.
  124. Micari F, Ambrogio G, Filice L (2007) Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends. *Journal of Materials Processing Technology* 191(1-3): 390–395.
  125. Mohammad, A. E. K., Hong, J., Wang, D., Guan, Y. (2019). Synergistic integrated design of an electrochemical mechanical polishing end-effector for robotic polishing applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55, 65-75.
  126. Mohammed, A., Schmidt, B., Wang, L., Gao, L. (2014). Minimizing energy consumption for robot arm movement. *Procedia Cirp*, 25, 400-405.
  127. Mohanty, S., Regalla, S. P., Rao, Y. D. (2021). Effect of inclination and rotation of the sheet on sheet thinning and formability in robot assisted incremental sheet metal forming. *Materials Today: Proceedings*.
  128. Müller, E., Engelmann, J., Löffler, T., Jörg, S. (2009). *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*. Springer-Verlag.
  129. Nagata, F., Otsuka, A., Watanabe, K., Habib, M. K. (2015). Machining robot for foamed polystyrene materials using fuzzy feed rate controller. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 5(1), 34-43.
  130. Nagata, F., Watanabe, K., Habib, M. K. (2018). Machining robot with vibrational motion and 3D printer-like data interface. *International Journal of Automation and Computing*, 15(1), 1-12.
  131. Nasulea, D., Oancea, G. (2021). Achieving accuracy improvements for single-point incremental forming process using a circumferential hammering tool. *Metals*, 11(3), 482.
  132. Nicholas, P., Stasiuk, D., Nørgaard, E., Hutchinson, C., Thomsen, M. R. (2016). An integrated modelling and toolpathing approach for a frameless stressed skin structure, Fabricated using robotic incremental sheet forming. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 62-77). Springer, Cham.
  133. Oleksik V, Pascu A, Gavrus A, Oleksik M (2010) Experimental studies regarding the single point incremental forming process. *Acad J Manuf Eng* 8(2):51–56.
  134. Oleksik, V. (2014). Influence of geometrical parameters, wall angle and part shape on thickness reduction of single point incremental forming. *Procedia Engineering*, 81, 2280-2285.
  135. Owen, W. S., Croft, E., Benhabib, B. (2003). Minimally compliant trajectory resolution for robotic machining. In *International Conference on Advanced Robotics (ICAR) 2003*.
  136. Owen, W. S., Croft, E. A., Benhabib, B. (2006). Real-time trajectory resolution for a two-manipulator machining system. *Journal of Robotic Systems*, 22(S1), S51-S63.
  137. Ozgoren, M. K. (2020). *Kinematics of General Spatial Mechanical Systems*. John Wiley & Sons.
-



- 
138. Paes, K., Dewulf, W., Vander Elst, K., Kellens, K., Slaets, P. (2014). Energy efficient trajectories for an industrial ABB robot. *Procedia Cirp*, 15, 105-110.
  139. Pan, Z., Zhang, H. (2008, June). Robotic machining from programming to process control. In *2008 7th world congress on intelligent control and automation* (pp. 553-558). IEEE.
  140. Pandremenos, J., Doukas, C., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G. (2011). Machining with robots: a critical review. *Proceedings of DET2011*, 1-9.
  141. Paniti I (2014) A novel, single-robot based two sided incremental sheet forming system, ISR/ROBOTIK. *41st International Symposium on Robotics, Proceedings of VDE*.
  142. Paniti, I. (2020). Study on Effecting Parameters of Flat and Hemispherical end Tools in SPIF of Aluminium Foils. *Tehnički vjesnik*, 27(6), 1844-1849.
  143. Park, J. J., Kim, Y. H. (2003). Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 447-453.
  144. Pathak, J. (2017). A brief review of Incremental sheet metal forming. *International Journal of Latest Engineering and Management Research*, 2(3), 35-43.
  145. Petek A, Kuzman K, Kopac J (2009) Deformations and forces analysis of single point incremental sheet metal forming. *Arch Mater Sci Eng* 35(2):107–116.
  146. Pires JN, Ramming J, Rauch S, Araujo R (2002) Force/torque sensing applied to industrial robotic deburring. *Sens Rev* 22(3):232–241.
  147. Racz, S. G., Breaz, R. E., Tera, M., Gîrjob, C., Biriş, C., Chicea, A. L., & Bologa, O. (2018). Incremental Forming of Titanium Ti6Al4V Alloy for Cranioplasty Plates—Decision-Making Process and Technological Approaches. *Metals*, 8(8), 626.
  148. Racz, G. S., Breaz, R. E., Oleksik, V. S., Bologa, O. C., Brîndaşu, P. D. (2019, October). Simulated 3-axis versus 5-axis Processing Toolpaths for Single Point Incremental Forming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 564, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.
  149. Rena X, Kuhlenkottera B, Muller H (2006) Simulation and verification of belt grinding with industrial robots. *Int J Mach Tool Manuf* 46:708–716.
  150. Sbayti, M., Bahloul, R., Belhadjsalah, H. (2020). Efficiency of optimization algorithms on the adjustment of process parameters for geometric accuracy enhancement of denture plate in single point incremental sheet forming. *Neural Computing and Applications*, 32(13), 8829-8846.
  151. Schafer T, Dieter Schraft R (2005) Incremental sheet metal forming by industrial robots. *Rapid Prototyp J* 11(5):278–286.
  152. Scheffler S, Pierer A, Scholz P et al. (2019) Incremental sheet metal forming on the example of car exterior skin parts. *Procedia Manufacturing* 29: 105–111.
  153. Shabana, A. (2020). Dynamics of multibody systems. Cambridge university press.
  154. Shi X, Zhang F, Qu X, Liu B (2016) An Online Real-Time Path Compensation System for Industrial Robots Based on Laser Tracker. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13(5). 1729881416663366.
  155. Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. (2020). Robot modeling and control. John Wiley & Sons.
-

- 
156. Sufian M, Chen X, Yu D (2017) Investigating the capability of precision in robotic grinding. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Automation & Computing*.Huddersfield, UK.
  157. Tanaka, S. (2005). Incremental sheet metal forming process for pure titanium denture plate. *Advanced Technology of Plasticity*.
  158. Tera, M., Bologna, O., Breaz, R., CHERA, I., Tirnovan, S. (2012). Study of Incremental Deep-Drawing Of Bimetallic Sheets. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 7(4).
  159. Trzepieciński, T., Oleksik, V., Pepelnjak, T., Najm, S. M., Paniti, I., Maji, K. (2021). Emerging trends in single point incremental sheet forming of lightweight metals. *Metals*, 11(8), 1188.
  160. Tyapin, I., Hovland, G., Kosonen, P., & Linna, T. (2014, September). Identification of a static tool force model for robotic face milling. In *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)* (pp. 1-6). IEEE.
  161. Verbert, J., Belkassam, B., Henrard, C., Habraken, A. M., Gu, J., Sol, H., Duflou, J. R. (2008). Multi-Step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming. *International journal of material forming*, 1(1), 1203-1206.
  162. Verbert, J., Aereens, R., Vanhove, H., Aertbeliën, E., Duflou, J. R. (2009). Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported SPIF. In *Key Engineering Materials* (Vol. 410, pp. 679-687). Trans Tech Publications Ltd.
  163. Vergeest, J. S., & Tangelder, J. W. (1996). Robot machines rapid prototype. *Industrial Robot: An International Journal*.
  164. Vihtonen, L., Puzik, A., Katajarinne, T. (2008). Comparing two robot assisted incremental forming methods: incremental forming by pressing and incremental hammering. *International Journal of Material Forming*, 1(1), 1207-1210.
  165. Villagrossi E, Pedrocchi N, Beschi M, Molinari Tosatti L (2018) A human mimicking control strategy for robotic deburring of hard materials. *Int J Comput Integr Manuf* 31:869–880.
  166. Wang J, Nair M, Zhang Y (2016) An efficient force prediction strategy in single point incremental sheet forming. *Proc Manuf* 5:761–771.
  167. Wang, C., He, A., Weegink, K. J., Liu, S., Meehan, P. A. (2020). 3D surface representation and trajectory optimization with a learning-based adaptive model predictive controller in incremental forming. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 796-810.
  168. Wilbert, A. D., Behrens, B., Dambon, O., Klocke, F. (2012, October). Robot assisted manufacturing system for high gloss finishing of steel molds. In *International Conference on Intelligent Robotics and Applications* (pp. 673-685). Springer, Berlin, Heidelberg.
  169. Wu, S., Ma, Y., Gao, L., Zhao, Y., Rashed, S., Ma, N. (2020). A novel multi-step strategy of single point incremental forming for high wall angle shape. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 697-706.
-

- 
170. Xiao, W., Strauß, H., Looß, T., Hoffmeister, H. W., Hesselbach, J. (2011). Closed-form inverse kinematics of 6R milling robot with singularity avoidance. *Production Engineering*, 5(1), 103-110.
  171. Xie, S., Li, S., Chen, B., Qi, J. (2017, August). Research on robot grinding technology considering removal rate and roughness. In *International Conference on Intelligent Robotics and Applications* (pp. 79-90). Springer, Cham.
  172. Yamashita, M., Gotoh, M., Atsumi, S. Y. (2008). Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of materials processing technology*, 199(1-3), 163-172.
  173. Yan S, Xu X, Yang Z, Zhu D, Ding H (2019) An improved robotic abrasive belt grinding force model considering the effects of cut-in and cut-off. *J Manuf Process* 37:496–508.
  174. Zäh MF, Rösch O (2014) Improvement of the Machining Accuracy of Milling Robots. *Production Engineering* 8(6):737–744.
  175. Zhang, H., Wang, J., Zhang, G., Gan, Z., Pan, Z., Cui, H., Zhu, Z. (2005, July). Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance. In *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. (pp. 1127-1132). IEEE.
  176. Zhu, D., Luo, S., Yang, L., Chen, W., Yan, S., Ding, H. (2015). On energetic assessment of cutting mechanisms in robot-assisted belt grinding of titanium alloys. *Tribology International*, 90, 55-59.
  177. Zhu, H., Wang, H., Liu, Y. (2019). Tool path generation for the point-pressing-based 5-axis CNC incremental forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9), 3459-3477.
  178. \*\*\*ABB Robotics. [www.abb.com/robotics](http://www.abb.com/robotics). Accesat la data de 20.02.2019.
  179. \*\*\*ARAMIS User Manual – Software.
  180. \*\*\*ATOS Core User Manual – Software.
  181. \*\*\*Beauvary, <http://www.beauvary.com/index.php/en/products>, Accesat la 17.06.2019.
  182. \*\*\*Fanuc Robotics. [www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com). Accesat la data de 20.02.2019.
  183. \*\*\*Kuka Robot Group. [www.kuka-robotics.com](http://www.kuka-robotics.com). Accesat la data de 12.03.2020.
  184. \*\*\*LS-DYNA Keyword User's Manual R12.0 Vol. I. Vol. II. Vol. III
  185. \*\*\*CAD to MATLAB to Simscape Multibody (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47070-cad-to-matlab-to-simscape-multibody>), MATLAB Central File Exchange. Accesat la data de 28.04.2021.
  186. \*\*\*Planul Național Integrat în domeniul Energiei și Schimbărilor Climatice 2021-2030, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ro\\_final\\_necp\\_main\\_ro.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ro_final_necp_main_ro.pdf), Accesat la 12.05.2020
  187. \*\*\*The Robotic Industries Association, [www.robotics.org](http://www.robotics.org), Accesat la 26.10.2018.
  188. \*\*\*Siemens. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/>. Accesat la data de 26.02.2019.
  189. \*\*\*SprutCAM User Manual.
-

- 
190. \*\*\*SR EN ISO 6892-1:2020 - *Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metodă de încercare la temperatura ambiantă.*
  191. \*\*\*SR EN ISO 10275:2020 - *Materiale metalice. Table și benzi. Determinarea coeficientului de ecruisare la tracțiune.*
  192. \*\*\*Stäubli. <https://www.staubli.com/>. Accesat la data de 25.02.2019.
  193. \*\*\*Yaskawa Motoman Robotics. [www.motoman.com](http://www.motoman.com). Accesat la data de 25.02.2019