MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Școala Doctorală de Inginerie Industrială și Robotică
Școala Doctorală de Inginerie Industrială (Pitești)

BĂDULESCU V. Emanuel

TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMATUL EXTINS-

Contribuții la studiul, modelarea și dezvoltarea inovativă privind procesul și sistemul de prelucrare prin deformare plastică incrementală, cercetarea experimentală a unor caracteristici de proces și a calității pieselor fabricate

***Conducători științifici*,**
Prof. univ. dr. ing. Marian GHEORGHE
Prof. univ. dr. ing. Eduard Laurențiu NIȚU

- 2025 -

Cuprins

	Teză	Rez
Cuvânt înainte	(3)	3
Introducere	(4)	4
Legendă	(5)	-
Partea I. Stadiul actual privind cercetarea-dezvoltarea şi aplicaţiile industriale ale prelucrării prin deformare plastică incrementală		
Capitolul 1. Caracteristici generale ale proceselor de deformare plastică incrementală	(9)	5
1.1. Procedee de deformare plastică incrementală	(9)	5
1.2. Materiale pentru piesele prelucrate prin deformare plastică incrementală	(12)	5
1.3. Tipuri de piese prelucrate prin deformare plastică incrementală	(14)	6
1.4. Sisteme tehnologice de prelucrare prin deformare plastică incrementală	(16)	6
1.5. Aplicaţii ale deformării plastice incrementale	(22)	7
Capitolul 2. Elemente privind stadiul cunoaşterii proceselor de prelucrare prin deformare plastică incrementală într-un singur punct	(25)	8
2.1. Studii privind deformabilitatea materialelor pieselor şi forţele de prelucrare	(25)	8
2.2. Studii privind traiectoria sculei	(28)	8
2.3. Studii privind calitatea pieselor prelucrate	(31)	9
2.4. Studii referitoare la modelarea şi simularea numerică a procesului SPIF	(38)	10
Capitolul 3. Concluzii privind stadiul actual al cercetării – dezvoltării şi aplicaţiilor industriale ale deformării plastice incrementale	(43)	11
Partea a II-a. Contribuţii la cercetarea teoretico-experimentală şi modelarea numerică a procesului de deformare plastică incrementală		
Capitolul 4. Direcţiile, obiectivul principal şi metodologia de cercetare-dezvoltare a procesului şi sistemului de deformare plastică incrementală	(47)	14
4.1. Direcţii de cercetare – dezvoltare	(47)	14
4.2. Obiectivul principal al activităţii de cercetare - dezvoltare	(47)	14
4.3. Metodologia de cercetare – dezvoltare	(50)	15
Capitolul 5. Elemente ale sistemului de cercetare experimentală a procesului de deformare plastică incrementală	(53)	17
5.1. Caracteristici ale aliajului AA6061-T6	(53)	17
5.2. Elemente ale sistemului tehnologic de deformare plastică incrementală şi ale sistemelor de măsurare din timpul procesului	(55)	17
5.2.1. Forma şi dimensiunile semifabricatelor de prelucrat	(55)	17
5.2.2. Maşina-unealtă şi dispozitivul de orientare-fixare a semifabricatului	(55)	17
5.2.3. Sculă inovativă cu rază variabilă pentru deformare plastică incrementală	(60)	18
5.2.4 Scule cu cap semisferic pentru deformare plastică incrementală	(63)	20

5.2.5. Sisteme de măsurare în timp real a rezultantelor de proces..... (63) 20
5.3. Metode şi mijloace utilizate pentru măsurarea unor caracteristici ale pieselor prelucrate..... (65) 20
5.4. Planificarea experimentelor..... (66) 21
Capitolul 6. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influenţa formei sculei asupra forţei şi temperaturii din procesul de deformare plastică incrementală..... (71) 22
6.1. Standul experimental pentru măsurarea forţei şi temperaturii de prelucrare..... (71) 22
6.2. Analiza contactului dintre sculă şi semifabricat..... (73) 22
6.3. Rezultate privind forţa de prelucrare..... (75) 22
6.4. Rezultate privind temperaturile de prelucrare..... (83) 24
Capitolul 7. Dezvoltarea unei metodologii de măsurare prin scanare 3D a geometriei piesei prelucrate ..... (93) 26
7.1. Tehnica de scanare..... (93) 26
7.2. Metodologia de determinare a parametrilor de precizie geometrică a piesei..... (94) 26
7.2.1. Descrierea metodologiei..... (94) 26
7.2.2. Validarea modulului de calcul al grosimii peretelui piesei..... (97) 27
Capitolul 8. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influenţa formei sculei asupra calităţii pieselor prelucrate prin deformare plastică incrementală..... (99) 28
8.1. Standul experimental pentru prelucrarea pieselor şi pregătirea eşantioanelor pentru măsurare..... (99) 28
8.2. Microaşchiile de prelucrare. Aspectul vizual al suprafeţelor prelucrate..... (101) 28
8.3. Precizia geometrică a pieselor prelucrate..... (106) 29
8.4. Rugozitatea suprafeţelor pieselor prelucrate..... (122) 31
8.5. Microduritatea stratului superficial al pieselor prelucrate..... (130) 32
Capitolul 9. Modelarea şi simularea numerică a procesului de deformare plastică incrementală..... (135) 34
9.1. Construirea modelelor numerice..... (135) 34
9.2. Caracterizarea comportamentului termo-mecanic al aliajului AA6061-T6..... (138) 35
9.3. Simularea şi validarea modelelor numerice..... (143) 35
Capitolul 10. Analiza comparativă a proceselor de deformare plastică incrementală cercetate..... (151) 38
Capitolul 11. Concluzii finale şi contribuţii principale la dezvoltarea şi modelarea numericăa procesului de deformare plastică incrementală ..... (165) 42
Lista lucrărilor publicate, rezultate în cadrul cercetărilor ştiinţifice din programul de studii universitare de doctorat..... - 46
Bibliografie (selectivă)..... (171) 47
Anexe ..... (181) 50

Cuvânt înainte

Dezvoltarea unei scule inovative pentru deformare plastică incrementală, precum şi analiza şi îmbunătăţirea calităţii pieselor în formă de trunchi de con din aliaj de aluminiu AA6061-T6 obţinute prin deformare plastică incrementală într-un singur punct, reprezintă *motivaţia* dar și *direcţia* studiilor de doctorat, finalizate prin prezenta teză de doctorat.

Programul de doctorat a constat, într-o primă fază, în analiza literaturii ştiinţifice din domeniul deformării plastice incrementale, pregătirea, prezentarea și susținerea examenelor și a rapoartelor științifice. În a doua fază a acestor studii doctorale, s-au proiectat, dezvoltat și testat un dispozitiv modular de orientare și fixare a semifabricatului şi o sculă inovativă, care asigură numeroase avantaje la utilizarea lor în procesul de deformare plastică incrementală. Ulterior, s-a realizat un studiu aprofundat al fenomenelor ce au loc în timpul prelucrării prin deformare plastică incrementală şi s-a evaluat calitatea pieselor prelucrate cu scule cu geometrii diferite, prin utilizarea de mijloace de investigare experimentale și numerice, conform metodologiei de cercetare-dezvoltare elaborate. Astfel, a fost analizată influența parametrilor de proces asupra unor mărimi rezultante, s-a realizat o metodologie experimentală de determinare a preciziei geometrice a pieselor prin utilizarea scanării tridimensionale și s-au dezvoltat modele numerice pentru investigarea aprofundată a procesului de deformare plastică incrementală.

Cu o deosebită considerație adresez profunde mulțumiri domnului Prof. univ. dr. ing. Marian GHEORGHE și domnului Prof. univ. dr. ing. Eduard Laurențiu NIȚU, pentru îndrumarea științifică și coordonarea întregii activități de parcurgere a programului de doctorat, sprijinul, deplina încredere și disponibilitatea totală acordate în această perioadă.

Adresez mulțumiri membrilor *Comisiei de îndrumare şi integritate academică:* doamnei Prof.univ.dr.ing. Daniela Monica IORDACHE, domnului Conf.univ.dr.ing. Alin Daniel RIZEA, domnului Şef lucrări dr.ing. Daniel MANOLACHE şi domnului Prof.univ.dr.ing. Bogdan CHIRIŢĂ.

Adresez profunde mulțumiri domnului Conf.dr.ing. Yannick ARGOUARC'H și domnului Prof.dr.ing. Claudiu BĂDULESCU din cadrul ENSTA – campus de Brest, sub a căror îndrumare am dezvoltat și validat o metodă robustă de scanare și prelucrare a datelor pentru măsurarea fără contact a preciziei geometrice a pieselor obținute prin deformare plastică incrementală într-un singur punct.

Exprim mulțumiri domnului dr.ing. Claudiu Ionuț MALEA, pentru sprijinul acordat la realizarea și operarea echipamentelor în timpul realizării experimentelor, domnului Şef lucrări dr.ing. Simăn Victor IORGA pentru asistența în timpul scanării pieselor, și doamnei dr. ing. Ecaterina-Magdalena MODAN pentru sprijinul și disponibilitatea în vederea măsurării microdurității pieselor.

Sunt recunoscător familiei mele şi colegilor din cadrul companiei în care îmi desfășor activitatea, pentru suportul moral și înțelegerea manifestate pe toată perioada studiilor de doctorat.

Activitățile în cadrul studiilor doctorale s-au desfășurat la Universitatea POLITEHNICA din București şi Universitatea din Piteşti, conform Contractului de colaborare doctorală încheiat între cele două instituții, reunite ulterior în Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București.

Emanuel Bădulescu

Introducere

Tendințele industriale actuale de personalizare a produselor conform cerințelor impuse de client au contribuit la dezvoltarea tehnologiilor de fabricație flexibile ce permit configurații particulare. Una dintre aceste tehnologii este deformarea plastică incrementală într-un singur punct.

Activitatea de cercetare – dezvoltare din cadrul programului de doctorat se focalizează pe dezvoltarea unui sistem de deformare plastică incrementală prin realizarea unui dispozitiv de orientare și fixare a semifabricatului, dezvoltarea unei noi scule inovative și validarea aspectelor inovatoare.

* * *

În partea de început a tezei de doctorat, pe baza analizei stadiului actual al cercetării – dezvoltării, se prezintă date relevante privind procesele și sistemele de deformare plastică incrementală într-un singur punct, cu avantajele și dezavantajele pe care le posedă.

În a doua parte a tezei de doctorat, pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se definesc direcţiile de cercetare – dezvoltare privind procesele de deformare plastică incrementală și se determină ca obiectiv principal de cercetare – dezvoltare în cadrul doctoratului: dezvoltarea procesului și sistemului de deformare plastică incrementală într-un singur punct a pieselor din aliaj de aluminiu AA6061-T6, prin cercetare teoretico-experimentală și simulare numerică.

În continuare, metodologia de cercetare – dezvoltare reprezintă elementul de referință pentru îndeplinirea obiectivului principal al activității de doctorat. Cercetările teoretico-experimentale realizate s-au materializat în:

- Dezvoltarea unui dispozitiv tehnologic configurabil de orientare și fixare a semifabricatului în vederea prelucrării prin deformare plastică incrementală într-un singur punct. Acesta aduce elemente de noutate prin faptul că permite măsurarea simultană a forțelor și temperaturilor în timpul procesului, prezintă rigiditate ridicată și poate fi configurat în funcție de dimensiunile pieselor prelucrate.
- Proiectarea și realizarea unei scule inovative cu cap excentric și rază variabilă (ETVR), sculă care reduce semnificativ forțele de deformare și îmbunătățește calitatea suprafețelor obținute prin utilizarea acesteia.
- Realizarea de prelucrări prin deformare plastică incrementală într-un singur punct cu scula inovativă şi cu scule cu cap semisferic şi evaluarea calităţii pieselor prelucrate pentru a pune în evidență caracteristicile sculei inovative comparativ cu cele ale sculelor cu cap semisferic.

Cercetarea procesului de deformare plastică incrementală a fost aprofundată prin dezvoltarea unor modele numerice utilizând softul ABAQUS şi simularea procesului de deformare plastică incrementală.

Partea finală a tezei de doctorat prezintă concluziile generale și contribuțiile principale aduse de teza de doctorat la realizarea obiectivului principal al activității doctorale de cercetare – dezvoltare, importanța științifică a tezei de doctorat, importanța practică a tezei de doctorat și direcțiile de dezvoltare privind îmbunătățirea procesului de deformare plastică incrementală utilizând scula inovativă dezvoltată.

Partea I.

Stadiul actual privind cercetarea-dezvoltarea și aplicațiile industriale ale prelucrării prin deformare plastică incrementală

Capitolul 1. Caracteristici generale ale proceselor de deformare plastică incrementală

1.1. Procedee de deformare plastică incrementală

Deformarea plastică incrementală s-a dezvoltat de la o simplă idee tehnică, care a fost prezentată într-un patent al lui Edward Leszak în 1967 [S14], [L01], dar care nu a avut o implementare reală. Procedeele de deformare rotativă, respectiv, deformare prin întindere [N01], [G03] sunt considerate a fi precursoarele deformării plastice incrementale.

Deformarea plastică incrementală cu poanson utilizează o sculă sub formă de poanson ale cărui dimensiuni sunt relativ mici. Contactul dintre sculă și semifabricat este continuu și se realizează pe o suprafață mică [B14]. O schemă de lucru specifică procedeului de deformare plastică incrementală cu poanson se prezintă în Fig.1.5 [N01].

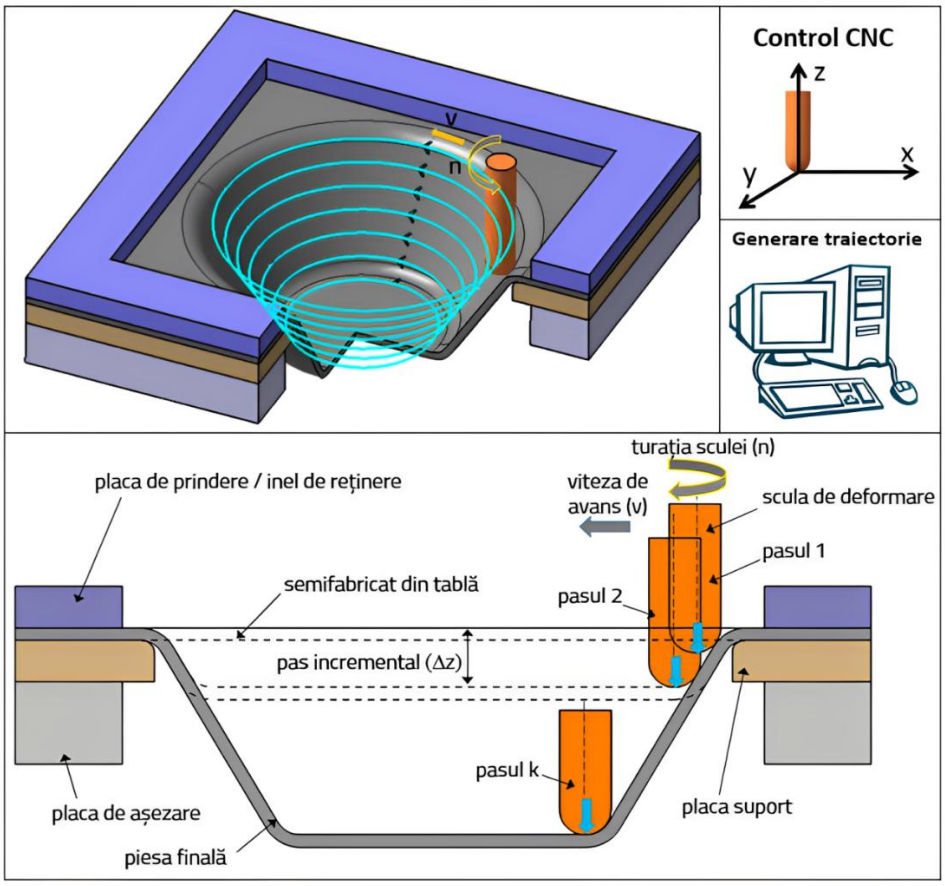


Fig.1.5. Schemă de lucru specifică procedeului de deformare plastică incrementală cu poanson [N01]

Scula (poansonul) se deplasează după o traiectorie programată cu ajutorul comenzii numerice, în funcție de forma piesei de realizat, iar parametrii tehnologici sunt: turația sculei - n [rot/min], viteza de avans a sculei – Va [mm/min] și pasul incremental - Δz [mm], definit ca distanța dintre două niveluri succesive [N01].

1.2. Materiale pentru piesele prelucrate prin deformare plastică incrementală

Materialele utilizate la prelucrarea prin deformare plastică incrementală sunt, în general, aceleași cu cele utilizate la deformarea plastică clasică, dar pot fi utilizate și materiale specifice. Alegerea materialelor utilizate în aceste prelucrări este determinată, în primul rând, de cerinţele funcţionale ale

piesei de realizat, dar şi de cerinţele impuse de procedeul de prelucrare. Cerinţele funcţionale ale piesei depind de produsul/industria din care acestea fac parte: industria auto, aeronautică, biomedicală sau altă industrie.

1.3. Tipuri de piese prelucrate prin deformare plastică incrementală

Prin deformare plastică incrementală se poate prelucra o diversitate relativ mare de piese, de forme geometrice simple sau complexe, cu axe de simetrie sau fără axe de simetrie. Forma şi dimensiunile acestora sunt impuse de scopul cercetării sau utilizării acestora şi de procedeul de prelucrare utilizat. Principalele tipuri de piese prelucrate prin deformare plastică incrementală, identificate în bibliografia studiată sunt: piese cu formă geometrică simplă, piese cu formă geometrică de complexitate medie şi piese cu formă geometrică de complexitate ridicată.

1.4. Sisteme tehnologice de prelucrare prin deformare plastică incrementală

Maşini-unelte pentru deformarea plastică incrementală

Procedeele de prelucrare prin deformare plastică incrementală se pot aplica cu eficienţă ridicată pe *maşini-unelte destinate prelucrărilor mecanice prin aşchiere,* care dezvoltă forţe suficient de mari şi au o rigiditate ridicată. Pentru generarea formelor geometrice complexe ale pieselor, aceste maşini trebuie să aibă echipament cu comandă numerică - CNC.

Cele mai utilizate maşini-unelte pentru realizarea procedeelor de deformare plastică incrementală sunt maşinile de frezat cu comandă numerică [B14], [A09], [B11]. Pe aceste maşini se pot executa piese simple și piese cu geometrii complexe, deoarece aceste maşini sunt controlate numeric cel puţin pe trei direcții de deplasare a sculei [N01]. De asemenea, rigiditatea ridicată, programarea flexibilă a acestora, precum şi posibilitatea utilizării în timpul prelucrării a unor echipamente de cercetare conexe, cum sunt sistemele de măsurare a forţelor şi temperaturii, constituie atuuri în utilizarea lor.

Dispozitive de orientare şi fixare a semifabricatelor

Odată cu dezvoltarea procedeelor de deformare plastică incrementală au fost dezvoltate și fabricate mai multe tipuri constructive de dispozitive de orientare şi fixare a semifabricatelor, mai simple sau mai complexe, utilizându-se diverse soluții în funcție de mașina-unealtă folosită, de forma piesei de realizat sau de necesitățile impuse de cercetarea procesului.

Scule pentru deformarea plastică incrementală

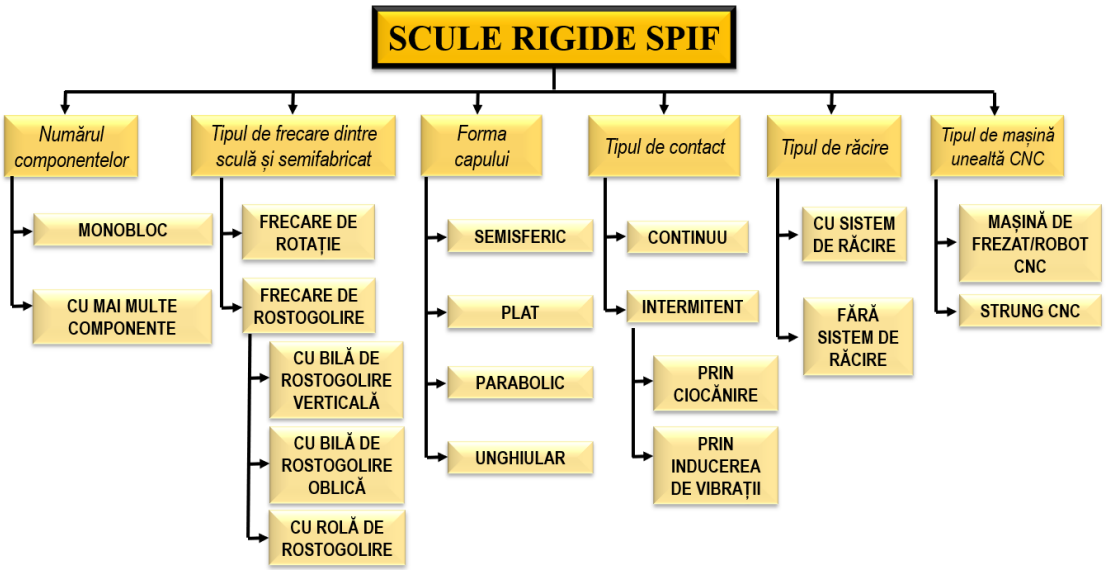


Fig.1.22. Clasificare a sculelor utilizate la prelucrarea prin deformare plastică incrementală într-un singur punct (SPIF) [B04]

Sculele folosite cel mai des în procesele SPIF sunt cele de tip poanson. În general, cercetătorii și utilizatorii proiectează și execută tipul de sculă în funcție de sistemul de fixare pe mașina-unealtă utilizată, deoarece nu există furnizori care să livreze scule standardizate [J05], [N06]. O clasificare a sculelor utilizate în SPIF, realizată prin analiza literaturii de specialitate pe baza criteriilor (număr de componente, tip de frecare dintre sculă și semifabricat, forma capului, tip de contact, tip de răcire și tip mașină-unealtă utilizată), se prezintă în Fig.1.22.

Principalele tipuri de scule utilizate în SPIF, împreună cu avantajele și dezavantajele utilizării acestora se prezintă în cele ce urmează.

Sculele rigide cu cap semisferic sunt cele mai utilizate poansoane și cele mai diverse din punct de vedere constructiv.

Sculele rigide cu cap plat sunt poansoane simple și foarte asemănătoare cu cele cu cap semisferic. Sunt formate dintr-o tijă circulară cu diametrul „D”, iar suprafața plană de la capătul tijei este conectată cu o rază de conectare „r”.

Sculele cu bilă sunt scule mai complexe în comparație cu cele monobloc, fiind alcătuite dintr-un corp și o parte mobilă, de obicei o bilă sau roată de rulare. Diferenţa principală între acestea şi sculele monobloc este dată de modul de realizare a frecării dintre sculă şi semifabricat: la deformarea cu sculă rigidă, cum ar fi cea cu cap semisferic, frecarea este de alunecare; la deformarea cu scula cu bilă frecarea este de rostogolire.

1.5. Aplicații ale deformării plastice incrementale

Datorită flexibilității sale ridicate și costurilor reduse de fabricație, procedeele de deformare plastică incrementală pot fi utilizate pentru o gamă largă de aplicații, de la prototiparea rapidă în industria auto, aerospațială sau navală, până la producția de componente în domeniile medical şi al produselor electrocasnice [M14], [C01], [K04], [T07], [L06], [S04], [A01], [B08], [G07], [A04]. Unele exemple relevante în acest sens se prezintă în cele ce urmează.

Piese din industria auto

Aplicațiile deformării plastice incrementale în industria auto sunt în legătură cu o gamă variată de repere fabricate în serie limitată, în loturi mici, fie ca piese de schimb sau ca repere personalizate.

Un prim exemplu îl reprezintă cel al unor piese de complexitate ridicată, cum sunt blocul optic şi galeria de evacuare.

Mai multe aplicații din industria auto au fost realizate de firma Amino Corporation. Una dintre acestea, realizată în colaborare cu Honda Motors, a constat în reproducerea unui număr limitat de piese de schimb pentru un model clasic de automobil care nu se mai fabrica din 1970, respectiv, panoul capotei mașinii HONDA S800.

Piese din domeniul medical

Utilizarea deformării plastice incrementale este întâlnită şi în domeniul medical, pentru fabricarea mai multor tipuri de proteze utilizate în diferite zone ale corpului uman. Caracteristicile acestor piese constau în faptul că acestea sunt unicate, fiind personalizate în funcţie de pacientul care le va utiliza. Materialele utilizate în domeniul medical trebuie să îndeplinească anumite cerințe specifice pentru a fi utilizate, cum ar fi: biocompatibilitatea, ușurința de modelare, rezistența mecanică, dar greutatea să fie redusă, conductivitatea electrică și termică scăzută, costurile de fabricație scăzute etc. La implanturile medicale se pot utiliza materiale sintetice ca de exemplu: metalice, polimerice și ceramice [B05].

Piese din alte domenii industriale

Practic, procedeele de deformare plastică incrementală pot fi aplicate pentru realizarea pieselor din tablă din toate domeniile industriale.

Capitolul 2. Elemente privind stadiul cunoaşterii proceselor de prelucrare prin deformare plastică incrementală într-un singur punct

2.1. Studii privind deformabilitatea materialelor pieselor și forțele de prelucrare

Deformabilitatea unui material reprezintă capacitatea acestuia de a fi deformat plastic fără apariţia unor condiţii nedorite [H07]. Dintre condiţiile nedorite fac parte: fisurarea sau ruperea materialului în timpul procesului de deformare plastică, calitatea necorespunzătoare a suprafeţei (macro-asperităţi), apariţia unor defecte (cutare, ondulare etc.) sau alte condiţii impuse comercial. În general, factorii care influenţează deformabilitatea sunt dependenţi de caracteristicile materialului prelucrat (compoziţie chimică, structură, proprietăţi mecanice) şi de procesul de deformare (starea de tensiuni şi deformaţii, temperatura şi viteza de deformare, frecarea dintre sculă şi semifabricat etc.) [M02].

Forțele de prelucrare din SPIF reflectă starea de tensiune-deformație care apare în timpul procesului de deformare și pot indica zonele cu risc de rupere sau exces de subțiere a semifabricatului. Analiza acestora reprezintă o altă direcţie de cercetare a proceselor SPIF, fiind considerate foarte importante pentru asigurarea integrităţii piesei, selectarea echipamentului de prelucrare şi consumul energetic al procesului

Studiile din literatura de specialitate scot în evidenţă că forţa axială, pe direcţia axei de simetrie a piesei de prelucrat - Fz, este componenta principală a forţei de deformare, având mărimea cea mai mare. Aceasta determină alungirea plastică a materialului, în timp ce forța radială - Fr și forța tangențială – Ft, de mărime mult mai mică, determină redistribuirea materialului în planul semifabricatului.

2.2. Studii privind traiectoria sculei

La deformarea pe strunguri CNC, când mișcarea de rotație este realizată de semifabricat, traiectoria de deplasare a sculei este una simplă, fiind o curbă generatoare care corespunde cu profilul interior sau exterior al piesei. La deformarea pe mașinile de frezat, pe mașinile specializate sau cu roboți industriali, traiectoria este mult mai complexă, deoarece semifabricatele orientate și fixate în dispozitivul montat pe masa mașini nu au nicio deplasare, iar scula efectuează toate mișcările necesare realizării procesului de deformare plastică incrementală. Programarea acestor traiectorii este destul de laborioasă și, de cele mai multe ori, se folosesc softuri specializate.

Traiectoria sculei reprezintă un element esențial în procesul de deformare plastică incrementală, deoarece influenţează modul de deformare a materialului, solicitările mecanice și calitatea piesei (uniformitatea grosimii pereților, abaterile dimensionale, rugozitatea) [N01], [J05]. De aceea, cercetările întreprinse în acest sens au analizat mai multe tipuri de traiectorii ale sculei.

Traiectoria pe niveluri este formată dintr-o succesiune de curbe în plan, care urmează conturul piesei la fiecare nivel în care este împărțită piesa pe direcție verticală [L05], [N01]. Distanţa dintre două niveluri reprezintă pasul incremental Δz.

Traiectoria elicoidală este formată dintr-o singură curbă, elicoidală, care începe de la nivelul semifabricatului nedeformat și se termină la fundul piesei, când piesa este complet deformată [L05], [N01].

Traiectoriile cu treceri multiple au fost dezvoltate ca alternative la traiectoriile simple, cu scopul de a elimina din dezavantajele acestora. Deformarea incrementală a piesei se realizează prin treceri repetate ale sculei, forma finală a piesei rezultând ca urmare a unor treceri succesive ale sculei, care se realizează printr-una din cele două traiectorii menţionate anterior.

2.3. Studii privind calitatea pieselor prelucrate

Calitatea pieselor prelucrate prin SPIF reprezintă un factor critic pentru validarea tehnologiei utilizate şi aplicarea industrială a acesteia. De aceea, în literatura de specialitate sunt prezentate multe studii referitoare la principalii parametri prin care este caracterizată calitatea acestor piese și la provocările legate de aceştia. Principalii parametri prin care este caracterizată calitatea pieselor prelucrate prin SPIF sunt: precizia geometrică, rugozitatea suprafeței, modificările microstructurale și defecte specifice prelucrării SPIF.

Precizia geometrică a pieselor

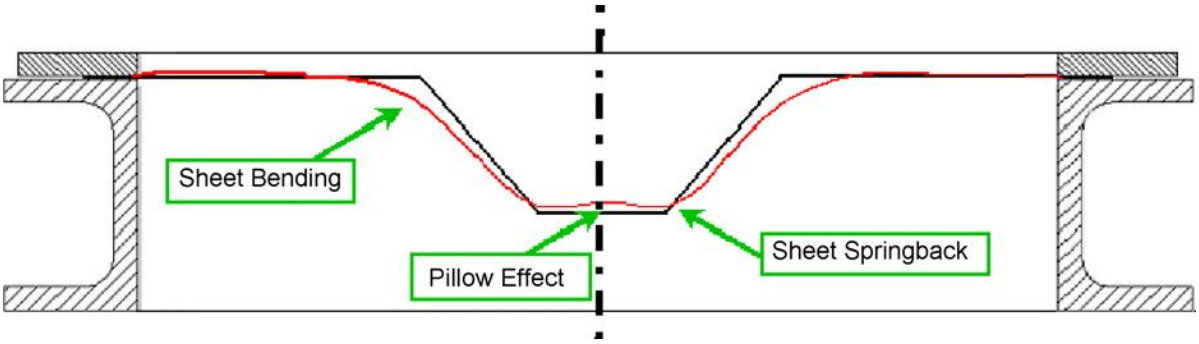


Fig.2.10. Erori din timpul procesului SPIF ce determină abateri geometrice ale piesei prelucrate [M07]

Micari şi colaboratorii colaboratorii [M07] au clasificat erorile ce apar în timpul procesului SPIF, ce determină abaterile geometrice ale pieselor prelucrate, în trei categorii, Fig.2.10:
- îndoirea tablei aproape de elementul de fixare a semifabricatului; o astfel de eroare poate fi rezolvată prin utilizarea unei plăci suport;
- revenirea elastică a semifabricatului la încheierea procesului de deformare;
-apariţia efectului de „pernă” la baza inferioară a piesei, sub forma unei suprafeţe concave a materialului nedeformat.
Un alt indicator important al calității pieselor prelucrate SPIF este **abaterea de grosime a pereţilor**. Aceasta, frecvent utilizată în literatura de specialitate sub denumirea „subțierea pereților”, determină nu doar rezistența mecanică a piesei, ci și limitele deformabilităţii piesei, fiind direct corelată cu apariția fisurilor. De aceea studiile experimentale care au analizat influența parametrilor de proces, a materialului și a formei active a sculelor asupra grosimii peretelui piesei prelucrate prin SPIF sunt numeroase. Concluziile unora dintre acestea se prezintă în continuare.

Rugozitatea suprafeţelor

Rugozitatea suprafeței prelucrate reprezintă ansamblul neregularităților mici (striații, rizuri, urme de sculă, goluri, pori, etc.), al căror pas este relativ mic în raport cu adâncimea lor, și apar datorită mișcării oscilatorii dintre vârful sculei ce o prelucrează și suprafața piesei care a fost prelucrată [C03].

Obţinerea unor rugozităţi scăzute ale suprafețelor pieselor prelucrate prin SPIF constituie o altă provocare în proiectarea proceselor SPIF. Scopul majorității studiilor de cercetare este de a determina efectul parametrilor de proces asupra calității suprafeței prelucrate, astfel încât procesul de prelucrare să poată fi controlat în direcţia dorită. În aceste studii, principalii parametrii de proces care sunt variaţi, sunt forma sau dimensiunea părţii active a sculei, viteza de rotație a sculei, viteza de avans a sculei, mărimea pasului incremental și utilizarea unui lubrifiant adecvat.

Microduritatea și modificările microstructurale

Prin procesul SPIF are loc ecruisarea materialului, ceea ce determină o creștere a microdurității și modificări ale microstructurii, cum ar fi rafinarea granulelor și apariția de zone de deformare intensă. De aceea, microduritatea și modificările microstructurale ale stratului superficial prelucrat sunt

indicatori relevanți pentru evaluarea efectul deformării plastice asupra proprietăților mecanice locale ale pieselor.

Akhavan Farid A. şi colaboratorii [A04] au studiat prelucrarea prin SPIF a unei piese de tip trunchi de con, utilizând o sculă cu cap semisferic. Piesa a fost realizată din aliaj de aluminiu AA6061 în stare recoaptă, cu o duritate inițială de 48 HV. În cadrul procesului SPIF materialul a suferit o deformare plastică intensă și localizată, care a condus la o creștere semnificativă a durității, cu valori ajungând până la 85,2 HV. Duritatea maximă a fost obținută pentru setul de parametrii tehnologici, pas incremental de 1 mm și viteză de avans de 1000 mm/min, în timp ce, cea mai mică rugozitate a suprafeței, cu o valoare Ra de 4,55 µm, a fost obținută pentru setul de parametri tehnologici, pas incremental de 1 mm și viteză de avans de 1500 mm/min. Aceste rezultate evidențiază sensibilitatea pronunțată a aliajului AA6061 la parametrii procesului, demonstrând importanța condițiilor de deformare în îmbunătățirea simultană a proprietăților suprafeței și a integrității structurale în procesul SPIF.

Defecte specifice pieselor SPIF

Prelucrarea SPIF poate conduce la apariţia unor defecte, care pot avea cauze multiple. În afara apariţiei fisurilor, ale căror cauze principale sunt determinate de ductilitatea scăzută a materialului, geometria nefavorabilă a piesei, frecarea intensă, anizotropia materialului sau parametrii tehnologici inadecvaţi, în procesul SPIF pot apărea şi alte defecte specifice, cum sunt: perete extrudat pliu de colț sau umflarea.'

2.4. Studii referitoare la modelarea și simularea numerică a procesului SPIF

Simularea proceselor de prelucrare SPIF este utilizată atât în cercetare, cât şi în practica industrială, înainte de a se realiza producția piesei efective [S13], [W03], [Y01], [Z05]. Metoda cel mai frecvent utilizată în acest scop este metoda elementelor finite, deşi aceasta are un dezavantaj major, durată de calcul foarte mare. Traiectoriile lungi și complexe ale sculelor de deformare și discretizarea fină a modelului numeric, care este necesară datorită suprafeței mici de contact dintre sculă și semifabricat, reprezintă principalele cauze ale duratelor mari ale simulării [Z02].

Etapele modelării numerice

Modelarea numerică are ca scop crearea modelului numeric pe baza căruia să fie realizate simulările numerice. Principalele etape ale modelării numerice, specifice proceselor de prelucrare SPIF sunt: (1) alegerea metodelor de integrare; (2) alegerea tipului de element finit şi construirea geometrică a elementelor specifice procesului de prelucrare; (3) stabilirea condiţiilor la limită; (4) stabilirea comportamentului de frecare şi a comportamentului termomecanic al materialului prelucrat; (5) validarea modelelor numerice.

Simularea modelelor numerice

Modelele numerice validate sunt utilizate ulterior pentru a înțelege mai profund procesul de deformare incrementală, pentru a obține informații suplimentare sau pentru a optimiza procesul de prelucrare. Câteva exemple în acest sens se prezintă în cele ce urmează.

Chang și colaboratorii [C06] au investigat influența frecării și a vibrațiilor asupra calității suprafeței în SPIF pentru aliaje de aluminiu, precum AA5251 și AA6082. Modelele analitice și simulările au demonstrat că vibrațiile de mare amplitudine au redus coeficientul de frecare și au îmbunătățit microduritatea suprafeței.

Simulările numerice avansate care utilizează sisteme multi-sculă, sisteme multi-punct cu table stratificate sau concepte de plasă adaptivă au redus timpul de formare a piesei și au minimizat defectele de tip pernă și de tip "revenire elastică" în piesele de aluminiu, îmbunătățind precizia dimensională [U01] [Z03], [N07].

Capitolul 3. Concluzii privind stadiul actual al cercetării – dezvoltării și aplicațiilor industriale ale deformării plastice incrementale

Analiza stadiului actual al cercetării - dezvoltării şi aplicaţiilor industriale ale deformării plastice incrementale, prezentate în primele două capitole ale tezei de doctorat a permis desprinderea unor concluzii relevante și importante. Această evaluare a studiilor și cercetărilor recente, scoate în evidenţă necesitatea și tendințele actuale în domeniul deformării plastice incrementale, subliniind importanța continuării cercetărilor în acest domeniu. Principalele concluzii desprinse sunt prezentate în cele ce urmează.

• Există o diversitate relativ mare de procedee de deformare plastică incrementală, din care face parte şi deformarea plastică incrementală cu poanson. Se utilizează una sau mai multe scule sub formă de poanson, ale cărui dimensiuni sunt relativ mici. Contactul dintre sculă și semifabricat este continuu și se realizează pe o suprafață mică.

• Deformarea plastică incrementală într-un singur punct (SPIF – Single Point Incremental Forming), este unul dintre procedeele de deformare plastică incrementală cu poanson, în care se utilizează o singură sculă. Procedeul are o largă răspândire deoarece are o cinematică relativ uşor de aplicat (vezi §1.1).

• Prin deformare plastică incrementală se poate prelucra o diversitate relativ mare de piese, de forme geometrice simple sau complexe, cu axe de simetrie sau fără axe de simetrie, ale căror forme şi dimensiuni sunt impuse de scopul cercetării sau utilizării lor (vezi §1.3).

• Cele mai utilizate forme de piese în cercetarea procesului de deformare plastică incrementală sunt cele cu formă geometrică simplă şi axial-simetrică, cum sunt conul, trunchiul de con şi calota sferică, deoarece pot fi realizate pe majoritatea maşinilor de prelucrare universale sau specializate, cu sau fără comandă numerică (vezi §1.3).

• Alte tipuri de piese cu forme geometrice simple utilizate în cercetarea procesului de deformare plastică incrementală sunt cele care au la bază trunchiul de piramidă sau cele derivate din trunchiul de con sau de piramidă, dar care au unghiul peretelui variabil (vezi §1.3).

• Piese cu formă geometrică de complexitate medie din punct de vedere al prelucrării prin deformare plastică incrementală sunt considerate cele a căror formă geometrică este o combinaţie a mai multor forme geometrice simple, ca de exemplu, trunchiul de con în trepte şi cilindru – sferă sau cele care au două sau mai multe axe de simetrie, care pot fi prelucrate doar pe maşini care asigură o cinematică specifică (vezi §1.3).

• Procedeele de prelucrare prin deformare plastică incrementală se pot aplica cu eficienţă ridicată pe maşini-unelte destinate prelucrărilor mecanice prin aşchiere, care dezvoltă forţe suficient de mari şi au o rigiditate ridicată. Prelucrarea prin deformare plastică incrementală se poate realiza pe strunguri CNC pentru piesele de revoluție (axial-simetrice) cu formă geometrică simplă sau de complexitate medie. Cel mai des se utilizează maşinile de frezat cu comandă numerică, putându-se executa atât piese simple, dar și piese cu geometrii complexe (vezi §1.4).

• Prelucrările prin deformare plastică incrementală se pot realiza şi pe maşini specializate, care sunt mai ieftine decât maşinile de frezat cu comandă numerică, dar se găsesc mai greu pe piaţă, sau cu ajutorul roboţilor industriali, dar aceştia au o rigiditate mai scăzută (vezi §1.4).

• Dispozitivele de orientare şi fixare a semifabricatelor pentru prelucrarea prin deformare plastică incrementală au fost dezvoltate sub diferite forme constructive, mai simple sau mai complexe, utilizându-se diverse soluții în funcție de mașina-unealtă folosită, de forma piesei de realizat sau de necesitățile impuse de cercetarea procesului (vezi §1.4).

• Scula utilizată în procesul de deformare plastică incrementală are un rol important în timpul procesului deoarece, prin contactul direct cu semifabricatul, influenţează semnificativ calitatea piesei obținute. Sculele folosite cel mai des în procesele SPIF sunt cele de tip poanson (vezi §1.4).

• Sculele rigide cu cap semisferic sunt cele mai utilizate în procesele SPIF, cu nare diversitate constructivă. Principalele variante constructive ale acestor scule sunt: scule cu cap semisferic cu secțiune constantă, scule cu cap semisferic cu secțiune conică și scule cu cap semisferic cu multiple secțiuni conice. Raza zonei active este parametrul geometric al sculei care diferențiază poansoanele cu cap semisferic (vezi §1.4).

• Sculele rigide cu cap plat sunt scule simple și foarte asemănătoare cu cele cu cap semisferic, dar au suprafața de contact cu semifabricatul mai mare în comparație cu cea de la scula cu cap semisferic. Principalele avantaje ale utilizării acestora sunt: precizia pieselor obținute este mai mare şi se reduce efectul nefavorabil de pernă care apare la finalul prelucrării (vezi §1.4).

• Sculele cu bilă sunt scule mai complexe în comparație cu cele monobloc, dar au avantajul că înlocuiesc frecarea de alunecare, întâlnită la deformarea cu sculă monobloc cu frecarea de rostogolire, ceea ce conduce la reducerea forțelor de prelucrare, creșterea deformabilității materialului şi îmbunătăţirea calităţii piesei prelucrate (vezi §1.4).

• Aplicațiile deformării plastice incrementale în industria auto sunt în legătură cu o gamă variată de repere fabricate în serie limitată, în loturi mici, fie ca piese de schimb sau ca repere personalizate. Aceste piese sunt de forme simple sau complexe, realizate din oţel sau aliaje de aluminiu (vezi §1.5).

• În domeniul medical, deformarea plastică incrementală este utilizată pentru fabricarea unor tipuri de proteze pentru diferite zone ale corpului uman. Aceste piese sunt unicate, fiind personalizate în funcţie de pacientul care le va utiliza, şi sunt executate din materiale metalice, polimerice și ceramice, biocompatibile, cu greutate redusă, conductivitatea electrică și termică scăzută, și care au o deformabilitate scăzută (vezi §1.5).

• Piese prelucrate prin deformare plastică incrementală sunt utilizate şi în alte domenii, cum sunt industria feroviară, industria aerospaţială, industria alimentară sau industria elementelor decorative (vezi §1.5).

• Deşi prelucrarea prin deformare plastică incrementală, inclusiv cea în care se utilizează un singur poanson (Single Point Incremental Forming – SPIF), este studiată şi utilizată de câteva zeci de ani, SPIF este încă considerat un proces în dezvoltare, datorită mai multor provocări. Dintre acestea se remarcă: modelarea stării de tensiuni-deformații din zona de contact sculă-semifabricat, modelarea forţelor de prelucrare şi controlul calităţii piesei prelucrate (vezi §2.1).

• Mecanismele de deformare în SPIF sunt întindere, care reprezintă modul dominant de deformare, şi forfecare, determinată de frecarea dintre sculă și semifabricat. Forfecarea are loc pe grosimea semifabricatului de tip tablă, în planul generat de direcția locală a sculei și direcția normalei semifabricatului, precum şi într-un plan perpendicular pe semifabricatul prelucrat (vezi §2.1).

• Studiile privind caracterizarea comportamentului materialelor prelucrate prin SPIF sunt numeroase şi au diferite obiective, cum sunt: stabilirea influenţei geometriei sculei, a parametrilor regimului de prelucrare, a tratamentului termic aplicat piesei, a geometriei piesei de realizat etc. asupra deformabilităţii materialului (vezi §2.1).

• Forțele de prelucrare din SPIF reflectă starea de tensiune-deformație care apare în timpul procesului de deformare și pot indica zonele de risc de ruperi sau exces de subțiere a semifabricatului. Forţa axială, pe direcţia axei de simetrie a piesei de prelucrat - Fz, este componenta principală a forţei de deformare, având mărimea cea mai mare. Aceasta determină alungirea plastică a materialului, în timp ce forța radială - Fr și forța tangențială - Ft, de mărime mult mai mică, determină redistribuirea materialului în planul semifabricatului (vezi §2.1).

• Traiectoria sculei reprezintă un element esențial în procesul de deformare plastică incrementală, deoarece influenţează modul de deformare a materialului, solicitările mecanice și calitatea piesei.

Cercetările întreprinse în acest sens au analizat mai multe tipuri de traiectorii ale sculei, cum sunt: traiectoria pe niveluri, traiectoria elicoidală sau traiectorii cu treceri multiple (vezi §2.2).

• Traiectoria pe niveluri este formată dintr-o succesiune de curbe în plan, care urmează conturul piesei la fiecare nivel în care este împărțită piesa pe direcție verticală. Traiectoria elicoidală este formată dintr-o singură curbă, elicoidală, care începe de la nivelul semifabricatului nedeformat și se termină la fundul piesei, când piesa este complet deformată (vezi §2.2).

• Traiectoria cu treceri multiple constă în deformarea incrementală a piesei prin treceri repetate ale sculei, care se realizează printr-una din cele două traiectorii menţionate anterior. Există mai multe variante de astfel de traiectorii care au fost studiate, cum sunt: traiectoria cu două treceri, traiectoria cu treceri succesive şi traiectoria cu trecere de compensare (vezi §2.2).

• Calitatea pieselor prelucrate prin SPIF reprezintă un factor critic pentru validarea tehnologiei utilizate şi aplicarea industrială a acesteia. Principalii parametri prin care este caracterizată calitatea pieselor prelucrate SPIF sunt: precizia geometrică, rugozitatea suprafeței, modificările microstructurale și defecte specifice prelucrării SPIF. Stabilirea influenţei este realizată prin cercetări experimentale sau prin modelare şi simulare numerică (vezi §2.3).

• Precizia geometrică constituie unul dintre cei mai importanți indicatori de calitate în SPIF. Aceasta este cauzată, în principal, de trei categorii de erori ce apar în timpul procesului SPIF: îndoirea tablei aproape de elementul de fixare a semifabricatului; revenirea elastică a semifabricatului la încheierea procesului de deformare; apariţia efectului de pernă la baza inferioară a piesei, sub forma unei suprafeţe concave a materialului nedeformat (vezi §2.3).

• Abaterea de grosime a pereţilor sau „subțierea pereților” este un alt indicator important al calității pieselor prelucrate SPIF, deoarece determină rezistența mecanică a piesei și limitele deformabilităţii acesteia, fiind direct corelată cu apariția fisurilor (vezi §2.3).

• Obţinerea unor rugozităţi scăzute ale suprafețelor pieselor prelucrate prin SPIF constituie un alt obiectiv în proiectarea proceselor SPIF. Majoritatea cercetărilor îşi propun să determine efectul parametrilor de proces (forma sau dimensiunea părţii active a sculei, viteza de rotație a sculei, viteza de avans a sculei, mărimea pasului incremental și utilizarea unui lubrifiant) asupra rugozităţii suprafeței prelucrate (vezi §2.3).

• Microduritatea și modificările microstructurale ale stratului superficial prelucrat sunt indicatori relevanți pentru evaluarea efectului deformării plastice asupra proprietăților mecanice locale ale pieselor. De aceea, multe cercetări efectuate analizează influenţa unor parametrii de proces (viteza de rotație a sculei, viteza de avans a sculei, mărimea pasului incremental) asupra acestora (vezi §2.3).

• Prelucrarea prin SPIF poate conduce la apariţia unor defecte, care pot avea cauze multiple. Defectele specifice care pot apărea în procesul SPIF sunt: perete extrudat, pliu de colț sau umflarea (vezi §2.3).

• Principalele etape ale modelării numerice, specifice proceselor de prelucrare SPIF sunt: alegerea metodelor de integrare; alegerea tipului de element finit şi construirea geometrică a elementelor specifice procesului de prelucrare; stabilirea condiţiilor la limită; stabilirea comportamentului de frecare și a comportamentului termomecanic al materialului prelucrat; validarea modelelor numerice (vezi §2.3).

• Validarea modelelor numerice se realizează pe baza mai multor criterii, cum sunt forțele de deformare, grosimea peretelui sau profilul piesei prelucrate, prin compararea rezultatelor obţinute prin simulare numerică cu cele determinate experimental (vezi §2.3).

• Simulările numerice sunt utilizate pentru a înțelege mai profund procesul de deformare incrementală, pentru a obține informații suplimentare sau pentru a îmbunătăţi procesul de prelucrare prin SPIF. O problemă deosebită în simularea proceselor SPIF o constituie durata mare a calculelor, mai ales atunci când se doreşte obţinerea unei precizii de calcul ridicate şi/sau semifabricatul are dimensiuni mari (vezi §2.3).

Partea a II-a.

Contribuții la cercetarea teoretico-experimentală și modelarea numerică a procesului de deformare plastică incrementală

Capitolul 4. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare a procesului şi sistemului de deformare plastică incrementală

4.1. Direcții de cercetare-dezvoltare

Pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se apreciază a fi de actualitate următoarele direcții de cercetare-dezvoltare privind procesul și sistemele de deformare plastică incrementală într-un singur punct:

(1) creșterea gamei de materiale utilizate în cercetarea procesului și sistemelor de deformare plastică incrementală într-un singur punct.

(2) dezvoltarea de noi scule pentru deformarea plastică incrementală, care să conducă la creșterea deformabilității materialelor și a preciziei geometrice a pieselor deformate.

(3) aprofundarea și extinderea cunoștințelor despre fenomenele specifice procesului de deformare plastică incrementală într-un singur punct, prin analiza interdependențelor dintre parametrii de proces (tensiuni/ forțe, temperatură etc.), respectiv, parametrii ce definesc calitatea pieselor deformate (rugozitate, precizie geometrică, revenire elastică, subțierea pereților etc.) și caracteristicile materialului deformat, parametrii tehnologici, geometria piesei de realizat și tipul de traiectorie utilizat.

(4) dezvoltarea modelelor numerice pentru simularea proceselor de deformare plastică incrementală într-un singur punct în vederea aprofundării cunoștințelor despre fenomenele specifice procesului de deformare, a optimizării acestuia și a reducerii costurilor de cercetare şi fabricare.

4.2. Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare

Având în vedere direcțiile de cercetare-dezvoltare a proceselor de deformare plastică incrementală într-un singur punct s-a stabilit obiectivul principal al activității de doctorat: **dezvoltarea procesului și sistemului de deformare plastică incrementală într-un singur punct a pieselor din aliaj de aluminiu AA6061-T6, prin cercetare teoretico-experimentală și simulare numerică**.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal al activităţilor doctorale se stabilesc **obiectivele specifice** ce urmează.

(1) ***Dezvoltarea unei noi scule, cu cap excentric şi rază variabilă***, care să îmbine avantajele sculelor existente, să fie ușor de realizat și să faciliteze procesul de deformare plastică.

(2) ***Analiza comparativă a unor procese de deformare plastică incrementală cu o singură sculă*** a pieselor de tip trunchi de con, realizate din aliaj de aluminiu AA6061-T6. Alegerea pentru studiu a pieselor de tip trunchi de con este justificată prin faptul că, pe de o parte, acest tip de suprafețe este frecvent întâlnit în studiul proceselor de deformare plastică incrementală cu o singură sculă, datorită cerințelor reduse de punere în practică (mașina-unealtă necesară, simplitatea realizării traiectoriei etc.) și, pe de altă parte, piesele de acest tip permit studiul complex al fenomenelor specifice procesului de deformare plastică incrementală.

Piesa obiectiv, realizată prin deformare plastică incrementală într-un singur punct în cadrul cercetărilor doctorale, este de tip trunchi de con, Fig.4.1.

Caracteristicile geometrice principale ale piesei obiectiv sunt: diametrul mare al trunchiului de con, Dp = ∅96±0,5 [mm], înălțimea trunchiului de con, H = 25±0,5 [mm] și unghiul de înclinare a peretelui trunchiului de con, α = 45±1 [°].

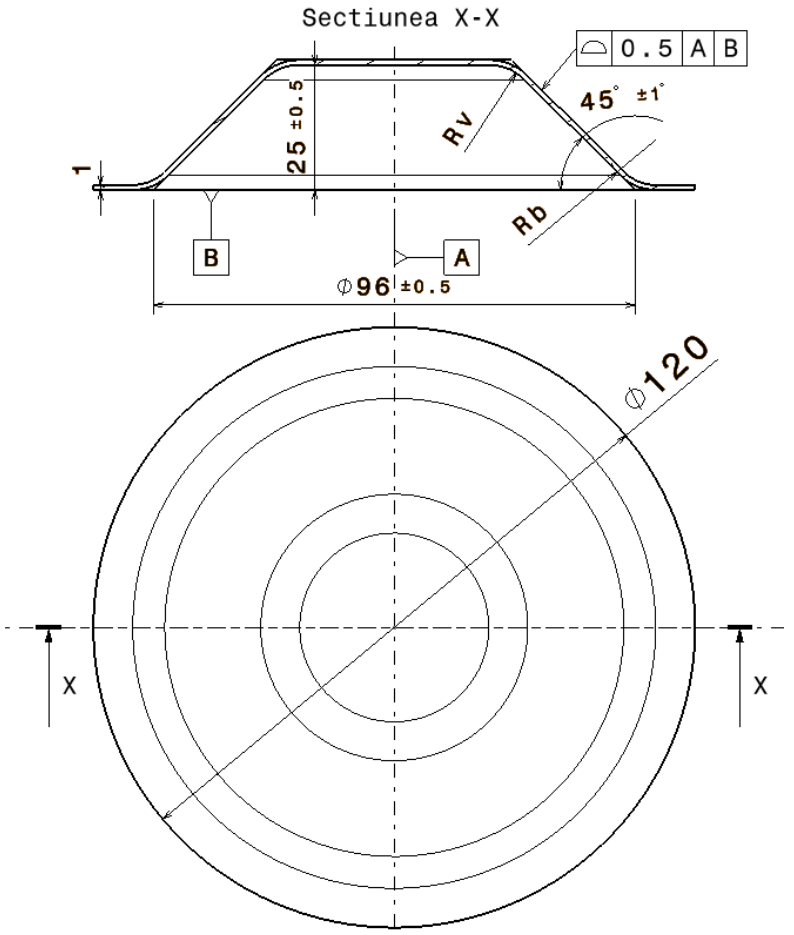


Fig.4.1. Piesa de realizat prin deformare plastică incrementală (piesa obiectiv)

4.3. Metodologia de cercetare-dezvoltare

Etapele activității de cercetare – dezvoltare şi activităţile asociate acestora sunt prezentate în Fig.4.3. și în cele ce urmează.

(I) Dezvoltarea unei noi scule de deformare plastică incrementală este asociată îndeplinirii primului obiectiv specific. Activităţile specifice acestei etape constau în:

- realizarea un studiu bibliografic critic, care să evidenţieze principalele dezavantaje şi avantaje ale sculelor utilizate în procesele de deformare plastică incrementală într-un singur punct;

- proiectarea unei noi scule, inovatoare, care să elimine cât mai multe dintre dezavantajele sculelor analizate, să menţină cât mai multe din avantajele acestora şi să fie ușor de realizat;

- realizarea efectivă a noii scule, din acelaşi material cu sculele existente.

(II) Cercetările teoretico-experimentale privind procesele de deformare plastică incrementală cu scule de forme diferite au ca scop analiza comparativă a acestor procese şi a calităţii pieselor prelucrate. În cadrul acestei etape se vor desfășura mai multe activități specifice, care sunt grupate după cum urmează.

- *Caracterizarea materialului semifabricatului*, prin care se urmărește determinarea compoziției chimice, fazelor și structurii acestuia şi a proprietăților fizico-mecanice.

- *Conceperea și realizarea unor dispozitive de orientare și fixare a semifabricatului* pentru prelucrarea piesei obiectiv prin deformare plastică incrementală cu o singură sculă pe un centru de frezare vertical cu comandă numerică. Aceste dispozitive trebuie să asigure posibilitatea măsurării forțelor și temperaturilor de proces în timpul deformării, respectiv, rigiditatea necesară prelucrării piesei.

- *Realizarea experimentelor cu scule diferite* constă în realizarea piesei obiectiv cu fiecare dintre cele trei scule stabilite, utilizând aceleași valori ale parametrilor tehnologici. Experimentele se vor realiza astfel:

- pe „sistem tehnologic elastic" care cuprinde un sistem de măsurare a forțelor şi un sistem de măsurare a temperaturilor, ceea ce permite analiza aprofundată a procesului de deformare;

- pe „sistem tehnologic rigid", când se utilizează doar sistemul de măsurare a temperaturilor, ceea ce permite analiza indicatorilor de calitate ai pieselor prelucrate.

- *Dezvoltarea unei metodologii de măsurare a geometriei piesei prin scanare 3D* are ca scop utilizarea tehnicii de scanare 3D a pieselor prelucrate prin deformare plastică incrementală şi prelucrarea datelor pentru măsurarea cât mai precisă a geometriei piesei.

- *Analiza proceselor de deformare plastică incrementală* are ca scop analiza complexă a proceselor de deformare plastică incrementală, realizate cu scule diferite. Se are în vedere evoluţia forţelor de deformare şi a temperaturilor de proces, geometria piesei prelucrate, mărimea rugozităţii şi a microdurităţii piesei şi realizarea de corelări între acestea, cu identificarea „momentelor critice" din proces, respectiv, „zonelor critice" de pe piesa prelucrată. Această analiză va fi completată cu analiza bazată pe simularea proceselor de deformare plastică realizată în cadrul celei de-a treia etape a cercetării.

(III) Modelarea și simularea procesului are ca scop dezvoltarea unui model numeric care să poată simula cu o precizie şi durată convenabile procesul de deformare plastică incrementală într-un singur punct şi utilizarea acestuia pentru analiza avansată a procesului de deformare. Activitățile desfășurate sunt grupate după cum urmează.

- *Caracterizarea comportamentului termo-mecanic al materialului* urmăreşte stabilirea unei legi de comportament care să fie utilizată în modelarea numerică şi determinarea valorilor coeficienților acesteia pentru materialul utilizat. Pentru determinarea valorilor coeficienților din legea de comportament termo-mecanic se realizează încercări la tracțiune monotonă cu viteze diferite, la temperaturi diferite, ceea ce constituie o premisă importantă pentru realizarea unui model numeric care să permită obţinerea unei precizii corespunzătoare prin simulare.

- *Dezvoltarea și validarea modelului numeric cu elemente finite.* Se vor analiza mai multe tipuri de modele numerice, utilizând strategii diferite, care vor fi validate pe baza datelor experimentale obținute în etapa precedentă (forțe, temperaturi). Dintre acestea se va selecta cel care asigură cel mai bun compromis între obținerea unor rezultate cât mai precise și durata de calcul cât mai mică.

- *Realizarea simulărilor numerice* constă în simularea celor două procese realizate cu scule semisferice diferite şi obținerea unor informații despre procesul de deformare plastică incrementală cu o singură sculă: evoluţia şi corelarea în timp a forțelor, temperaturilor, deformarea semifabricatului şi geometria piesei.

- *Analiza proceselor de deformare plastică incrementală* constă în exploatarea rezultatelor simulării numerice şi corelarea acestora cu datele experimentale obţinute în etapa precedentă.

(IV) Analiza comparativă a proceselor de deformare plastică incrementală este etapa în care se realizează o analiză comparativă a proceselor de deformare plastică incrementală cu cele trei scule, având ca scop evidenţierea avantajelor şi dezavantajelor utilizării fiecărui tip de sculă. Finalizarea acestei etape conduce la îndeplinirea obiectivului specific 2.

Capitolul 5. Elemente ale sistemului de cercetare experimentală a procesului de deformare plastică incrementală

Elementele sistemului de cercetare experimentală a procesului de deformare plastică incrementală, care includ și elemente publicate ale autorului [B04], sunt prezentate după cum urmează.

5.1. Caracteristici ale aliajului AA6061-T6

Compoziţia chimică efectivă a fost determinată prin spectometrie de fluorescență cu radiații X pe o probă cu dimensiunile de 20 × 20 × 1 mm, utilizând echipamentul SPECTRO Midex M.

Caracteristicile metalografice efective ale aliajului AA6061-T6 au fost determinate pe trei eşantioane debitate din semifabricatul de tip tablă. Acestea au fost debitate cu jet de apă pe direcţii specifice ale semifabricatului: pe direcția de laminare - la 0˚, perpendicular pe direcția de laminare la - 90˚ și înclinat - la 45˚. Probele metalografice au fost analizate în primă etapă prin microscopie optică cu o mărire de 100 de ori, fără a le ataca cu agent chimic, pentru a pune în evidență direcția de laminare a tablei de AA6061-T6.

5.2. Elemente ale sistemului tehnologic de deformare plastică incrementală și ale sistemelor de măsurare din timpul procesului

5.2.1. Forma și dimensiunile semifabricatelor de prelucrat

- *Croirea tablei iniţiale*

Aliajul de aluminiu AA6061-T6 se livrează sub formă de tablă, cu grosimi diferite în funcție de cerințe. Acesta este supus unui tratament de durificare prin precipitare, cu scopul de a mări limita maximă de curgere și a avea proprietăți mecanice superioare (rezistență crescută la tracțiune, bună rezistență la coroziune, duritate mai mare, etc.) în raport cu aliajul AA6061 netratat [O03].

- *Dimensiunea semifabricatului*

Pentru realizarea cercetărilor experimentale în legătură cu deformarea plastică incrementală într-un singur punct s-au utilizat semifabricate de formă circulară. S-a stabilit ca diametrul exterior al acestora să fie ∅ = 170 mm, iar pe acesta să fie realizate 2 găuri cu diametrul ∅ = 10 mm, cu rol de orientare pe dispozitivul de orientare şi fixare, și 6 găuri de trecere cu diametrul ∅ =11 mm, care au rolul de a permite trecerea șuruburilor de strângere la fixarea semifabricatului.

- *Croirea şi realizarea semifabricatelor*

Pentru a obține o repetabilitate ridicată a rezultatelor experimentale, s-a avut în vedere ca direcţia determinată de cele două găuri de orientare a semifabricatului (găurile cu diametrul ∅ = 10 mm) să fie paralelă cu direcţia de laminare a materialului, marcată pe folia de plastic adezivă a tablei. Debitarea conturului exterior al semifabricatului şi a găurilor din acesta s-a realizat prin tăiere cu laser.

5.2.2. Maşina-unealtă şi dispozitivul de orientare-fixare a semifabricatului

- *Maşina-unealtă utilizată*

Pentru realizarea experimentelor de deformare plastică incrementală într-un singur punct s-a utilizat centrul de frezare cu comandă numerică EcoMill70 - DMG MORI [D05]. Utilizarea unei maşini-unelte comandată numeric este una din cerinţele de bază ale aplicării procedeului de deformare plastică incrementală pentru realizarea unor suprafeţe complexe.

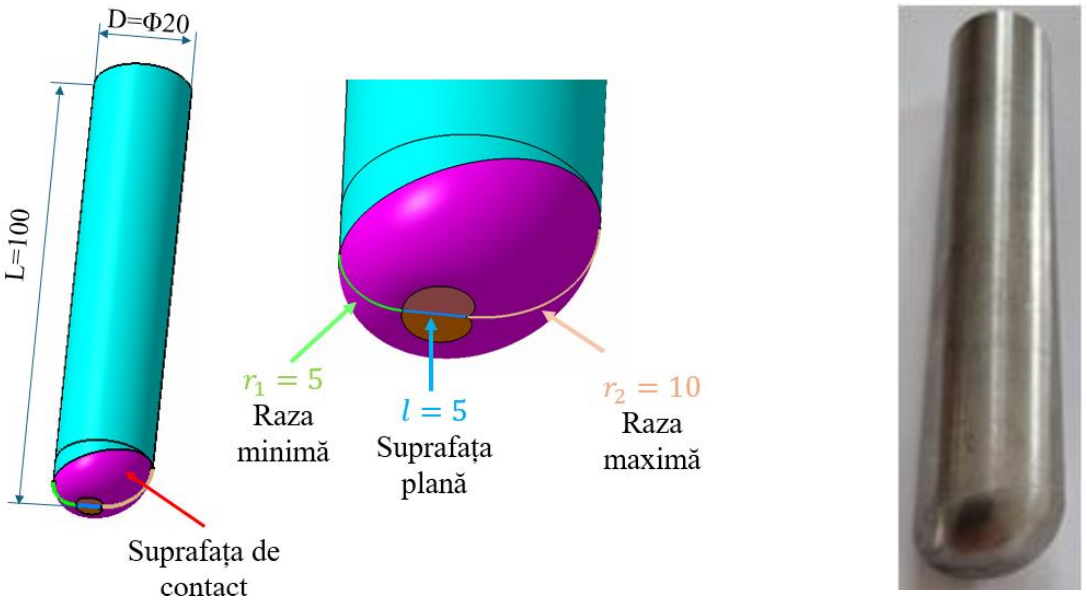
- *Proiectarea dispozitivului de orientare-fixare a semifabricatului*

Dispozitivul de orientare și fixare a semifabricatului, realizat conform conceptului prezentat anterior şi poziționat pe masa centrului de prelucrare EcoMill70, se prezintă în Fig.5.10. Acesta este varianta finală pe care am utilizat-o în experimentări, în care bucșa de înălțare este prevăzută cu o fereastră suficient de mare de a permite măsurarea temperaturii din proces cu ajutorul unei camere termografice.



- Fig. 5.10. Dispozitivul de orientare și fixare a semifabricatului, utilizat la realizarea experimentelor

5.2.3. Sculă inovativă cu rază variabilă pentru deformare plastică incrementală



a) Modelul 3D al sculei ETVR b) Scula ETVR

Fig.5.11 Scula inovativă ”eccentric tool with variable radius” - ETVR [B04]

Cercetările realizate în cadrul studiilor doctorale au ca principală contribuţie dezvoltarea unei noi scule de deformare plastică incrementală. Scula inovativă, denumită ”eccentric tool with variable

radius" (ETVR), a fost proiectată și realizată pe parcursul studiilor doctorale [B04], cu scopul de a îmbunătăți procesul de deformare plastică incrementală într-un singur punct. Această sculă este un poanson cu cap plat, a cărei rază de racordare dintre suprafața plană frontală și suprafața cilindrică exterioară este variabilă, cu valoarea minimă R=5mm la un capăt și valoarea maximă R=10mm în partea opusă, la 180° în jurul axei, Fig.5.11. Scula inovativă ETVR a fost realizată din același material ca cele cu cap semisferic, respectiv, oțel de scule 1.2312 (40CrMnMoS 8-6).

Scula ETVR combină caracteristicile a trei scule diferite, respectiv: poanson plat, care mărește deformabilitatea materialului prin creșterea temperaturii în zona de contact sculă-semifabricat datorită frecării intense din zona plată [K06], poanson cu cap semisferic cu rază mare, R=10 mm, cu influență favorabilă asupra calității suprafeței, conducând la o rugozitate mai mică și având o productivitate mai mare [B12] și poanson cu cap semisferic cu rază mică, R=5 mm, care crește deformabilitatea materialului datorită zonei mai mici de contact.

Pentru a analiza evoluția contactului dintre scula ETVR și semifabricat, s-au considerat diferite poziții unghiulare ale sculei ETVR în raport cu axa sa proprie, la prelucrarea piesei obiectiv (trunchi de con cu unghi al peretelui α=45°), reprezentate schematic în Fig.5.12. S-a considerat că rotația sculei „n" este mai mare ca viteza de avans v_a" a acesteia, situaţie des întâlnită practic.

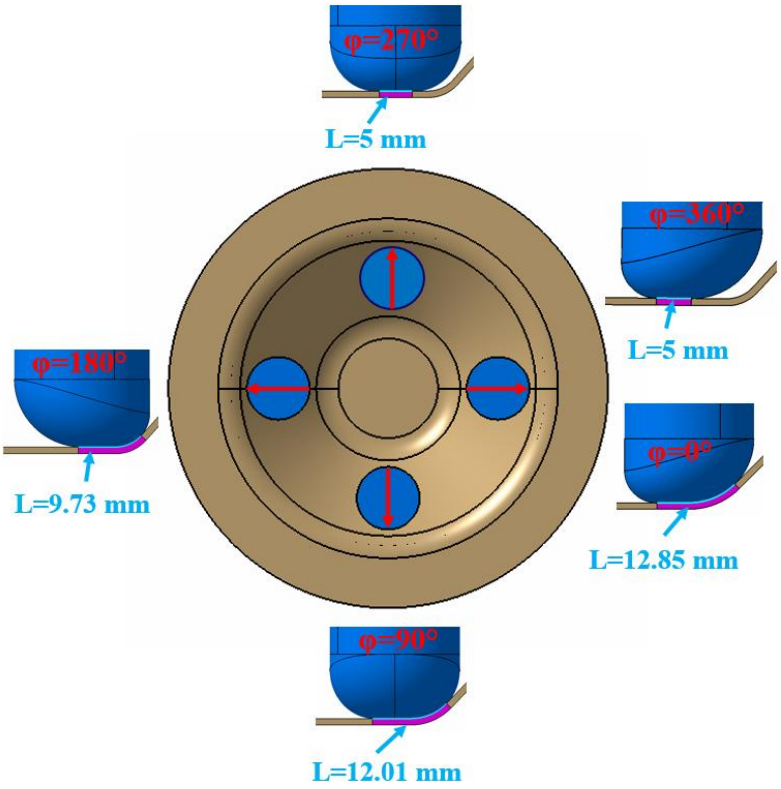


Fig.5.12. Mărimea liniei de contact dintre scula ETVR și semifabricat pentru diferite poziții unghiulare ale acesteia cu piesa obiectiv considerată

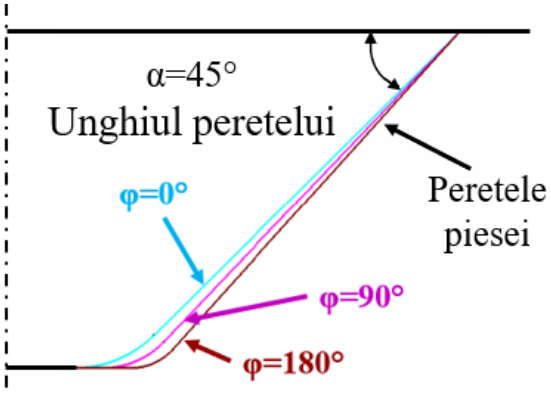


Fig.5.13. Poziția generatoarei piesei obiectiv pentru diferite poziții unghiulare ale sculei ETVR

Datorită acestei variaţii a contactului sculă ETVR – semifabricat, generatoarea conului piesei are unghiuri diferite, în funcție de poziția unghiulară φ a poansonului, Fig.5.13: unghiul de înclinare este maxim atunci când semifabricatul este în contact cu partea sculei cu R=5 mm (φ = 180°) şi este minim atunci când semifabricatul este în contact cu partea sculei cu R=10 mm (φ = 0°). Astfel, deformarea plastică incrementală intermitentă poate contribui la realizarea procesului de deformare cu efort mai mic şi la creşterea calității pieselor obținute.

5.2.4. Scule cu cap semisferic pentru deformare plastică incrementală

Pentru a compara rezultatele prelucrării cu scula inovativă, în cercetările experimentale s-au utilizat două scule monobloc cu cap semisferic, ca scule de referinţă. Cele două scule au raze ale zonei active diferite şi sunt realizate din acelaşi oțel de scule ca scula inovativă.

Prima sculă este o piesă de revoluţie în două trepte cilindrice, cu raza zonei active de 5 mm şi diametrul exterior al părţii de orientare şi fixare de 20 de mm. Raza zonei active a acesteia corespunde celei mai mici raze a sculei inovative.A doua sculă are raza zonei active de 10 mm şi diametrul exterior al părţii de orientare şi fixare de 20 de mm. Raza zonei active a acesteia corespunde celei mai mari raze a sculei inovative.

5.2.5 Sisteme de măsurare în timp real a rezultantelor de proces

Pentru investigarea experimentală a proceselor de deformare plastică incrementală într-un singur punct s-a stabilit măsurarea a doi parametri de proces: forța de deformare şi temperatura din proces. Sistemele experimentale utilizate în acest scop sunt prezentate în cele ce urmează.

- *Sistemul de măsurare a forțelor de deformare plastică incrementală*

Forțele din procesul de deformare plastică incrementală într-un singur punct au fost măsurate pe trei axe ortogonale (X, Y și Z), utilizând un dinamometru cu captori elastici şi mărci tensometrice, model K3D160 [M06], produs de ME-MEßSYSTEME.

- *Camera termografică*

Pentru măsurarea temperaturilor din timpul de deformare plastică incrementală s-a utilizat tehnica termografică, folosind o cameră termografică OPTRIS PI400i [O02].

5.3. Metode și mijloace utilizate pentru măsurarea unor caracteristici ale pieselor prelucrate

- *Rugozitatea suprafeţelor prelucrate*

Măsurarea rugozităţii suprafețelor prelucrate s-a realizat pentru toate piesele prelucrate printr-o metodă de contact, utilizând rugozimetrul portabil MITUTOYO SJ210 [M10], care are palpator cu vârf diamantat.

- *Microduritatea suprafeţelor prelucrate*

Microduritatea din stratul superficial al suprafeţelor prelucrate a fost determinată cu durimetrul INNOVATEST, model Falcon500 [I01].

- *Precizia geometrică a pieselor prelucrate*

Precizia geometrică a pieselor prelucrate a fost evaluată prin doi parametri: abaterea de la forma dată a profilului şi grosimea peretelui piesei (vezi cap.7). Pentru determinarea acestora s-a utilizat o metodă indirectă, fără contact, care utilizează scanere mobile. S-au utilizat două scanere, Artec Space Spider – în timpul stagiului de cercetare de la ENSTA Bretagne, respectiv, GoSCAN3D – în timpul cercetările realizate în Centrul Universitar Piteşti.

5.4. Planificarea experimentelor

La realizarea prelucrărilor prin deformare plastică incrementală într-un singur punct au fost utilizate două sisteme experimentale: unul numit „sistem elastic”, altul numit „sistem rigid”.

Sistemul elastic are ca scop observarea și studierea în profunzime a procesului de deformare plastică incrementală.

Sistemul rigid are ca scop obţinerea de piese în condiţii normale de lucru (în absenţa vibraţiilor cauzate de alte surse decât cele ale procesului propriu-zis), care să fie evaluate din punct de vedere al calităţii acestora.

Planificarea experimentelor a urmărit desfăşurarea corectă şi eficientă a cercetării experimentale. Planul experimental utilizat în acest scop a cuprins 12 experimente, notate cu E1 ... E12, şi se prezintă în Tabelul 5.16.

Tabelul 5.16. Planul experimental

Nr. exp.	Tip Sistem	Tip Sculă	Parametrii tehnologici	Parametrii măsurați în timpul procesului		Elemente analizate după realizarea prelucrărilor					
E1	Sistem elastic	(SS) R=10	n=2000 [rot/min]; v_a=1000 [mm/min]; Δz =0,3 [mm].	Forța de deformare pe direcțiile X,Y, Z	Temperatura din proces	Forma macroscopică a suprafeței prelucrate (zgârieturile)	Micro-așchiile rezultate în proces (cantitatea și dimensiunea acestora)	Grosimea pereţilor piesei	Abaterea de la profilul piesei	---	---
E2											
E3		(SS) R=5									
E4											
E5		ETVR									
E6											
E7	Sistem rigid	ETVR		---						Rugozitatea suprafeţei	Microduritatea stratului superficial
E8											
E9		(SS) R=10									
E10											
E11		(SS) R=5									
E12											

Primele șase experimente s-au realizat pe „sistemul elastic”, iar următoarele şase experimente s-au realizat pe „sistemul rigid”. Fiecare experiment realizat cu o sculă (SS5, SS10 și ETVR), pe fiecare dintre cele două sisteme de prelucrare, a fost repetat, cu scopul de a pune în evidență repetabilitatea procesului.

Valorile parametrilor tehnologici de deformare plastică incrementală au fost stabilite pe baza analizei lucrărilor din literatura de specialitate [B07], [C09], [P01], [S03] şi au fost aceleaşi în toate cele 12 experimentele realizate, respectiv: turația sculei n=2000 [rot/min], viteza de avans a sculei v_a=1000 [mm/min], pasul incremental pe direcția Z, Δz =0,3 [mm].

Traiectoria sculei a fost una de tip elicoidal, deoarece aceasta prezintă avantajul că nu lasă urme pe suprafața pieselor prelucrate și nu apar variații bruște ale forțelor de deformare [L05], [J07]. Realizarea traiectoriei elicoidale necesare deformării plastice incrementale s-a realizat cu softul CATIA V5. S-a avut în vedere ca, pentru fiecare sculă utilizată, punctul de început al traiectoriei să fie în aceeași zonă a semifabricatului, astfel încât analiza și compararea rezultatelor să aibă o precizie ridicată.

Parametrii măsurați ***în timpul procesului de prelucrare*** au fost: a) forţele de deformare pe cele trei direcţii (X, Y şi Z) şi temperaturile din proces, la utilizarea sistemului experimental elastic (experimentele E1 ... E6) și b) temperaturile din proces, la utilizarea sistemului experimental rigid (experimentele E7 ... E12).
Elementele analizate ***după realizarea prelucrărilor*** au fost: a) forma macroscopică a suprafeței prelucrate, micro-așchiile rezultate în proces, grosimea pereţilor piesei şi abaterea de la profilul piesei, pentru piesele prelucrate pe sistemul experimental elastic (experimentele E1 ... E6) și b) forma macroscopică a suprafeței prelucrate, micro-așchiile rezultate în proces, grosimea pereţilor piesei, abaterea de la forma dată a profilului piesei, rugozitatea suprafeţei şi microduritatea stratului superficial, pentru piesele prelucrate pe sistemul experimental rigid (experimentele E7 ... E12);

Capitolul 6. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influența formei sculei asupra forţei şi temperaturii din procesul de deformare plastică incrementală

Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influența formei sculei asupra forţei şi temperaturii din procesul de deformare plastică incrementală, care includ și elemente publicate ale autorului [B02], sunt prezentate după cum urmează.

6.1. Standul experimental pentru măsurarea forței şi temperaturii de prelucrare

Pentru măsurarea simultană a forţei de deformare şi a temperaturii din procesul de deformare plastică incrementală într-un sigur punct s-a utilizat „sistemul experimental elastic”. Acesta are la bază dispozitivul de orientare și fixare a semifabricatului (vezi §5.2.2), dinamometrul K3D160 şi camera termografică Optris PI400i (vezi §5.2.5).

6.2. Analiza contactului dintre sculă şi semifabricat

Procesul de deformare plastică incrementală într-un singur punct constă în deformarea semifabricatului de tip tablă într-o zonă relativ mică, determinată de mărimea contactului dintre sculă şi semifabricat. Mărimea suprafeței de contact dintre sculă și semifabricat se modifică pe parcursul procesului, în funcție de geometria zonei active a sculei utilizată, de poziția unghiulară a sculei (atunci când geometria zonei activă este variabilă) și de poziția sculei pe traiectoria de generare, iar acest lucru influențează evoluţia forțelor de deformare şi a temperaturilor de prelucrare.

6.3. Rezultate privind forța de prelucrare

Prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază R=10 mm (SS10)

Scula cu cap semisferic cu rază de 10 mm (SS10) s-a utilizat în experimentele E1 şi E2, care au fost realizate în aceleaşi condiţii experimentale. Evoluția forțelor de deformare pe cele trei direcții de măsurare, X, Y și Z, la realizarea primului experiment (E1) se prezintă în Fig.6.8.

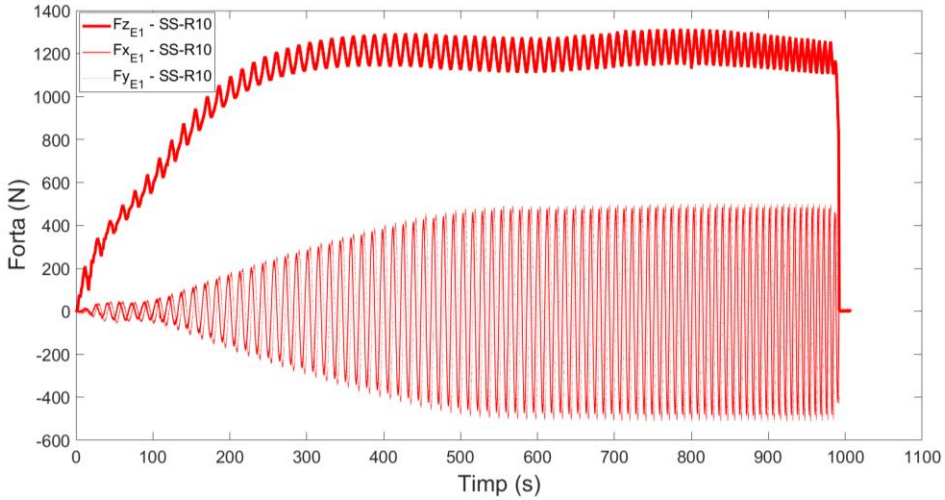


Fig.6.8. Evoluția forțelor de deformare pe direcțiile X, Y și Z,
la prelucrarea cu sculă semisferică cu rază de10 mm (SS10 - E1)

Se observă o foarte bună suprapunere a forțelor Fz din cele două experimente, ceea ce confirmă repetabilitatea experimentelor și capabilitatea sistemului de măsurare a forțelor de a măsura corect

forțele care apar în timpul procesului de deformare plastică incrementală într-un singur punct. Forțele pe direcțiile X și Y au o evoluție simetrică, așa cum era de așteptat, ca urmare a configurației sistemului experimental, atingând o valoare maximă de aproximativ 500N. Forța pe direcția Z, cea de interes major în cadrul proceselor SPIF, are o evoluție diferită, ajungând la o valoare maximă de aproximativ 1315 N.

Prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază R=5 mm (SS5)

Prelucrările cu scula cap semisferic cu rază R=5 mm (SS5) pe sistemul elastic s-au realizat experimentele E3 şi E4. Evoluția forțelor de deformare pe cele trei direcții de măsurare, X, Y și Z, în cadrul celui de-al treilea experiment (E3) este prezentată în Fig.6.14.

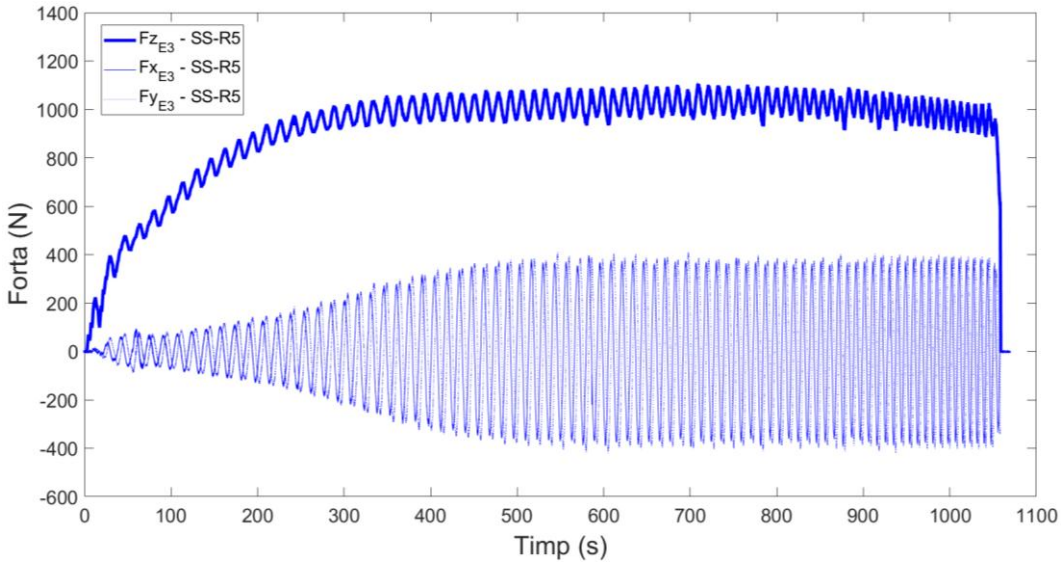


Fig.6.14. Evoluția forțelor de deformare pe direcțiile X, Y și Z,
la prelucrarea cu sculă semisferică cu rază de 5mm (SS5 - E3)

Evoluţiile forţelor de deformare la prelucrarea cu sculă semisferică cu raza R=5 mm sunt similare cu cele de la prelucrarea cu sculă semisferică cu raza R=10 mm, dar valorile maxime ale acestora sunt mai mici: aproximativ 400N pentru forţele pe direcțiile X și Y, respectiv, aproximativ 1105 N pentru forța pe direcția Z. Totodată, se constată o evoluţie aproape identică a forţelor de deformare Fz, ceea ce probează – şi în acest caz – repetabilitatea realizării experimentelor din punctul de vedere al forţelor de deformare.

Prelucrarea cu scula inovativă (ETVR)

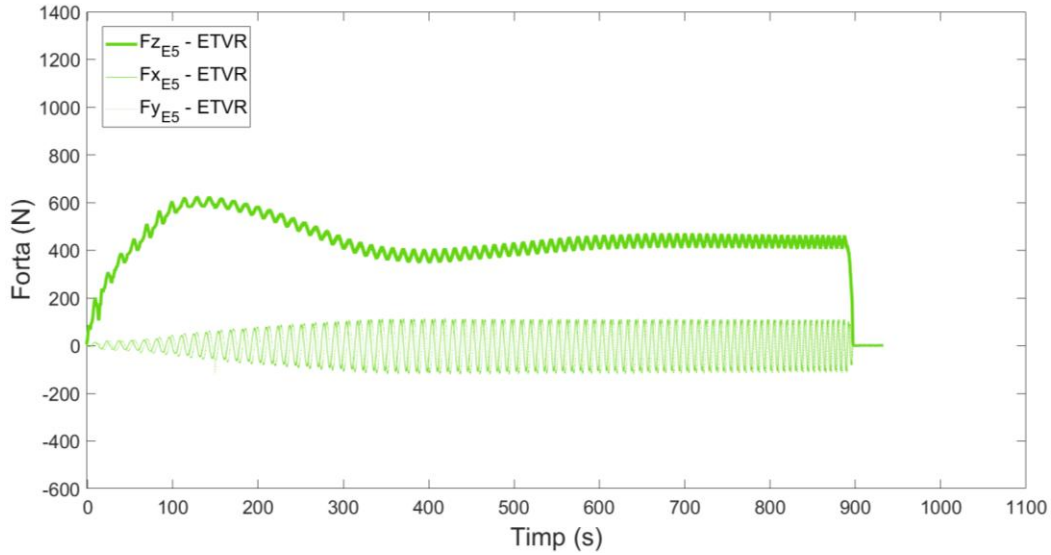


Fig.6.17. Evoluția forțelor de deformare pe direcțiile X, Y și Z,
la prelucrarea cu scula excentrică cu rază variabilă (ETVR - E5)

Prelucrările cu scula inovativă ETVR s-au realizat în cadrul experimentelor E5 şi E6. Evoluția forțelor de deformare pe cele trei direcții în timpul experimentului E5 este prezentată în Fig.6.17.

Însă, evoluția forțelor de deformare la prelucrarea cu scula ETVR este diferită de evoluția forțelor la prelucrarea cu scule cu cap semisferic, în special pe direcţia Z. Forța de deformare Fz are o creștere inițială mai rapidă, atingând un maxim Fz = 625N, apoi scade și, spre finalul procesului, se stabilizează la o valoare de 470N. Forțele pe direcția X și Y au o creștere aproape constantă în prima parte a procesului de deformare incrementală, după care se stabilizează la o valoare de 115N.

6.4. Rezultate privind temperaturile de prelucrare

Calibrarea camerei termografice

Camerele termografice măsoară radiația infraroșie emisă de obiectele analizate. Ele sunt calibrate în fabrică folosind surse de temperatură cunoscute (corpuri negre calibrate), asigurând astfel conversia precisă a semnalului electric în temperatură și corectarea abaterii termice interne. În practică, camerele cu termoviziune pot fi reglate manual în legătură cu emisivitatea suprafeţei observate, prin intermediul unor profiluri preconfigurate, în funcție de material. Însă, emisivitatea suprafețelor este diferită în funcţie de condiţiile de observare concrete. Din acest motiv, se propune o metodă de calibrare a camerei termografice, specifică condiţiilor experimentale ale procesului studiat, care este descrisă în cele ce urmează.

Prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază R=10 mm (SS10)

Evoluția temperaturii în experimentul E1, realizat la prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază de 10 mm (SS10) pe sistemul experimental elastic se prezintă în Fig.6.22. Evoluţia asemănătoare a temperaturilor din cele două experimente demonstrează repetabilitatea experimentelor pe sistemul experimental de cercetare și din punct de vedere al temperaturilor măsurate.

Temperatura măsurată în procesul de prelucrare porneşte de la valoarea temperaturii mediului ambiant, în jur de 21°C. Ca urmare a frecării dintre sculă și semifabricat, temperatura crește continuu, mai intens la începutul procesului şi mai lent ulterior, ca urmare a variaţiei suprafeţei de contact sculă-semifabricat. Valoarea maximă a temperaturii, atinsă la finalul procesului de deformare, este cuprinsă între 145 şi 148,1°C.

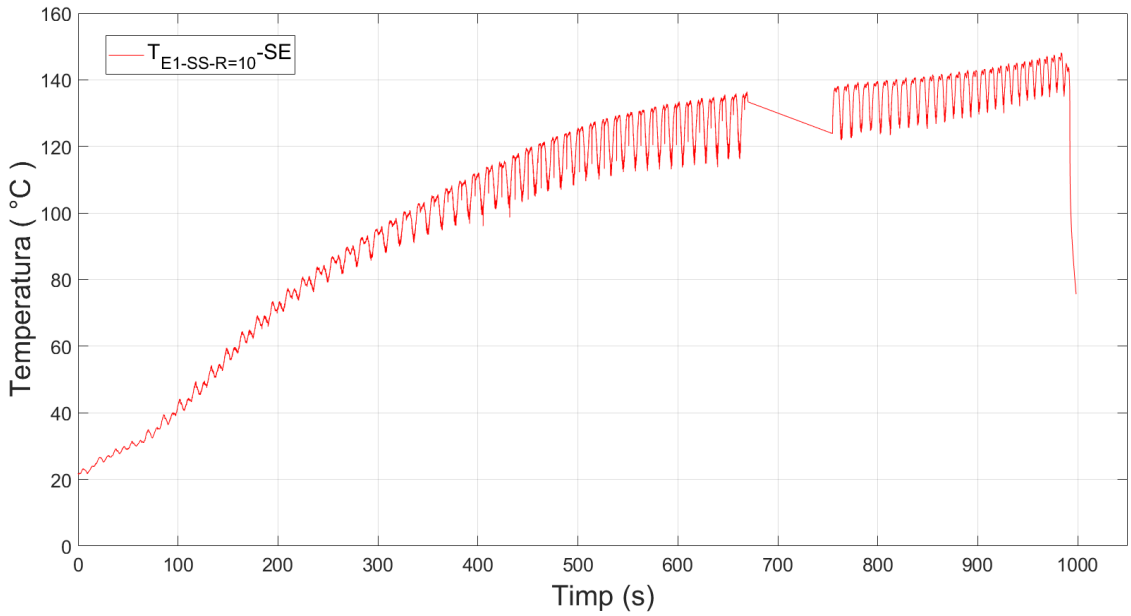


Fig.6.22. Evoluția temperaturii din proces, la prelucrarea cu scula cu cap semisferic SS10 - E1

Prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază R=5 mm (SS5)

Evoluția temperaturii în experimentul E3, constând în prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază de 5 mm (SS5) pe sistemul experimental elastic, se prezintă în Fig.6.26.

Temperatura măsurată în procesul de prelucrare porneşte de la o valoare în jur de 27°C, mai mare decât cea de la experimentele E1 şi E2 datorită încălzirii incintei de lucru a maşinii-unelte. Evoluția temperaturii din procesul de prelucrare este similară cu evoluţia de la prelucrarea cu scula SS10, valorile maxime la finalul prelucrării fiind cuprinse între 146,9 şi 148,3 °C.

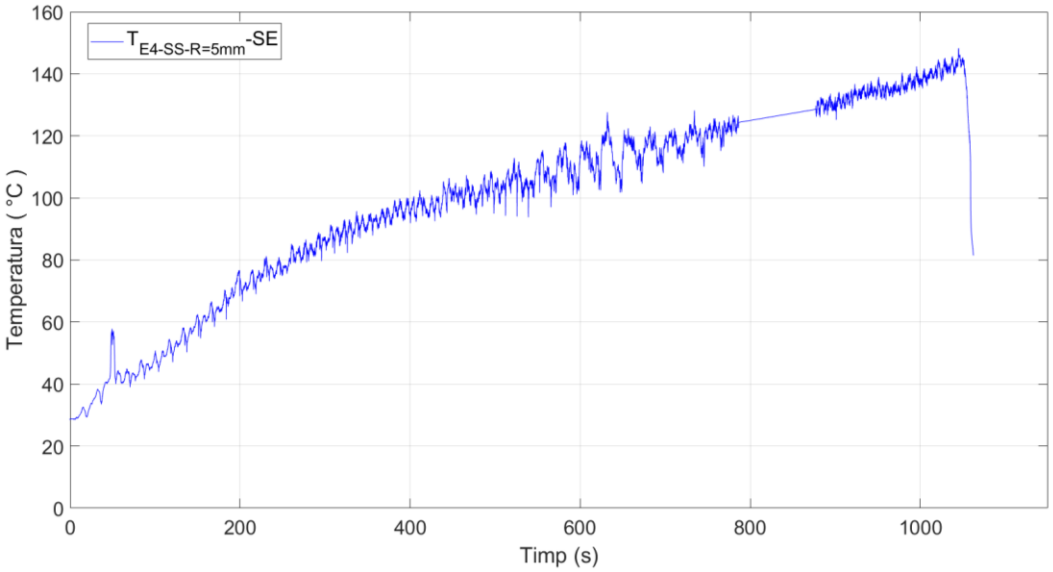


Fig.6.26. Evoluția temperaturii din proces, la prelucrarea cu sculă semisferică cu cap semisferic SS5 - E13

Prelucrarea cu scula inovativă (ETVR)

Evoluția temperaturii la prelucrarea cu scula inovativă ETVR pe sistemul experimental elastic se prezintă în Fig.6.29 pentru experimentul E5.

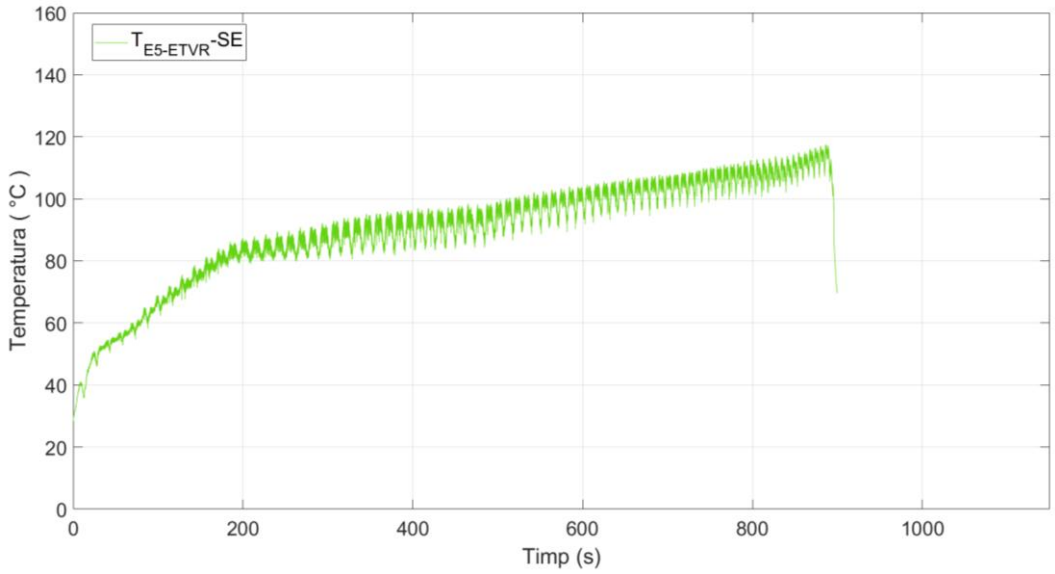


Fig.6.29. Evoluția temperaturii din proces, la prelucrarea cu scula inovativă ETVR - E5

Temperatura măsurată în procesul de prelucrare porneşte de la aproximativ 28°C, valoare mai mare decât cea de la experimentele E1 - E4, cauzată de încălzirea în continuare a incintei de lucru a maşinii-unelte. Temperatura maximă este atinsă la finalul prelucrării și are valori cuprinse între 115 şi 117,4 °C, mai mici decât la prelucrarea cu scule cu cap semisferic.

Capitolul 7. Dezvoltarea unei metodologii de măsurare prin scanare 3D a geometriei piesei prelucrate

Metodologia prezentată în cadrul acestui capitol a fost dezvoltată în cadrul stagiului de cercetare doctorală desfășurat în perioada 17.06 – 05.07.2024 la Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne. Cercetările prezentate în acest capitol includ și elemente publicate ale autorului [B01] şi sunt prezentate după cum urmează.

7.1. Tehnica de scanare

Pentru scanarea 3D a unei piese se parcurg etapele ce urmează.

1. Curăţarea pieselor.

2. Aplicarea unei pudre pe suprafeţele piesei.

3. Orientarea şi fixarea piesei.

4. Marcarea punctelor de referinţă în sistemul de orientare şi fixare a piesei.

5. Scanarea propriu-zisă a piesei.

6. Prelucrarea primară a datelor în softul specific echipamentului de scanare.

7.2. Metodologia de determinare a parametrilor de precizie geometrică a piesei

7.2.1. Descrierea metodologiei

Analiza preciziei geometrice a pieselor prelucrate s-a realizat pe baza a doi parametri: grosimea pereţilor piesei şi abaterea de la forma dată a profilului piesei. Cei doi parametri s-au determinat cu ajutorul metodologiei prezentată în continuare, bazată pe prelucrarea în softul Matlab a datelor primare obţinute prin scanare.

1. Reprezentarea rezultatelor scanării.

2. Poziţionarea norului de puncte.

3. Separarea suprafeţelor exterioare şi interioare ale piesei.

4. Corectarea poziției între suprafețe

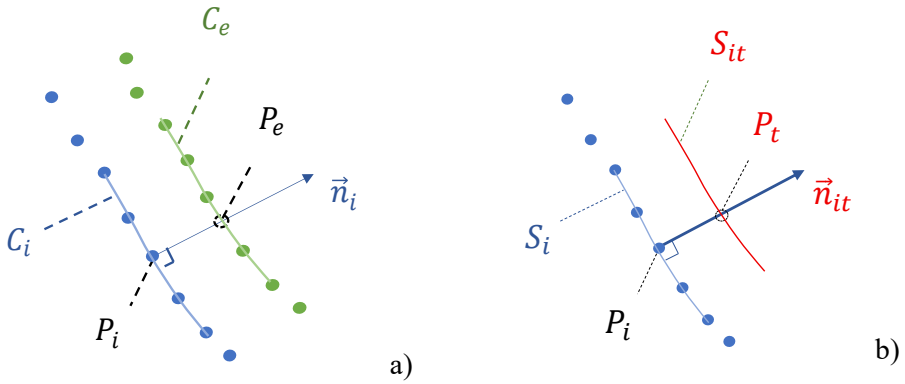
5. Construirea formei teoretice a piesei.

6. Determinarea parametrilor care caracterizează precizia geometrică a piesei prelucrate.

Pentru a determina corect cei doi parametrii de precizie geometrică ai piesei prelucrate este necesar ca cele două suprafeţe ale piesei, suprafața inferioară C_i/S_i și suprafața superioară C_e să fie corect definite şi poziţionate în norul de puncte achiziţionat numeric. Acest lucru se realizează prin analizarea orientărilor normalelor la norii de puncte ce definesc cele două suprafeţe, care sunt precalculate în fișierul .stl preluat ca dată de intrare.

Deoarece densitatea punctelor pe o suprafață este limitată de sistemul de achiziție al scanerului (distanţa minimă între două puncte nu poate fi mai mică de 0,1 mm), măsurarea clasică a distanţei punct-la-punct (punctul cel mai apropiat) nu este adecvată [A12]. Prin urmare, este necesară o interpolare a suprafețelor pentru a reduce eventualele artefacte de măsurare pe aceste suprafețe discrete. Acest lucru se realizează în softul Matlab, prin identificarea unei suprafețe polinomiale $C_{i,e}$ de ordinul 2, utilizând metoda celor mai mici pătrate. Această suprafaţă se construiește succesiv în jurul fiecărui punct $P_{i,e}$, folosind toate punctele ce se regăsesc la o distanță mai mică sau cel mult egală cu mărimea de investigat, notată z_i. În cazul de faţă, s-a ales z_i = 0,3 mm deoarece această

valoare asigură, pe de o parte, un număr minim de puncte pentru identificarea celor 6 parametri ai suprafeței și, pe de altă parte, asigură o aproximare corectă a zonelor cu o variație locală importantă a curburii. Astfel se creează succesiv câte o suprafață de interpolare pătratică C_i și C_e, care trece prin cele mai apropiate puncte măsurate, pentru fiecare dintre cele două suprafeţe ale piesei prelucrate.



Suprafața interioară S_i este reprezentată cu **albastru**; Suprafața exterioară C_e este reprezentată cu **verde**; Suprafața interioară teoretică S_{it} este marcată cu **roşu**

Fig.7.9. Metoda de calcul al parametrilor de precizie geometrică ai piesei prelucrate:
a) determinarea grosimii peretelui, *g*; b) determinarea abaterii de la forma dată a profilului, *a*

Odată generate cele două suprafeţe netezite, C_i și C_e, se pot calcula cei doi parametrii de precizie geometrică definiţi anterior, conform schemelor din Fig.7.9. Dacă P_i este un punct ce aparţine suprafeței C_i, P_e este un punct ce aparţine suprafeței C_e, și P_t este un punct ce aparţine suprafeței S_{it}, atunci cei doi parametri se calculează astfel:
- g = distanța dintre punctul P_i și suprafața C_e, notată cu $d(P_i,C_e)$;
- a = distanța dintre punctul P_i și suprafața S_{it}, notată cu $d(P_i,S_{it})$.

Se menţionează că aplicarea metodologiei anterior prezentate în softul Matlab este de mare complexitate, fiind bazată pe manipularea unui volum important de date, construirea unor programe specifice (scripturi Matlab) şi rularea acestora.

7.2.2. Validarea modului de calcul al grosimii peretelui piesei

În cadrul metodologiei de determinare a parametrilor de precizie geometrică a piesei prelucrate, eroarea de calcul poate proveni de la metoda de calcul a grosimii peretelui piesei. Pentru a verifica corectitudinea metodei propuse, piesa măsurată ar putea fi tăiată prin plane decalate unghiular care trec prin axa de revoluție a piesei, apoi utilizate metode convenționale de măsurare pentru a măsura grosimile în aceste zone și a le compara cu valorile calculate. Cu toate acestea, această metodă de verificare prezintă două neajunsuri: 1) metoda de prelucrare ar putea reduce grosimea piesei în vecinătatea tăieturii; 2) informațiile obținute ar fi parțiale (măsurare punctuală) și incomplete pentru întreaga piesă. Prin urmare, validarea modului de calcul al grosimii peretelui piesei s-a realizat prin calculul grosimii peretelui pentru o piesă etalon, generată numeric, cu o geometrie 3D ideală (grosime constantă, de 1 mm).

Capitolul 8. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influența formei sculei asupra calităţii pieselor prelucrate prin deformare plastică incrementală

Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influența formei sculei asupra calităţii pieselor prelucrate prin deformare plastică incrementală, care includ și elemente publicate ale autorului [B03], sunt prezentate după cum urmează.

8.1. Standul experimental pentru prelucrarea pieselor şi pregătirea eşantioanelor pentru măsurare

Experimentele pentru analiza influenței formei sculei asupra calităţii pieselor prelucrate prin deformare plastică incrementală, E7 – E12, s-au realizat pe „sistemul experimental rigid" (vezi §5.4). Faţă de „sistemul experimental elastic" descris în §6.1, sistemul experimental rigid nu cuprinde dinamometrul pentru măsurarea forţelor şi, în consecinţă, nici placa suport dinamometru. Pentru măsurarea celor trei parametri (grosime, rugozitate și microduritate) s-au stabilit trei zone specifice generatoarei piesei prelucrate: B (bază), M (Mijloc) și V (Vârf), Fig.8.3.

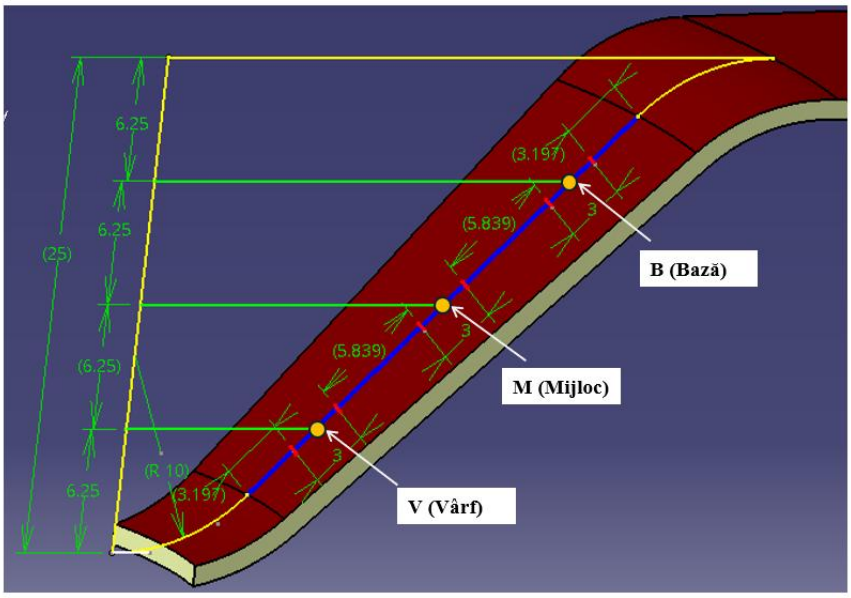


Fig.8.3. Stabilirea zonelor de măsurare a parametrilor grosime, rugozitate și microduritate

8.2. Microaşchiile de prelucrare. Aspectul vizual al suprafeţelor prelucrate

La prelucrarea prin deformare plastică incrementală într-un singur punct rezultă microașchii care apar din cauza frecării intense locale dintre zona activă a sculei și semifabricat. Mărimea acestora depinde de condițiile concrete ale prelucrării, fiind influențată de forma zonei active a sculei, materialul semifabricatului, forma geometrică a piesei, viteza de avans Va, turația sculei n, lubrifiant etc. De aceea, după realizarea fiecărui experiment au fost analizate vizual microașchiile rezultate în urma prelucrării. Apoi, acestea au fost colectate şi analizate la microscopul optic.

Microaşchiile şi aspectul vizual al suprafeţelor la prelucrarea cu scula SS10

Se constată că pe suprafaţa piesei există un strat de microaşchii foarte fine, care sunt detaşate din semifabricatul prelucrat ca urmare a frecării dintre sculă şi semifabricat. Dimensiunile microaşchiilor sunt cuprinse între 7 şi 18 μm, iar dimensiunile preponderente sunt de aproximativ 12 μm.

Microaşchiile şi aspectul vizual al suprafeţelor la prelucrarea cu scula SS5

Pe suprafaţa prelucrată a piesei se remarcă existenţa unui volum important de microaşchii, multe dintre acestea având dimensiuni relativ mari. Analiza optică a microașchiilor, realizată cu o mărire 50x, relevă faptul că acestea au dimensiuni cuprinse între 21 şi 83 μm. Dimensiunile preponderente ale aşchiilor sunt de aproximativ 45 μm.

Microaşchiile şi aspectul vizual al suprafeţelor la prelucrarea cu scula ETVR

Aşchiile rezultate la prelucrarea cu scula inovativă ETVR sunt într-o cantitate foarte mică. Acestea sunt foarte fine, iar analiza lor la microscopul optic la o mărire de 50x, relevă dimensiuni cuprinse între 2 şi 51 μm, cu dimensiuni preponderente de aproximativ 8 μm.

8.3. Precizia geometrică a pieselor prelucrate

Geometria pieselor prelucrate a fost evaluată pe baza parametrilor grosimea pereţilor piesei, ***g*** şi abaterea de la forma dată a profilului piesei, ***a***. Aceştia au fost determinaţi conform metodologiei dezvoltată şi prezentată în capitolul 7. Achiziția datelor prin scanare a fost realizată în laboratorul CRC&D-Auto din Centrul Universitar Piteşti, cu echipamentul GO!scan 3D, iar prelucrarea acestora s-a realizat cu softul Matlab.

Precizia geometrică a pieselor prelucrate cu scula SS10

- *Grosimea pereților piesei prelucrată cu scula SS10*

Grosimea pereților piesei prelucrată cu scula SS10 a fost determinată pentru piesa prelucrată în experimentul E9. Variaţia grosimii peretelui piesei suprapusă cu profilul teoretic al piesei obiectiv se prezintă în Fig.8.20. Valorile cele mai mari ale grosimii peretelui piesei se găsesc pe suprafața flanșei și pe baza mică a trunchiului de con, acolo unde materialul nu a fost deformat, păstrând dimensiunea inițială (egală cu grosimea semifabricatului inițial de aproximativ 1 mm).

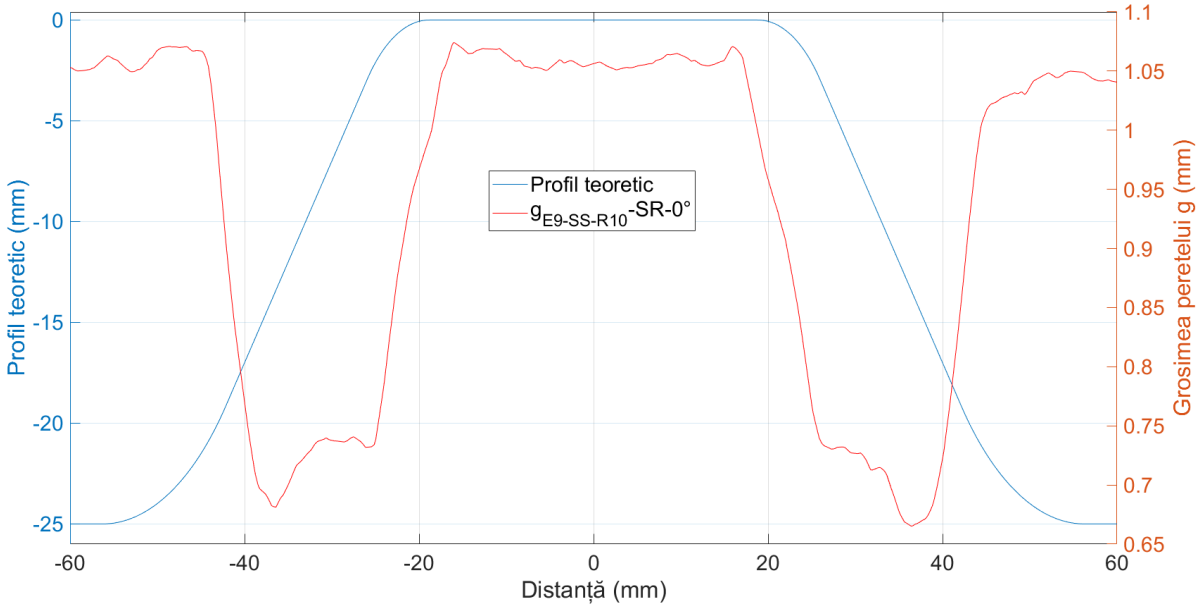


Fig.8.20. Profilul teoretic şi grosimea peretelui piesei prelucrate cu scula SS10 – E9

- *Abaterea de la forma dată a profilului piesei prelucrată cu scula SS10*

În Fig.8.25 s-au reprezentat pe acelaşi grafic profilul teoretic al piesei și abaterea de la forma dată a profilului suprafeței interioare.

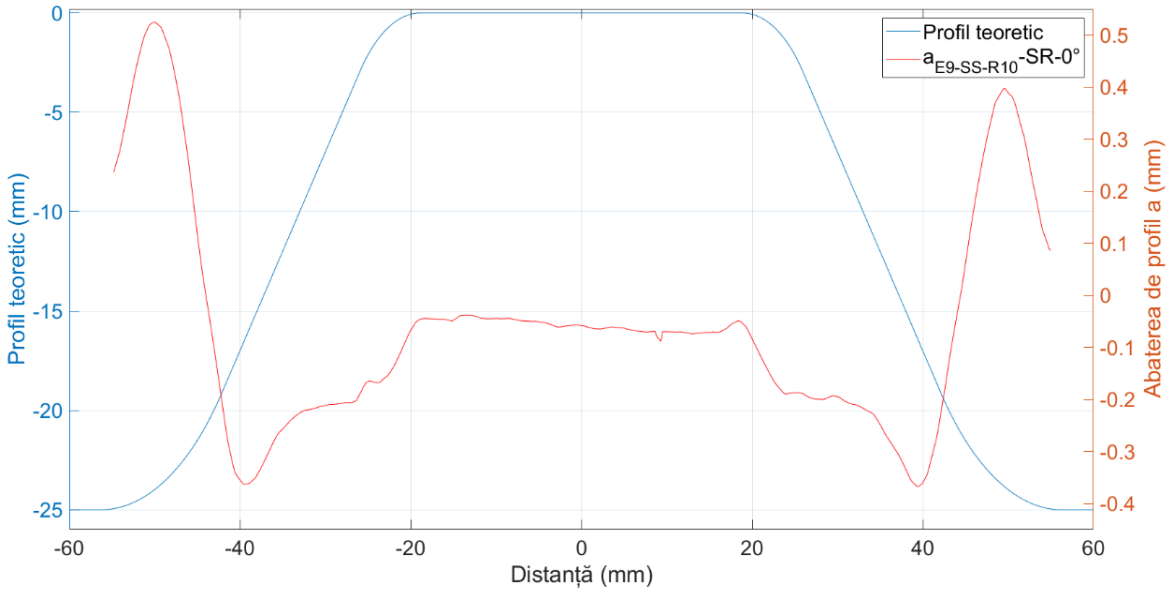


Fig.8.25. Profilul teoretic şi abaterea de la forma dată a profilului prelucrate cu scula SS10 – E9

În vârful trunchiului de con, unde materialul nu a fost deformat, se înregistrează o abatere minimă de la forma dată a profilului, dar se poate observa defectul numit ”efectul de pernă”. Abaterile de la forma data a profilului suprafeței cele mai mari, cu valori de peste 0,2 mm, se înregistrează în zona superioară a trunchiului de con.

Precizia geometrică a pieselor prelucrate cu scula SS5

- *Grosimea pereților piesei prelucrată cu scula SS5*

Valorile cele mai mari ale grosimii piesei se găsesc pe suprafața flanșei și pe baza mică a trunchiului de con, acolo unde materialul nu a fost deformat, păstrând dimensiunea inițială (egală cu grosimea semifabricatului inițial de aproximativ 1 mm). Zona cu cea mai mică grosime a peretelui piesei, g=0,68, în care materialul prezintă o subțiere excesivă, este zona de la baza trunchiului de con. Subţierea peretelui piesei este maximă în această zonă din cauza faptului că semifabricatul este încastrat, ceea ce determină ca această zonă să fie prima deformată şi alungită continuu, odată cu avansarea sculei spre centrul trunchiului de con.

- *Abaterea de la forma dată a profilului piesei prelucrată cu scula SS5*

În vârful trunchiului de con, unde materialul nu a fost deformat, se înregistrează o abatere minimă de la forma dată a profilului, dar mai mare decât la prelucrarea cu scula SS10. De asemenea, se constată existenţa defectului numit ”efectul de pernă”, care este mult mai pronunţat. Abaterile de la forma dată a profilului cele mai mari, cu valori de aproximativ 0.4 mm, se înregistrează în zona superioară a trunchiului de con. Abaterea de la forma dată a profilului piesei creşte rapid în valoare absolută, pornind de la valoarea nulă în apropierea zonei inelului de reţinere (baza trunchiului de con), ajunge la o valoare maximă absolută de aproximativ 0.26 mm în zona diametrului ∅40, apoi scade la 0.02 în zona vârfului trunchiului de con. La mijlocul înălţimii conului are valoarea de 0.27 mm.

Precizia geometrică a pieselor prelucrate cu scula ETVR

- *Grosimea pereților piesei prelucrată cu scula ETVR*

Valorile cele mai mari ale grosimii piesei se găsesc pe suprafața flanșei și pe baza mică a trunchiului de con, acolo unde materialul nu a fost deformat, păstrând dimensiunea inițială (egală cu grosimea semifabricatului inițial de aproximativ 1 mm). Zona cu cea mai mică grosime a peretelui piesei, g=0,68, în care materialul prezintă o subțiere excesivă, este zona de la baza trunchiului de con. Subţierea peretelui piesei este maximă în această zonă din cauza faptului că semifabricatul este încastrat, ceea ce determină ca această zonă să fie prima deformată şi alungită continuu, odată cu avansarea sculei spre centrul trunchiului de con. Prin urmare, odată cu subţierea continuă a acestei

zone rezistenţa ei scade, crescând riscul de a se rupe. Spre vârful trunchiului de con, grosimea peretelui piesei creşte progresiv până la valoarea g=1mm, cea a materialului nedeformat.

- *Abaterea de la forma dată a profilului piesei prelucrată cu scula ETVR*

Abaterile de la forma dată a profilului cele mai mari, cu valori de aproximativ 0.5 mm, se înregistrează în zona superioară a trunchiului de con. Abaterea de la forma dată a profilului piesei creşte rapid în valoare absolută (abaterile de la forma dată a profilului sunt negative: profilul interior efectiv al piesei este poziţionat în interiorul profilului teoretic al trunchiului de con), pornind de la valoarea nulă în apropierea zonei inelului de reţinere (baza trunchiului de con), ajungând la o valoare maximă absolută de aproximativ 0.45 mm în zona diametrului de ∅40, după care scade către o valoare de 0.18 mm în zona vârfului trunchiului de con.

Grosimea pereţilor pieselor măsurată cu micrometrul

Determinarea grosimii pereților pieselor prelucrate s-a realizat prin scanare 3D, conform metodologiei dezvoltate și prezentate în capitolul 7. Având în vedere faptul că au fost realizate eşantioane pentru măsurarea rugozităţii şi a microdurităţii, s-au realizat şi măsurători ale grosimii pereţilor, conform celor menţionate în §8.1, pentru a le compara cu cele obţinute prin scanare.

8.4. Rugozitatea suprafeţelor pieselor prelucrate

Măsurarea rugozităţii suprafeţei semifabricatului (tablei laminate) şi a pieselor prelucrate prin deformare plastică incrementală s-a realizat conform standardului ISO 21920-2:2021 şi ISO 21920-3:2021 [I04], [I05] utilizând rugozimetrul MITUTOYO SJ210.

Rugozitatea suprafeţelor pieselor prelucrate cu scula SS10

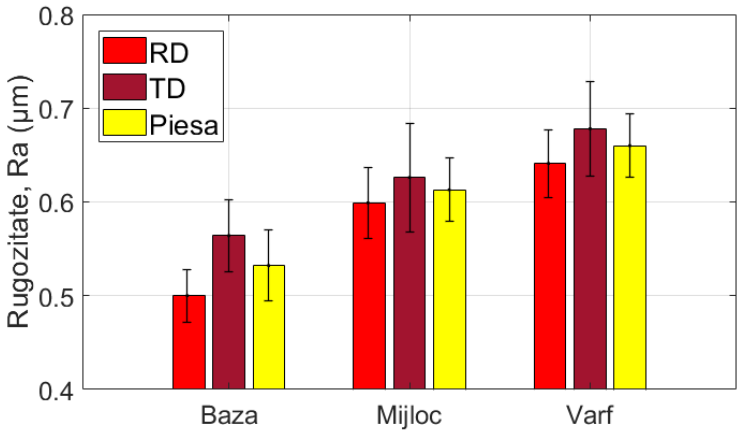


Fig.8.51. Rugozitatea Ra a piesei prelucrată cu scula SS10

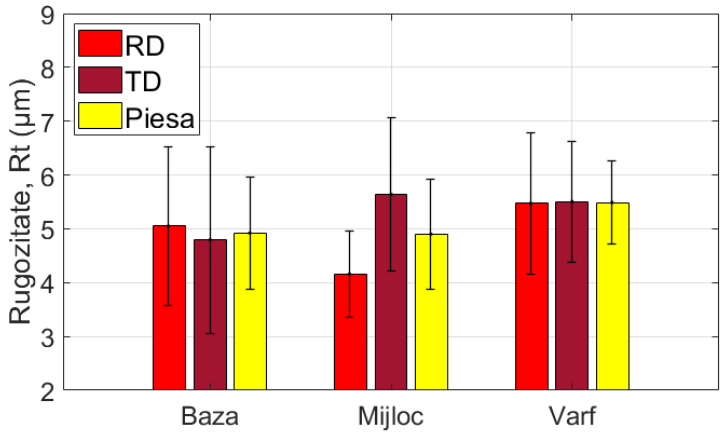


Fig.8.52. Rugozitatea Rt a piesei prelucrată cu scula SS10

Valorile medii ale parametrilor Ra şi Rt asociate celor două direcţii specifice semifabricatului, respectiv, piesei se prezintă grafic în Fig.8.51, respectiv, Fig.8.52.

Rugozitatea suprafeţelor pieselor prelucrate cu scula SS5

În Fig.8.53 se prezintă grafic valorile medii ale parametrilor Ra asociate celor două direcţii specifice semifabricatului, respectiv, piesei.

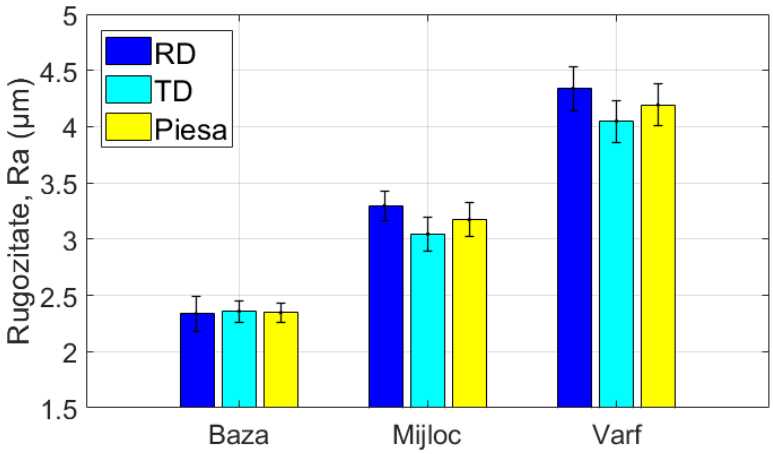


Fig.8.53. Rugozitatea Ra a piesei prelucrată cu scula SS5

Rugozitatea suprafeţelor pieselor prelucrate cu scula ETVR

În Fig.8.55 se prezintă grafic valorile medii ale parametrilor Ra asociate celor două direcţii specifice semifabricatului, respectiv, piesei.

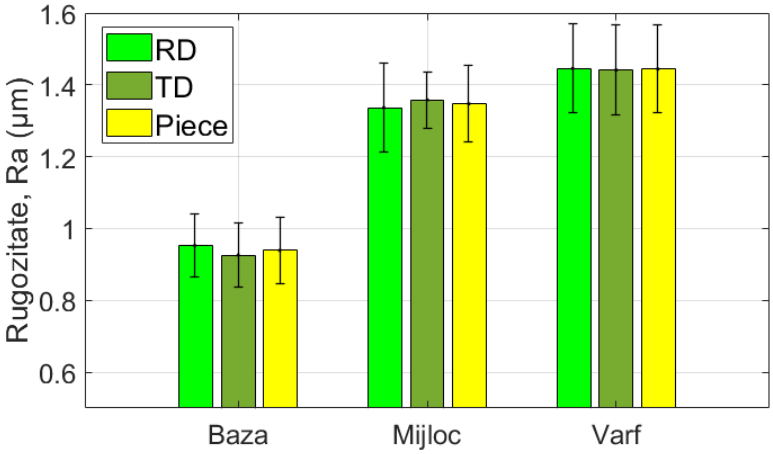


Fig.8.55. Rugozitatea Ra a piesei prelucrată cu scula ETVR

8.5. Microduritatea stratului superficial al pieselor prelucrate

Microduritatea din stratul superficial al semifabricatului (tablei laminate) şi a suprafeţelor prelucrate s-a măsurat prin metoda Vickers, utilizând o sarcină de apăsare de 300gf.

Microduritatea stratului superficial al pieselor prelucrate cu scula SS10

Valorile medii ale microdurităţii HV asociate celor două direcţii specifice semifabricatului, respectiv, piesei se prezintă grafic în Fig.8.59.

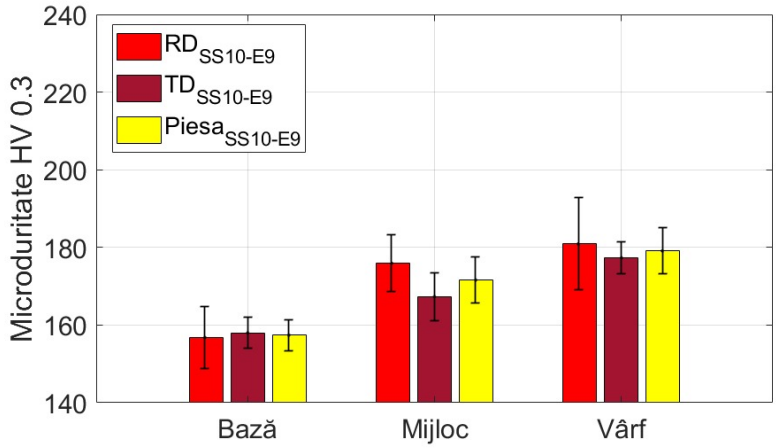


Fig.8.59. Microduritatea medie HV 0.3 măsurată pe piesa prelucrată cu scula SS10

Valorile medii ale microdurităţii HV asociate celor două direcţii specifice semifabricatului, respectiv, piesei se prezintă grafic în Fig.8.60.

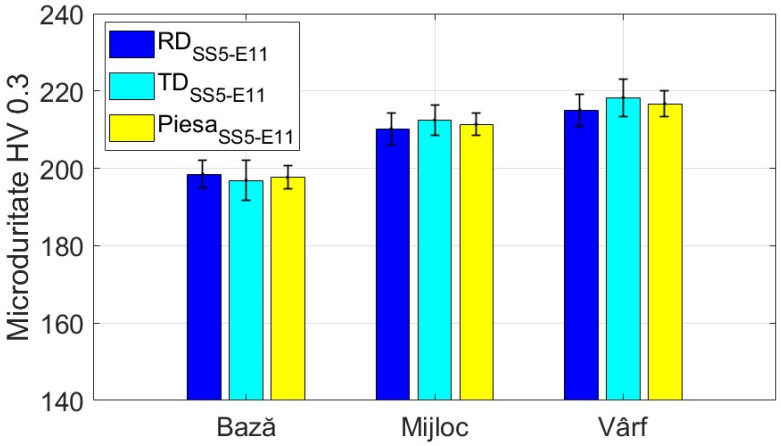


Fig.8.60. Microduritatea medie HV 0.3 măsurată pe piesa prelucrată cu scula SS5

Microduritatea stratului superficial al pieselor prelucrate cu scula ETVR

Valorile medii ale microdurităţii HV asociate celor două direcţii specifice semifabricatului, respectiv, piesei se prezintă grafic în Fig.8.61.

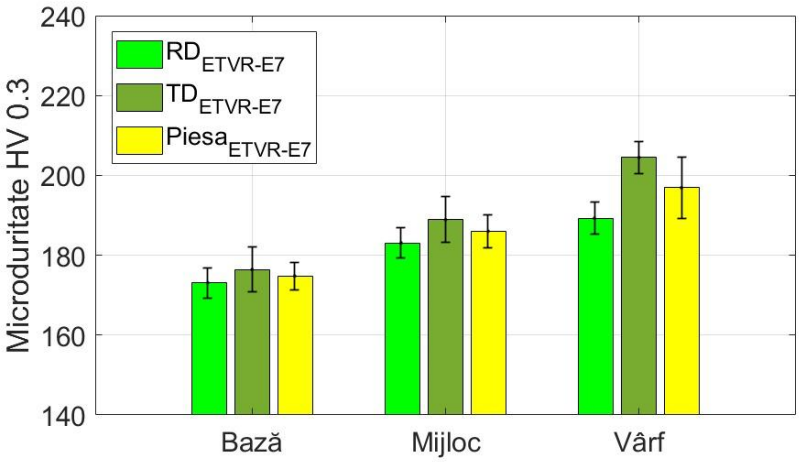


Fig.8.61. Microduritatea medie HV 0.3 măsurată pe piesa prelucrată cu scula ETVR

Capitolul 9. Modelarea și simularea numerică a procesului de deformare plastică incrementală

Rezultate ale cercetării privind modelarea și simularea numerică a procesului de deformare plastică incrementală, care includ și elemente publicate ale autorului [B02], sunt prezentate după cum urmează.

9.1. Construirea modelelor numerice

Pentru înțelegerea şi analiza aprofundată a procesului de deformare plastică incrementală s-au dezvoltat modele numerice care utilizează metoda elementelor finite. Acestea s-au realizat pentru simularea prelucrării SPIF cu sculele cu cap semisferic de raze diferite: scula cu rază de 10 mm – SS10, respectiv, scula cu rază de 5 mm – SS5.

Ipotezele de modelare a solidelor

Construcția unui astfel de model de simulare necesită alegerea modului de reprezentare a diferitelor elemente componente, în așa fel încât să obținem un model ce conduce la rezultate robuste, dar cu un timp de calcul rezonabil.

Datorită ipotezei de corp nedeformabil asociat sculei, este necesar să definim un punct de referință și să îl asociem acestuia, constrângerea de tip ”kinematic coupling”. Astfel, traiectoria impusă sculei constă în impunerea unei mişcări acestui punct prin definirea evoluției coordonatelor în funcție de timp.

Comportamentul de frecare

Un aspect foarte important în simularea procesului de deformare este modul în care este modelat contactul între sculă și piesă, dar și între piesă și matriță, considerată fixă. Temperatura ce ia naștere în piesă este strâns legată de modul în care este modelat contactul între diferitele solide, în special acolo unde există o mișcare relativă importantă, caracterizată de o presiune de contact importantă. În studiul de față, s-a folosit un contact de tip „penalty” în direcția tangențială și „hard contact” în direcția normală, cu un coeficient de frecare de 0.15 [A10].

Condițiile la limită

Condițiile la limită sunt condiții de tip „deplasare”. Astfel, toate suprafețele matriței sunt rigide și au blocate toate gradele de libertate, creând o condiție de tip încastrare. Experimental, semifabricatului i se anulează gradele de libertate prin aplicarea unei presiuni de strângere între placa de presiune și matriță. Definirea acestei condiții la limită, similară cu cea impusă în experiment, conduce la o creștere considerabilă a duratei de calcul. Traiectoria sculei este definită prin viteza de deplasare $\overrightarrow{v_a}$, considerată constantă și egală cu 16,6 mm/s. Această traiectorie este impusă prin definirea celor trei coordonate asociate punctului de referinta RP 1.

Comportamentul termic

Temperatura generată în procesul de deformare provine, în principal, din două surse distincte: frecarea dintre sculă și semifabricat și din deformarea în domeniul plastic a semifabricatului. Astfel, s-a impus un schimb de căldură între suprafața eșantionului modelat printr-un coeficient de convecţie liberă h_c =20 W/(m^2.K) [E02]. Fracția de conversie a lucrului mecanic în căldură a fost considerată 0.95.

Discretizarea modelului și minimizarea timpului de calcul

Datorită caracterului dinamic al modelului, durata de calcul este influențată de mărimea elementului finit. Influența mărimii elementului finit are loc prin intermediul incrementului stabil de timp Δt. Cu

cât acest parametru este mai mare, cu atât durata de calcul este mai mică. S-a ales discretizarea reprezentată în Fig.9.3, în așa fel încât să se obțină o distribuție relativ uniformă a elementelor, precum și convergența diferitelor mărimi de ieșire (tensiuni, deformații etc.) cu o durată de calcul rezonabilă (40 ore) pentru un timp al procesului de simulat de 1058s.

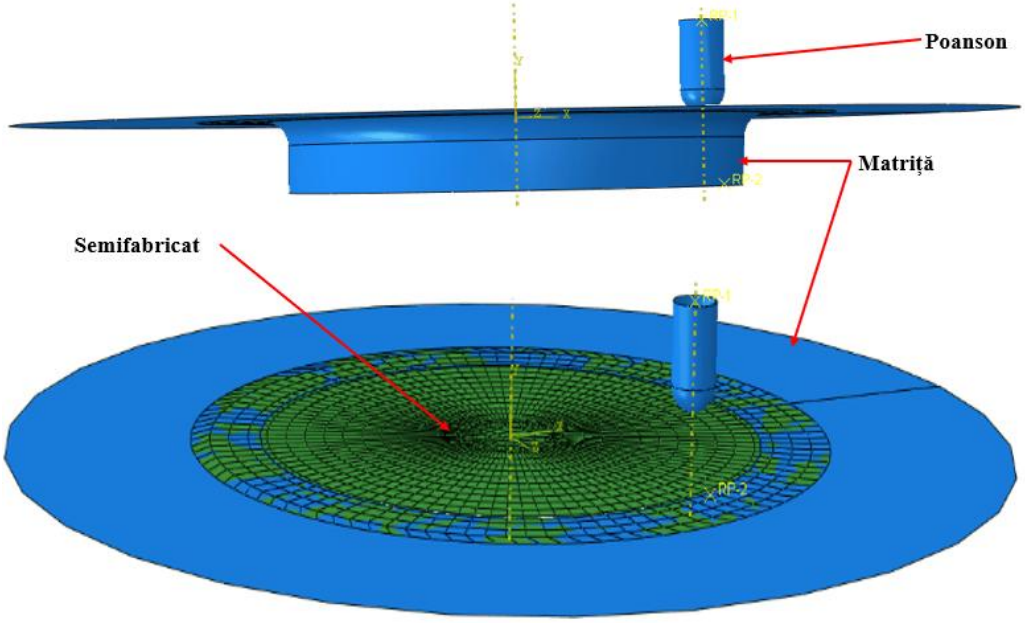


Fig.9.3. Modelul numeric dezvoltat pentru sculele cu cap semisferic (SS10 și SS5)

Principalele elemente componente ale modelului numeric sunt: scula, matrița și semifabricatul. Scula (de tip poanson) a fost realizată prin definirea profilului suprafeței care a fost rotit la 360˚ în jurul axei sale de simetrie, obținând astfel suprafața acesteia. În funcție de scula utilizată s-a definit raza zonei active: de 10 mm (SS10) sau de 5 mm (SS5). Suprafața a fost definită ca suprafață analitică. La rândul ei, matrița a fost definită tot ca suprafață analitică și a fost aceeași pentru simulările cu cele două scule. S-a realizat un segment care definește suprafața plană care intră în contact cu semifabricatul, peretele vertical și raza de racordare de 5 mm, care corespunde dimensiunilor efective ale plăcii specifice din componența dispozitivului de orientare și fixare a semifabricatului. Semifabricatul de formă circulară a fost definit ca suprafață ”shell” cu grosimea de 1 mm (așa cum este semifabricatul real), iar discretizarea este ca cea prezentată în Fig.9.3. Pentru discretizarea semifabricatului s-au utilizat 1735 elemente quadratice și 24 elemente triunghiulare.

Comportamentul termomecanic

Un aspect foarte important în modelarea numerică este descrierea comportamentului termo-mecanic al semifabricatului. În urma studiului bibliografic s-a ajuns la concluzia că modelul de comportament adecvat acestui proces este cel propus de Johnson-Cook.

9.2. Caracterizarea comportamentului termo-mecanic al aliajului AA6061-T6

Identificarea parametrilor din modelul de comportament termo-mecanic Johnson-Cook constă în realizarea mai multor încercări mecanice, în care se variază temperatura și viteza de solicitare. S-a ales să se realizeze încercări de tracțiune la 3 temperaturi diferite: 22°C, 200°C și 400°C și la 3 viteze de deplasare diferite: 0,35 mm/min, 0,7 mm/min şi 35 mm/min. În acest scop s-a utilizat metodologia prezentată în [I03].

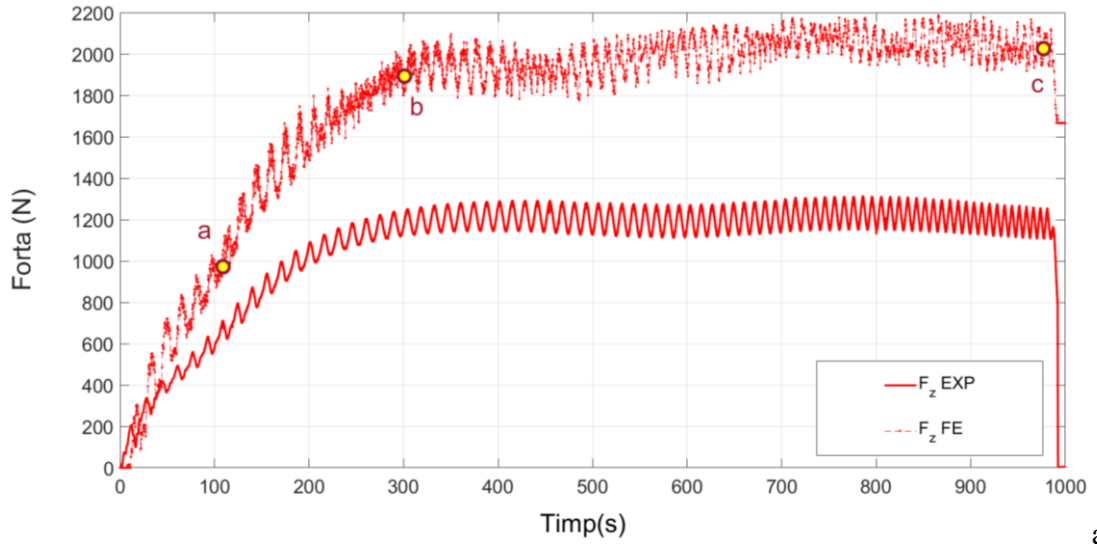
9.3. Simularea şi validarea modelelor numerice

După dezvoltarea celor două modele numerice s-a realizat simularea proceselor SPIF realizate cu cele două scule cu cap semisferic. Prin compararea forțelor de deformare, temperaturii din proces și grosimii pereților piesei obţinute din simulare cu cele determinate experimental, s-a realizat validarea

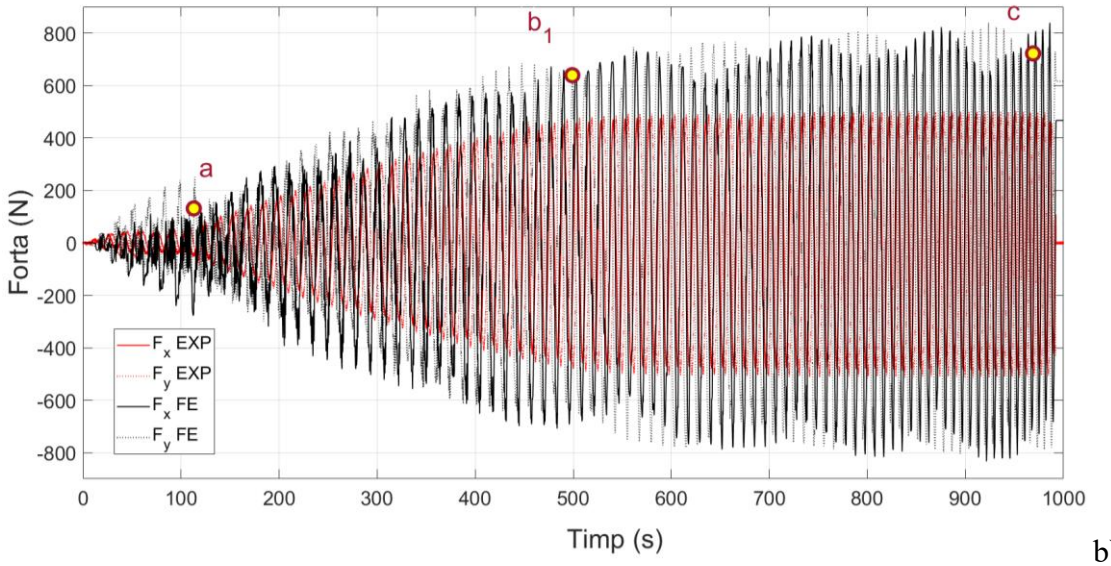
modelelor numerice. Odată cu această validare s-a realizat şi o analiză a procesului de deformare plastică incrementală, prezentată în cele ce urmează.

Analiza rezultatelor la prelucrarea cu scula SS10

Evoluţiile **forţelor de deformare determinate** prin simulare, respectiv, obţinute experimental se prezintă în Fig.9.14. Analiza acestora scoate în evidenţă aspectele ce urmează.



a)



b)

Fig.9.14. Evoluţiile forţelor de deformare (SS10): a) pe direcţia axei Z; b) pe direcţiile axelor X şi Y

Evoluţia **temperaturii din proces** determinată prin simulare, respectiv, obţinută experimental se prezintă în Fig. 9.15. Temperatura determinată experimental prin tehnica termografiei a fost determinată ca valoare medie a unei zone de 10 mm^2 în jurul punctului de maxim identificat în imaginile termografice. Temperatura obţinută prin simulare a fost extrasă ca valoare maximă din câmpul de valori nodale ale temperaturii.

Evoluţia **grosimilor pereţilor piesei** rezultate din simulare, respectiv, după scanarea piesei prelucrată cu scula SS10 sunt prezentate în Fig.9.16. Aceste grosimi sunt reprezentate pe două direcții perpendiculare ale piesei obiectiv. Se poate observa că evoluția acestora este similară, astfel că în zona flanșei și în centrul trunchiului de con, unde semifabricatul nu a fost deformat, valoarea grosimii este aproximativ de 1 mm, valoare ce corespunde cu grosimea semifabricatului inițial nedeformat. Pe zona pereților înclinați grosimea pereţilor piesei este mai mică (cauzată de subţierea lor), iar valorile obținute prin simulare sunt apropiate de cele determinate prin tehnica scanării.

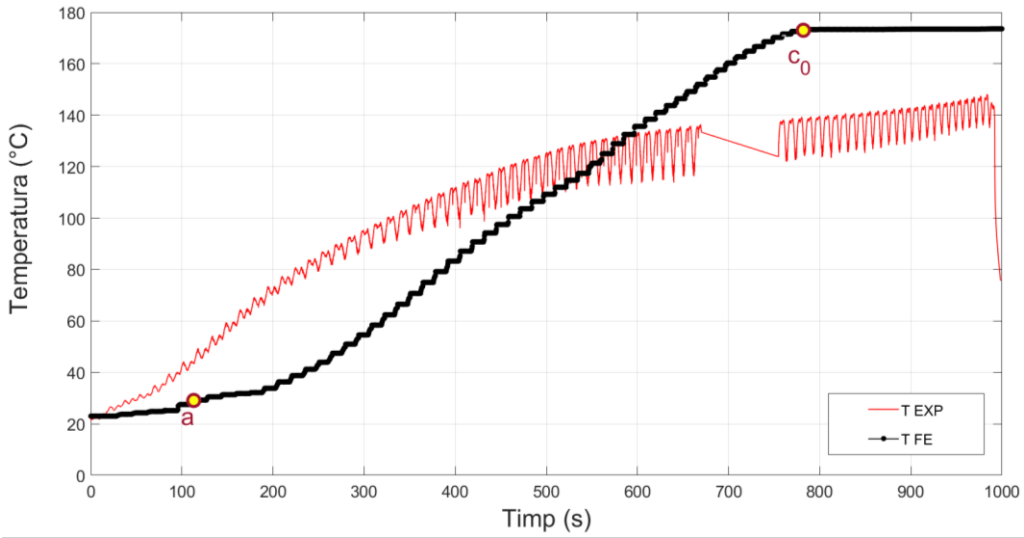


Fig.9.15. Evoluţia temperaturii din proces

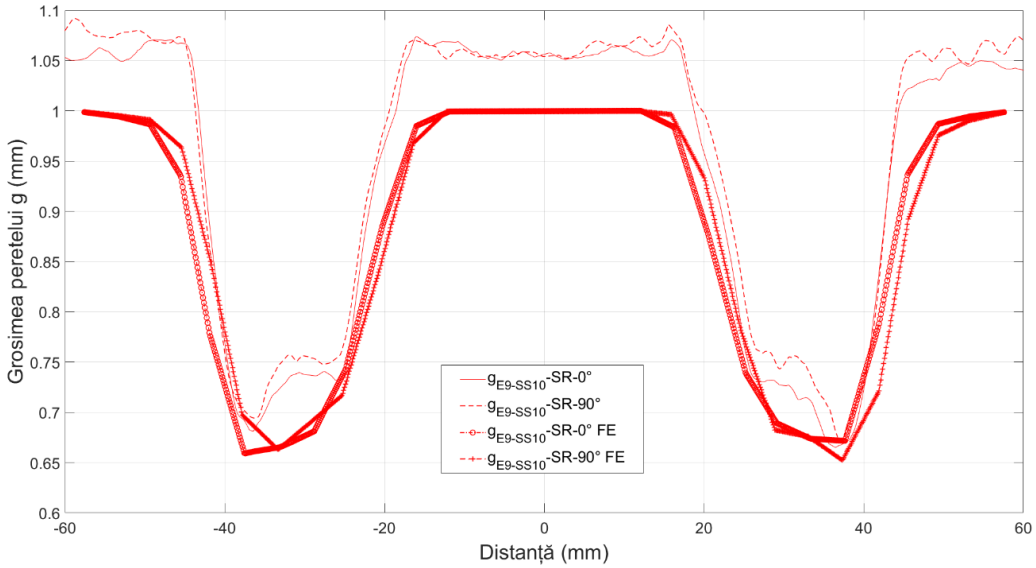


Fig.9.16. Comparația evoluției grosimii pereților piesei, obținute prin simulare și scanare – SS10

Analiza rezultatelor la prelucrarea cu scula SS5

Procesele care au loc sunt similare cu cele de la prelucrarea cu scula SS10, însă se pot observa variații mai mari ale forțelor obţinute din simulare. Această diferenţă seminificativă față de rezultatele obținute la simularea prelucrării cu scula SS10 se datorează faptului că scula SS5 are o suprafață de contact mult mai mică cu semifabricatul, iar elementele de discretizare utilizate pentru semifabricat au fost relativ mari în comparaţie cu aceasta (au fost utilizate aceleaşi elemente de discretizare ca la prelucrarea cu scula SS10).

Cele două temperaturi, din simulare, respectiv, experimentală, au fost determinate în aceleaşi moduri ca la prelucrarea cu scula SS10. Evoluţia temperaturii obţinută prin simulare are formă relativ asemănătoare cu cea a temperaturii determinată experimental, dar valoarea maximă obținută din simulare are o valoare foarte apropiată de cea obținută experimental.

La fel ca la prelucrarea cu scula SS10, se remarcă o evoluție similară a acestor grosimi: în zona flanșei și în centrul trunchiului de con, unde semifabricatul nu a fost deformat, valoarea grosimii este aproximativ de 1 mm (valoare ce corespunde cu grosimea semifabricatului inițial nedeformat); în zona pereților înclinați grosimea pereților piesei este mai mică (cauzată de subţierea lor), iar valorile obținute prin simulare sunt apropiate de cele determinate prin tehnica scanării.

Capitolul 10. Analiza comparativă a proceselor de deformare plastică incrementală cercetate

Pentru a evidenția avantajele şi dezavantajele utilizării celor trei scule la deformarea plastică incrementală a piesei obiectiv s-a realizat o analiză comparativă în raport cu rezultantele procesului studiat. Aceasta include și elemente publicate ale autorului [B03].

Forţa de prelucrare

Evoluția forțelor de prelucrare pe direcția Z, Fz, la deformarea plastică incrementală cu cele trei scule utilizate, respectiv: sculă cu cap semisferic de rază R=10mm – SS10, sculă cu cap semisferic de rază R=5mm – SS5 și scula excentrică cu rază variabilă – ETVR se prezintă în Fig.10.1.

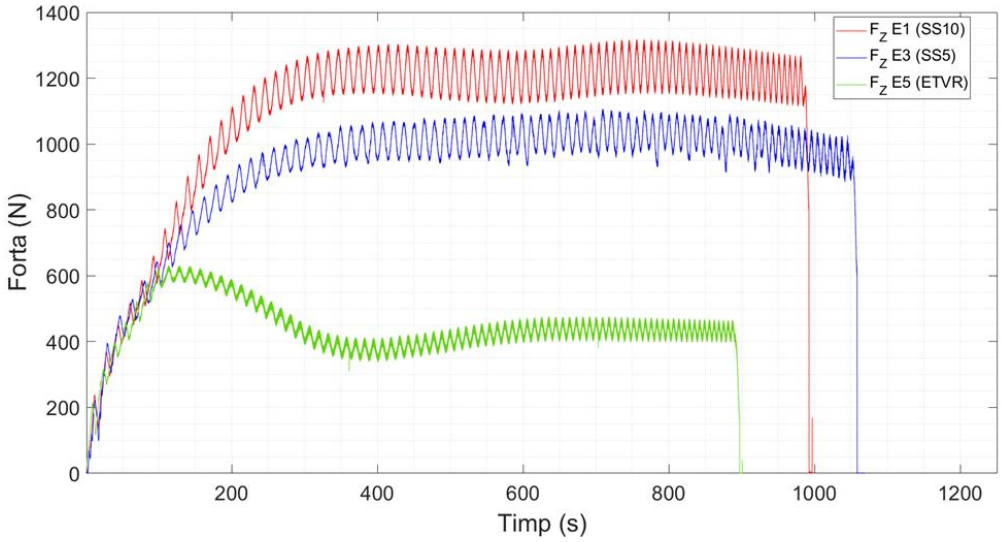


Fig.10.1. Evoluția forțelor de prelucrare pe direcția Z, la prelucrarea cu scule cu cap semisferic SS10 (E1), SS5 (E3) și scula excentrică cu rază variabilă – ETVR (E5)

Evoluţia forţelor de prelucrare Fz la utilizarea sculelor semisferice este asemănătoare, constând într-o creştere continuă a acestora la începutul procesului, urmată de o stabilizare la valoarea maximă. Această evoluţie a fost corelată cu evoluţia mărimii suprafeţei teoretice, respectiv, liniei teoretice de contact sculă semifabricat (vezi §6.3). La prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază mai mare rezultă forţe de prelucrare Fz mai mari decât la prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază mai mică: Fz = 1315 N la E1-SS10, în timp ce la E3-SS5 Fz = 1105 N.

Evoluţia forţei de prelucrare Fz la utilizarea sculei excentrice cu rază variabilă ETVR este diferită de cea de la prelucrarea cu scule semisferice: la începutul prelucrării are loc o creştere asemănătoare a forţei Fz – până la o valoare maximă, care este urmată de o scădere a acestei forţe şi de o stabilizare în a doua parte a procesului. Valoarea maximă a forţei Fz, de aproximativ 625 N (la E5), este mult mai mică decât valorile maxime ale lui Fz de la prelucrările cu scule cu cap semisferic. Valoarea forţei Fz în partea stabilă a procesului este de 460 N.

Temperatura de prelucrare

Evoluția temperaturilor din proces la deformarea plastică incrementală cu cele trei scule utilizate se prezintă în Fig.10.5. Evoluţia temperaturii din proces la utilizarea sculelor cu cap semisferic SS10 (E1) şi SS5 (E3) este destul de asemănătoare, constând într-o creştere continuă a acestora, urmată de o tendinţă de stabilizare spre sfârșitul procesului de deformare. Referitor la temperaturile maxime din proces, acestea se obțin cu sculele cu cap semisferic: 145,1°C la prelucrarea cu SS10 (E1), 148,3°C la prelucrarea cu SS5 (E3), 117,5 °C la prelucrarea cu ETVR (E5).

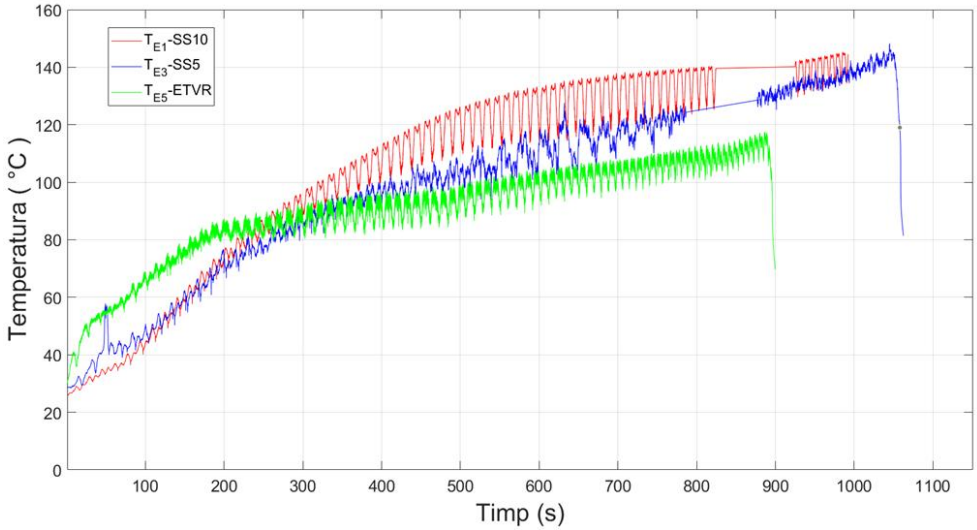


Fig.10.5. Evoluția temperaturilor din proces la prelucrarea cu sculele SS10 (E1), SS5 (E3) şi ETVR (E5)

Microaşchiile şi aspectul vizual al suprafeţelor prelucrate

- La prelucrarea cu scula SS5 (E3), rezultă cea mai mare cantitate de aşchii la finalul prelucrării. Aşchiile au cele mai mari dimensiuni, cu dimensiuni variabile (între 21 şi 83 μm) şi dimensiuni medii de aproximativ 45 μm.

- La prelucrarea cu scula SS10 (E1), cantitatea de aşchii prezente pe piesă la finalul procesului este mai mică decât la prelucrarea cu scula SS5, iar dimensiunea acestora este mult mai mică: între 7 şi 18 μm, cu dimensiuni medii de aproximativ 12 μm.

- La prelucrarea cu scula ETVR (E5), aşchiile preponderente sunt de mărime mică, cu dimensiuni cuprinse între 2 şi 51 μm şi dimensiuni medii de 8 μm.

Geometria pieselor prelucrate

Variația grosimii pereților pieselor prelucrate cu cele trei scule pe sistem rigid (E7, E9 şi E11) se prezintă în Fig.10.6. Forma acestor variaţii este asemănătoare, cu menţiunea că prelucrarea cu scula SS5 conduce la o subţiere relativ constantă pe zona înclinată a trunchiului de con în raport cu celelalte două scule care determină o grosime mai mică în apropierea valorii de 40 mm față de axa piesei.

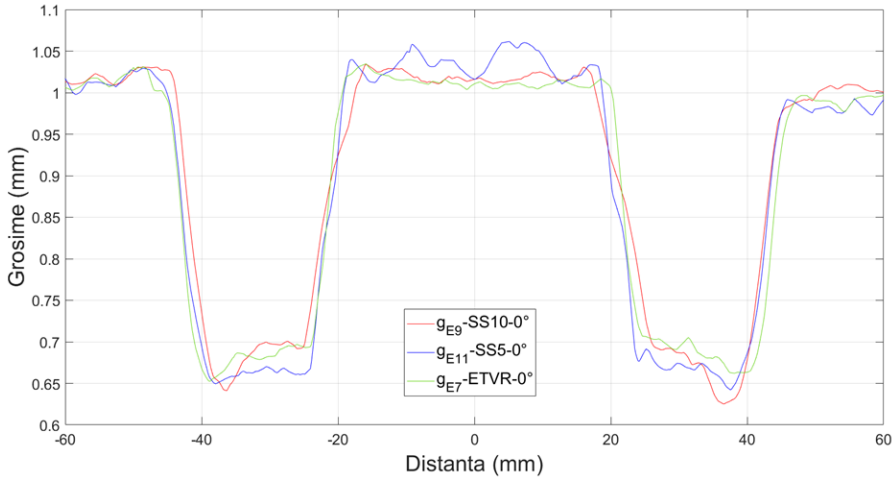


Fig.10.6. Variaţia grosimii pieselor prelucrate cu sculele SS10 (E7), SS5 (E9) şi ETVR (E11) pe sistem rigid

Variaţia abaterii de la forma dată a profilului pieselor prelucrate cu cele trei scule pe sistem rigid se prezintă în Fig.10.8. Evoluţiile şi mărimile acestor abateri sunt relativ asemănătoare, dar există şi unele diferenţe între piesele prelucrate, evidenţiate în continuare: efectul de pernă este mai accentuat la prelucrarea cu scula SS5 şi este aproape inexistent la prelucrarea cu scula SS10, cea mai mică

abatere de profil se obţine la prelucrarea cu scula SS5, iar cele mai mari la prelucrarea cu scula inovativă ETVR și cele mai mari abateri de profil se obţin la o distanţă de 40mm faţă de axa de simetrie a piesei.

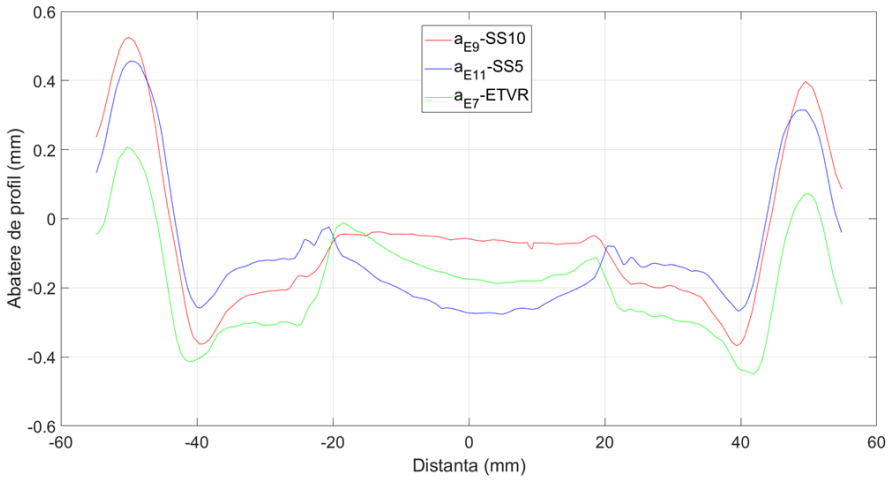


Fig.10.8. Variaţia abaterii de profil a pieselor prelucrate pe sistem rigid cu sculele – a) SS10 (E7), – b) SS5 (E9) şi – c) ETVR (E11)

Rugozitatea suprafețelor prelucrate

Rezultatele experimentale au arătat o creștere progresivă a rugozității Ra pe generatoarea trunchiului de con (de la bază către vârf) pentru toate piesele prelucrate cu cele trei scule, aşa cum rezultă şi din Fig.10.10.

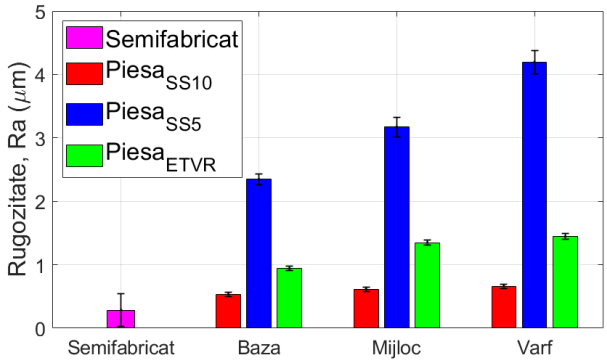


Fig.10.10. Valori medii ale parametrului de rugozitate Ra ale pieselor prelucrate cu cele trei scule

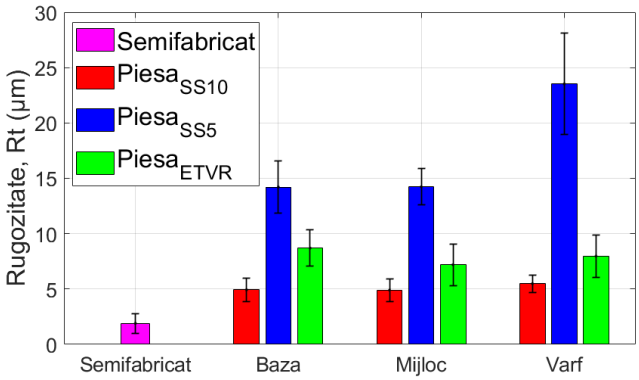


Fig.10.11. Valori medii ale parametrului de rugozitate Rt ale pieselor prelucrate cu cele trei scule

În ceea ce priveşte parametrul de rugozitate Rt, rezultatele diferă semnificativ între piesele prelucrate cu cele trei scule, aşa cum este evidenţiat şi în Fig.10.11: scula SS5 a condus la obţinerea celor mai ridicate valori ale parametrului de rugozitate Rt (peste 25 µm în zona vârfului), reflectând zgârieturi adânci și canale cauzate de contactul abraziv sculă-semifabricat și acumularea de micro-aşchii; scula SS10 a generat valori moderate ale parametrului Rt (~5–5.5 µm), cu evoluție oscilantă între zone: la

vârf se observă o ușoară creștere a lui Rt datorată acumulării de micro-așchii; scula inovativă ETVR, a condus la rezultate intermediare şi pentru parametrul Rt (Rt mediu între 7 şi 9 μm), cu tendință descrescătoare de la bază spre mijloc și ușoară revenire la vârf.

Microduritatea stratului superficial al suraţelor prelucrate

Rezultatele obţinute arată că ecruisarea este mai puternică la vârful conului, fiind datorată creşterii gradului de deformare locală spre finalul prelucrării, Fig.10.12.

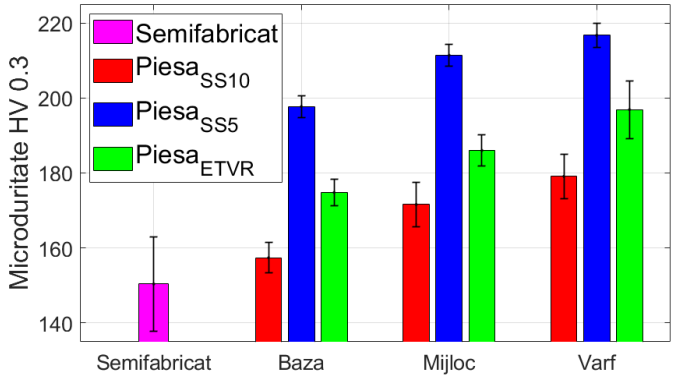


Fig.10.12. Valori medii ale microduritaţii HV0.3 ale pieselor prelucrate cu cele trei scule

Cele mai mari valori ale microdurității, deci şi ale ecruisării, s-au înregistrat în cazul utilizării sculei SS5, cu valori medii cuprinse între 197.7 HV la baza conului şi 216.7 HV la vârful acestuia, adică cu o variaţie de 19 HV în lungul generatoarei conului. Cele mai mici valori ale microdurității, deci şi ale ecruisării, s-au înregistrat în cazul utilizării sculei SS10, cu valori medii cuprinse între 157.4 HV la baza conului şi 179.1 HV la vârful acestuia, adică cu o variaţie de 21.7 HV în lungul generatoarei trunchiului de con.

Prelucrarea cu scula ETVR a condus la valori medii ale microdurităţii intermediare în raport cu cele rezultate la prelucrarea cu sculele SS10 şi SS5, respectiv, la valori medii de microduritate cuprinse între 174.8 şi 196.9 HV.

Influența anizotropiei materialului asupra rugozității și microdurității

Valorile medii ale parametrului de rugozitate **Ra** ale pieselor prelucrate SPIF arată o tendință generală de creștere a rugozității Ra în direcția TD față de RD, însă cu anumite excepții locale, în special în zona vârfului pieselor prelucrate cu scula SS5.

Pentru parametrul de rugozitate **Rt** al suprafeţelor prelucrate prin SPIF, diferențele între valorile medii măsurate pe cele două direcții sunt și mai evidente. Deoarece parametrul Rt este sensibil la valori extreme (zgârieturi, asperităţi), acesta a avut valori mai mari și mai variabile pe RD, datorită suprapunerii urmelor sculei cu textura laminată, și a înregistrat valori mai uniforme pe TD, unde scula a alunecat paralel cu traiectoria spiralată.

În cazul **microdurității HV**, valorile au fost, în general, mai mari pe RD față de TD. Aceasta reflectă o compactare a grăunţilor aliniaţi cu direcția sculei, orientarea favorabilă a deformării plastice pentru ecruisarea locală şi reducerea microfisurilor intergranulare.

Analiza corelată rugozitate - microduritate

Din analiza acestor corelaţii rezultă unele concluzii relevante pentru cercetarea întreprinsă: prelucrarea SPIF cu scula SS10 conduce la obținerea unor suprafețe fine și uniforme, dar produce o ecruisare moderată a materialului; prelucrarea SPIF cu scula SS5 conduce la obţinerea unor suprafețe rugoase, cu posibile defecte extreme, dar cu ecruisare intensă a materialului; prelucrarea SPIF cu scula ETVR conduce la obţinerea unor suprafețe ce prezintă un compromis între calitatea suprafeței și ecruisarea materialului.

Capitolul 11. Concluzii finale şi contribuții principale la cercetarea teoretico-experimentală şi modelarea numerică a procesului de deformare plastică incrementală

(1) Din analiza critică a stadiului actual al cercetării-dezvoltării și al aplicațiilor industriale privind deformarea plastică incrementală, s-au desprins concluzii importante, prezentate în capitolul 3.

(2) Având în vedere datele și concluziile din analiza stadiului actual privind procesele şi sistemele de deformare plastică incrementală, s-au considerat a fi de perspectivă direcţiile de cercetare-dezvoltare prezentate în §4.1.

(3) În raport cu stadiul actual şi direcţiile de cercetare-dezvoltare privind procesele şi sistemele de deformare plastică incrementală, s-a determinat ca obiectiv principal al activităţii de cercetare-dezvoltare în cadrul doctoratului (v. şi §4.2): *dezvoltarea procesului și sistemului de deformare plastică incrementală într-un singur punct a pieselor din aliaj de aluminiu AA6061-T6, prin cercetare teoretico-experimentală și simulare numerică*.

(4) Concluziile relevante privind activitatea de cercetare și dezvoltare de doctorat pentru atingerea obiectivului său principal, în raport și cu elementele de referință metodologice (v. §4.3), sunt după cum urmează.

• Dispozitivul modular de orientare și fixare a semifabricatului la prelucrarea prin deformare plastică incrementală într-un singur punct, dezvoltat în cadrul cercetărilor doctorale (v. §5.2.2), are o construcţie rigidă şi flexibilă care a permis prelucrarea pieselor în condiţii corespunzătoare, precum şi măsurarea simultană sau separată în timpul prelucrării a forţei de prelucrare şi a temperaturii din proces (v. §6.1).

• Scula inovativă, denumită ”Eccentric Tool with Variable Radius – ETVR”, proiectată și realizată pe parcursul studiilor doctorale (v. §5.2.2), are o suprafaţă de contact variabilă cu semifabricatul pe parcursul procesului de deformare plastică incrementală, dependentă de mărimile minimă şi maximă ale razei variabile a zonei active, de poziția unghiulară a sculei și de poziția sculei pe traiectoria de generare (v. §6.1).

• Evoluţia forţei de deformare pe direcţia axei Z la prelucrarea cu sculele cu cap semisferic este asemănătoare, fiind caracterizată de o zonă de creştere continuă până când materialul începe să curgă plastic şi o zonă de stabilitate, după acest moment. Există o strânsă corelare între evoluţia forţelor de deformare pe direcţia axei Z şi mărimea suprafeţei teoretice de contact/lungimea liniei teoretice de contact sculă – semifabricat (v. §6.3).

• La prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază mai mare – SS10 rezultă forţe de prelucrare Fz mai mari decât la prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază mai mică – SS5: Fz = 1315 N, respectiv, Fz = 1105 N. Valoarea maximă a forţei Fz la prelucrarea cu scula inovativă – ETVR este cea mai mică, de aproximativ 625 N, iar în partea stabilă a procesului este de 460 N (v. cap.10).

• Forţele de deformare în planul orizontal (direcţiile axelor X şi Y) sunt simetrice şi sunt determinate de redistribuirea laterală (în planul orizontal) a materialului în timpul deformării şi frecării dintre

sculă şi material. Valoarea maximă a acestora este mai mică decât valoarea maximă a forţelor de deformare pe direcţia axei Z (v. §6.3).

• Evoluţia forţelor de deformare în plan orizontal este caracterizată de o creștere inițială, asociată zonei de deformare elastică, urmată de o evoluție relativ constantă, asociată curgerii plastice. Stabilizarea acestei evoluţii este corelată cu stabilizarea mărimii suprafeţei teoretice de contact/lungimii liniei teoretice de contact sculă – semifabricat (v. §6.3).

• La prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază mai mare – SS10 rezultă forţe de prelucrare Fx şi Fy mai mari decât la prelucrarea cu scula cu cap semisferic cu rază mai mică – SS5: Fx = Fy = 487 N, respectiv, Fx = Fy = 397 N. Valoarea maximă a forţei Fx la prelucrarea cu scula inovativă – ETVR este cea mai mică, de aproximativ 111 N (v. cap.10).

• Temperatura măsurată în procesul de prelucrare prin deformare plastică incementală crește continuu, ca urmare a frecării dintre sculă și semifabricat, mai intens la începutul procesului şi mai lent ulterior, fiind corelată cu variaţia suprafeţei de contact sculă-semifabricat. Valorile maxime de temperatură atinse la finalul proceselor sunt: 145,1°C la prelucrarea cu scula SS10, 148,3°C la prelucrarea cu scula SS5, respectiv, 117,5°C la prelucrarea cu scula inovativă. Valoarea maximă a temperaturii la utilizarea sculei ETVR este cea mai mică, datorită contactului intermitent dintre sculă și semifabricat (v. §6.4 şi cap.10).

• Validarea metodologiei de determinare a parametrilor de precizie geometrică a piesei s-a realizat, mai întâi, prin calculul grosimii peretelui pentru o piesă etalon, generată numeric, cu o geometrie 3D ideală. Analiza statistică a rezultatelor obţinute au relevat o abatere de sub 0,01 mm a valorilor calculate în raport cu cele ideale (v. §7.2.2). Metodologia dezvoltată a fost validată şi prin măsurarea cu micrometrul a grosimii pereţilor pieselor prelucrate. Diferenţele minime absolute între cele două metode de măsurare sunt sub 0.01 mm la baza trunchiului de con, iar diferenţa maximă de aproximativ 0.02 mm (v. §8.3).

• La prelucrarea pieselor prin deformare plastică incrementală cu cele trei scule se formează microaşchii foarte fine, care sunt detaşate din semifabricatul prelucrat ca urmare a frecării dintre sculă şi semifabricat (v. §8.2). Dimensiunile microaşchiilor sunt cuprinse între 7 şi 18 μm la prelucrarea cu scula SS10, între 21 şi 83 μm la prelucrarea cu scula SS5 şi între 2 şi 51 μm la prelucrarea cu scula inovativă ETVR, iar valorile medii ale acestora sunt: 12 μm, 45 μm, respectiv, 8 μm (v. §8.2 şi cap.10).

• Valorile grosimilor minime ale pereţilor pieselor prelucrate cu cele trei scule sunt foarte apropiate: g = 0,67 la prelucrarea cu scula SS10, respectiv, g = 0,68 la prelucrarea cu scula SS5 şi la cea cu scula ETVR (v. §8.3). Piesele prelucrate cu sculele SS5 şi ETVR au o grosime mai uniformă a pereţilor pe toată zona conică (v. cap.10).

• Abaterea de la forma dată a profilului pieselor prelucrate cu cele trei scule au variații asemănătoare: valorile minime sunt în zona inelului de reţinere (baza trunchiului de con) şi a vârfului trunchiului de con, acolo unde şi deformarea materialului este minimă, iar valorile maxime sunt în zona conică a piesei, la un diametru ∅40. Cele mai mari abateri de la forma dată a profilului piesei rezultă la prelucrarea cu scula inovativă – ETVR, de 0,45 mm, urmate de cele de la prelucrarea cu scula SS10, 0,37 mm şi de cele de la prelucrarea cu scula SS5, de 0,26 mm (v. §8.3 şi cap.10).

• Rugozitatea Ra crește progresiv pe generatoarea trunchiului de con, de la bază către vârf, la toate piesele prelucrate cu cele trei scule. Intensitatea acestei creșteri depinde de geometria sculei: Ra =

0,532 – 0,66 μm la prelucrarea cu SS10, Ra = 0,939 – 1,444 μm la prelucrarea cu ETVR şi Ra = 2,346 – 4,194 μm la prelucrarea cu SS5 (v. §8.4 şi cap.10).

• Rugozitatea Rt a pieselor scoate în evidenţă zgârieturile adânci şi asperităţile de pe suprafeţele prelucrate, care sunt corelate cu mărimile microaşchiilor generate de scule. Astfel, cele mai mari valori ale lui Rt au rezultat la prelucrarea cu scula SS5 - Rt peste 25 μm în zona vârfului, apoi la prelucrarea cu scula ETVR - Rt mediu între 7 şi 9 μm, iar cele mai mici valori au rezultat la prelucrarea cu scula SS10 - Rt ~5–5.5 μm (v. §8.4 şi cap.10).

• Cele mai mari valori ale microdurității, deci şi ale ecruisării, au rezultat la utilizarea sculei SS5 – HV = 197.7 HV - 216.7, iar cele mai mici valori ale microdurității au rezultat la utilizarea sculei SS10 – HV = 157.4 HV - 179.1 HV. Prelucrarea cu scula ETVR a condus la valori medii ale microdurităţii intermediare în raport cu cele rezultate la prelucrarea cu sculele SS10 şi SS5, respectiv, la valori medii de microduritate cuprinse între 174.8 şi 196.9 HV (v. §8.5 şi cap.10).

• Evoluţiile forţelor obţinute prin simulare au forme foarte asemănătoare cu cele ale forţelor determinate experimental, dar valorile maxime obţinute prin simulare sunt mai mari decât cele determinate experimental. Cauzele acestor diferenţe sunt determinate de utilizarea stategiei de diminuare a timpului de simulare de tip mass scaling, descrierea comportamentului termo-mecanic cu legea Johnson-Cook nu a permis o modelare fidelă pentru toate temperaturile, utilizarea unei valori constante pentru coeficientul de frecare, anizotropia materialului (vezi §9.3).

• Evoluţiile temperaturilor obţinute prin simulare au forme relativ asemănătoare cu cele ale temperaturilor determinate experimental, dar valorile maxime obţinute prin simulare sunt mai mari decât cele determinate experimental. Cauzele acestor diferenţe sunt determinate de abordarea de tip adiabatic folosită în acest model care nu permite integrarea fenomenului de conducţie termică; utilizarea în experimente a lubrifierii cu ulei ce conduce la o distribuţie a temperaturii diferită de situaţia fără lubrifiere, folosită în simulare; utilizarea unui coeficient de frecare constant și a unei fracții fixe de conversie a lucrului mecanic în căldură (vezi §9.3).

• Evoluţiile grosimii pereţilor pieselor obţinute prin simulare au forme similare cu cele determinate experimental. În zona pereților înclinați ai piesei valorile obținute prin simulare sunt apropiate de cele determinate prin tehnica scanării. Valorile din zonele nedeformate, determinate prin scanare sunt mai mari decât cele din simulare, lucru care se datorează faptului că pe suprafața piesei a fost aplicată pulberea antireflexie, iar grosimea acesteia influențează grosimea piesei finale (vezi §9.3).

• Măsurarea parametrilor de rugozitate Ra şi Rt, respectiv a microdurităţii HV pe direcţia de laminare RD, respectiv, pe direcţia transversală a semifabricatului şi a pieselor prelucrate a scos în evidenţă existenţa unei anizotropii a acestora. De aceea, se apreciază că orientarea semifabricatului în raport cu forma piesei de realizat nu este un detaliu minor, ci un parametru experimental important, care trebuie analizat, controlat și integrat în strategiile de prelucrare (v. cap.10).

• S-a evidenţiat o tendință de creștere a rugozității medii Ra odată cu creșterea microdurității HV, care este destul de liniară. Asperitățile mai pronunțate ale suprafeţei prelucrate (Ra ridicat) reflectă o deformare mai severă a materialului din stratul superficial al piesei, asociată deformării grăunților și creșterii microdurității (v. cap.10).

• Parametrul de rugozitate Rt prezintă tendinţa de creştere odată cu creșterea microdurității HV, dar liniaritatea acestei dependențe nu mai este valabilă pentru piesele prelucrate cu scula SS5. Acest lucru este explicat prin faptul că la prelucrarea cu scula SS5 apar zgârieturile adânci, care nu conduc neapărat la ecruisare, prin urmare creşterea HV nu este proporţională cu creşterea Rt (v. cap.10).

(5) Prin îndeplinirea obiectivului principal al activităților doctorale de cercetare-dezvoltare, teza de doctorat aduce o serie de contribuții, dintre care cele mai relevante sunt evidențiate în continuare.

• Realizarea unui studiu critic privind stadiul actual al cercetării-dezvoltării și al aplicațiilor industriale cu privire la procesele și sistemele de deformare plastică incrementală.

• Dezvoltarea unui dispozitiv modular de orientare și fixare a semifabricatului pentru prelucrarea prin deformare plastică incrementală într-un singur punct, care permite prelucrarea pieselor de diferite dimensiuni, precum şi măsurarea simultană sau separată în timpul prelucrării a forţei de prelucrare şi a temperaturii din proces.

• Dezvoltarea unei scule inovative, denumită ”Eccentric Tool with Variable Radius – ETVR”, care realizează o suprafaţă de contact variabilă cu semifabricatul pe parcursul procesului de deformare plastică incrementală şi îmbină avantajele sculelor cu cap semisferic de mici dimensiuni cu cele de mari dimensiuni, dar şi cu a sculelor cu cap plat.

• Dezvoltarea unei metodologii experimentale de determinare a preciziei geometrice a pieselor prelucrate, prin utilizarea scanării tridimensionale şi prelucrarea datelor în Matlab.

• Stabilirea prin cercetare teoretico-experimentală a influenţei geometriei zonei active a trei scule, două scule cu cap semisferic de raze diferite şi scula inovativă ETVR, asupra parametrilor de proces forţă de prelucrare şi temperatură de prelucrare şi asupra calităţii pieselor prelucrate, apreciată prin abaterea de la forma dată a profilului piesei, grosimea pereţilor piesei, aspectul vizual şi parametrii de rugozitate Ra şi Rt ai suprafeţelor, microduritatea HV a stratului superficial al piesei.

• Dezvoltarea unui model numeric valid, utilizând programul ABAQUS Explicit, pentru simularea procesului de deformare plastică incrementală cu scule cu cap semisferic. Simulările realizate au permis analiza aprofundată a proceselor de deformare plastică incrementală realizate cu cele două scule cu cap semisferic.

• Realizarea unor analize comparative a proceselor de deformare plastică incrementală cu cele trei scule, pe baza parametrilor de proces şi indicatorilor de calitate a pieselor evaluaţi.

* * *

Prin problematică, modul de abordare și rezultate, teza de doctorat dezvoltă cunoașterea proceselor și sistemelor de deformare plastică incrementală.

Importanţa ştiinţifică a acestei teze de doctorat este dată de contribuţiile aduse la cercetările teoretico-experimentale privind procesele şi sistemele de deformare plastică incrementală într-un singur punct.

Importanţa practică a prezentei teze de doctorat constă în aceea că metodologia de cercetare – dezvoltare, modelele și mijloacele de lucru specifice proceselor și sistemelor de deformare plastică incrementală, cât și rezultatele cercetărilor realizate reprezintă un sistem - suport util studenţilor de la specializările tehnologice, cadrelor didactice şi cercetătorilor, specialiștilor și organizațiilor industriale, după caz.

Direcţii de cercetare viitoare în legătură cu tema de doctorat pot fi: considerarea şi a altor materiale, cu ductilităţi diferite, pentru testarea sculei inovative; studiul comparativ al deformabilităţii aliajului AA6061-T6 sau al altor materiale cu scula inovativă şi sculele cu cap semisferic; extinderea studiului comparativ prin variaţia parametrilor tehnologici ai procesului, pentru identificarea eventualelor sinergii între aceştia şi geometria părţii active a sculei; continuarea dezvoltării modelelor numerice, inclusiv pentru scula inovativă.

Lista lucrărilor publicate, rezultate în cadrul cercetărilor științifice din programul de studii universitare de doctorat

I. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN JURNALE INDEXATE ISI

1) *Innovative Tool for Improving Surface Quality in SPIF: A Comparison Between Hemispherical and Variable-Radius (ETVR) Tools*, **Emanuel Bădulescu,** Eduard Laurenţiu Nițu, Daniela Monica Iordache, Claudiu Bădulescu.

Jurnal: Materials – MDPI, 18, 4275, 2025. *https://doi.org/10.3390/ma18184275*; *WOS*: în curs de indexare.

Lucrare publicată în jurnal cotat în ISI Web of Science, Factor de Impact *3,2* - JCR - Q2 (Metallurgy and Metallurgical Engineering) / CiteScore - Q1 (Condensed Matter Physics)

2) *Research on the Numerical Modeling of the Incremental Plastic Deformation Process Using a Hemispherical Tool*, **Emanuel Bădulescu**, Daniela Monica Iordache, Eduard Laurenţiu Nițu, Claudiu Bădulescu.

Jurnal: Lucrare acceptată spre publicare în ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, vol. 68, Issue Special I, 2025; WOS: în curs de indexare. (Lucrare prezentată la International Conference on Integrated Engineering - CIE/C2I 2025, 5-6 may 2025, Timișoara).

3) *Robust Noncontact Scanner Measurement Strategy to Detect the Shape and the Thickness of Single Point Incremental Forming Parts*, **Emanuel Bădulescu,** Yannick Argouarc'h, Eduard Laurenţiu Nițu, Daniela Monica Iordache, Claudiu Bădulescu.

Jurnal: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, lucrare în curs de evaluare.

II. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN JURNALE INDEXATE BDI

1) *Tools for the incremental deformation of sheet metal using a single point: presentation of an innovative new tool*, **Emanuel Bădulescu,** Eduard Laurenţiu Nițu, Daniela Monica Iordache.

Jurnal: Materials Research Proceedings 46, 291-299, 2024. https://doi.org/10.21741/9781644903377-38 (Lucrare prezentată la International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy - IManE&E2024, 23-25 oct 202a, Athens)

III. PARTICIPĂRI LA CONFERINȚE INTERNAȚIONALE

1) International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy - IManE&E2024, 23-25.10.2024, Athens (participare on-line)*:*

Tools for the incremental deformation of sheet metal using a single point: presentation of an innovative new tool, **Emanuel Bădulescu,** Eduard Laurenţiu Nițu, Daniela Monica Iordache.

2) International Conference on Integrated Engineering - CIE/C2I 2025, 5-6 may 2025, Timișoara (participare on-line):

Research on the Numerical Modeling of the Incremental Plastic Deformation Process Using a Hemispherical Tool, **Emanuel Bădulescu**, Daniela Monica Iordache, Eduard Laurenţiu Nițu, Claudiu Bădulescu.

Bibliografie

[A01] Abass K. I., *A study to comparing spherical, ellipse and flat forming tool profile effect in single point incremental forming by finite element analysis*, U.P.B. Sci. Bull. Series D, 78, 2016.

[A04] Akhavan Farid A., Shen F.S., Rahimian Koloor S.S., Petrů M., *Quality Evaluation of Aluminum-AA6061 Truncated Cone Deformed by Single Point Incremental Forming*, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 44, 2022. doi:10.1007/s40430-022-03730-5.

[A09] Ambrogioa G., Ingarao G., Gagliardia F., Lorenzo R. D., *Analysis Of Energy Efficiency Of Different Setups Able To Perform Single Point Incremental Forming (SPIF) Processes*, Procedia CIRP, 15, 111 – 116, 2014. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.055.

[A10] Aminia K., Altenhof W., Chung Kim Yuen S., Opperman C.J., Nurick G.N., *Experimental and numerical investigation on the deformation and energy dissipation of AA6061-T6 circular extrusion subjected to blast loading*, International Journal of Impact Engineering, 110, 228-241, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.02.003.

[A12] Argouarc'h Y., Créac'hcadec R., *Registration method for the analysis of mooring chain links degraded by corrosion and wear*, Ocean Engineering, 250, 110877, 2022. http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110877.

[B01] **Badulescu E.,** Argouarc'h Y., Nitu E. L., Iordache M. D., Badulescu C., *Robust Noncontact Scanner Measurement Strategy to Detect the Shape and the Thickness of Single Point Incremental Forming Parts*, articol în evaluare la revista The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

[B02] **Bădulescu E.,** Iordache D. M., Nițu E. L., Bădulescu C., *Research on the Numerical Modeling of the Incremental Plastic Deformation Process Using a Hemispherical Tool*, lucrare susţinută la International Conference on Integrated Engineering - CIE/C2I 2025 , Timisoara, Romania, May 5-6, 2025, acceptată spre publicare în ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Vol. 68, Issue Special I, Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, AND ENGINEERING

[B03] **Bădulescu E.,** Nițu E. L., Iordache D. M., Bădulescu C., *Innovative Tool for Improving Surface Quality in Single Point Incremental Forming: A Comparison with Hemispherical Tools*, Materials 2025, 18, 4275. https://doi.org/10.3390/ma18184275

[B04] **Bădulescu E.,** Nițu E. L., Iordache M. D., *Tools for the incremental deformation of sheet metal using a single point: presentation of an innovative new tool*, lucrare susţinută la International Conference of Manufacturing Engineering & Energy - IManEE 2024 (Athens, Greece), publicată în Materials Research Proceedings 46, 291-299, 2024. https://doi.org/10.21741/9781644903377-38.

[B05] Bagudanch I., Garcia-Romeu M.L., Ferrer I., Ciurana, J., *Customized cranial implant manufactured by Incremental Sheet Forming using a biocompatible polymer*, Rapid Prototyping Journal, 24, 120-129, 2018. [http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-06-2016-0089.

[B07] Barnwal V. K., Chakrabarty S., Tewari A., Narasimhan K., Mishra S., *Influence of Single-Point Incremental Force Process Parameters on Forming Characteristics and Microstructure Evolution of AA-6061 Alloy Sheet*, Journal of Materials Engineering and Performance, 28, 7141–7154, 2019. http://dx.doi.org/10.1007/s11665-019-04446-9

[B08] Bârsan A., Racz S.G., Breaz R., Crenganis M., *Evaluation of the Dimensional Accuracy through 3D Optical Scanning in Incremental Sheet Forming*, Mater. Today: Proc., 93, 594–598, 2023. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.175.

[B11] Benitez A., Bustamante-Correa F. A., Benitez-lozano A. J., *Statistical Analysis of the Main Incremental Forming Process Parameters that Contribute to Change the Roughness in an Experimental Geometry*, Ingenieria e Industria, 1-10, 2016.

[B12] "Bhattacharya A., Maneesh K., Maneesh K., Venkata Reddy N., Cao, J., *Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming*, Conference: ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2011. doi: 10.1115/MSEC2011-50284.

[B14] Blaga A., *Contribuţii la deformarea incrementală a tablelor metalice subţiri*, Teză de doctorat, Universitatea „Lucian Blaga" din Sibiu, 2011.

[C01] Çalişkan H., Kurbanoğlu C., Panjan P. Kramar D., *Investigation of the performance of carbide cutting tools with hard coatings in hard milling based on the response surface methodology*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 66, 883–893, 2013. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4374-y.

[C03] Catalog GILINOX, (accesat 01.09.2023), Disponibil la: http://www.gilinox.ro/catalogue/product/20916

[C06] Chang Z., Peng W., Long H., T*owards understanding the surface friction in rotational-vibration assisted incremental sheet forming*, Journal of Materials Processing Technology, 336, 118692, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118692.

[C09] Choudhary S., Mulay A., *Influence of Tool Size and Step Depth on the Formability Behavior of AA1050, AA6061-T6, and AA7075-T6 by Single-Point Incremental Forming Process*, Journal of Materials Engineering and Performance, 33, 3283–3298, 2024. http://dx.doi.org/10.1007/s11665-023-08231-7.

[D05] DMG MORI. ecoMill 70 DMG MORI, (accesat 15.05. 2025). Disponibil la: http://www.miracnc.cz/en/strojni-vybaveni/ecomill-70-dmg-m.

[E02] Elayiaraja P., Harish S., Wilson L., Bensely A., lal D. M., *Experimental Investigation on Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Copper Metal Foam Heat Sink*, Experimental Heat Transfer, 23, 185-195, 2010. http://dx.doi.org/10.1080/08916150903399722.

[G03] Gatea S., Xu D., Ou H., McCartney G., *Evaluation of formability and fracture of pure titanium in incremental sheet forming*, Int J Adv Manuf Technol, 95:625–641, 2018. DOI://doi.org/10.1007/s00170-017-1195-z.

[G07] Gupta P., Szekeres A., Jeswiet J., *Design and development of an aerospace component with single-point incremental forming*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 103, 3683–3702, 2019. doi:10.1007/s00170-019-03622-4.

[H07] Hosford F. W., Caddell R. B., *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 2007.

[I01] Innovatest. FALCON 500 (accesat 29.05.2025), Disponibil la: http://www.innovatest-europe.com/products/falcon-500/.

[I03] Iordache D. M., Oprescu E. R., Malea C. I., Niţu E. L., Crăcănel M. O., Bădulescu C., *Determination of Johnson-Cook material constants for Copper using traction tests and inverse identification*, IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering, 1182, 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1182/1/012032.

[I04] ISO 21920-2 — Surface texture: Profile — Part 2: *Terms, definitions and surface texture parameters*.

[J05] Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J., *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*, CIRP Annals Volume 54, Issue 2, Pages 88-114, 2005. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3.

[J07] Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., Allwood, J., *Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*, CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 54, p. 88–114, 2005. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60021-3.

[K04] Kumar A., *Critical state-of-the-art literature review of surface roughness in incremental sheet forming: A comparative analysis*, Appl. Surf. Sci. Adv., 23, 2024. doi:10.1016/j.apsadv.2024.100625.

[K06] Kumar A., Gulati V., Kumar P., Singh V., Kumar B., Singh H., *Parametric effects on formability of AA2024-Oaluminum alloy sheets in single point incremental forming*, Journal of Materials Research and Technology, 8, 1461-1469, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.11.001.

[L01] Leszak E., Apparatus and process for incremental dieless forming,, U.S. Patent 3,342,051, Sept. 19, 1967. (accesat 29.05.2021), Disponibil la:https://patents.google.com/patent/US3342051A/en.

[L05] Liu Z., Li Y., Meehan P. M., *Experimental Investigation of Mechanical Properties, Formability and Force Measurement for AA7075-O Aluminum Alloy Sheets Formed by Incremental Forming*, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 14, pages 1891–1899, 2013. doi:10.1007/s12541-013-0255-z.

[L06] Long H., Peng W.X., Chang Z.D., Zhu H., Jiang Y.J., Li Z.H., *New rosette tools for developing rotational vibration-assisted incremental*, Journal of Materials Processing Tech., 326, 118311, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118311.

[M02] Marciniak Z., Duncan J. L., Hu S. J., *Mechanics of Sheet Metal Forming*, 2002, ISBN 0 7506 5300 0.

[M06] ME-Meßsysteme GmbH. K3D160, (accesat 26.05. 2025), mai Disponibil la: http://www.me-systeme.de/shop/en/sensors/force-sensors/k3d/k3d160/k3d160-2kn6.

[M07] Micari F., Ambrogio G., Filice L., *Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends*, Journal of Materials Processing Technology, 191, 390–395. 2007. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.066.

[M10] Mitutoyo. SJ-210 – Portable Surface Roughness Tester. 2022 (29.05.2025), Disponibil la: http://www.mitutoyo.com/products/form-measurement-machine/surface-roughness/sj-210-portable-surface-roughness-tester-2/.

[M14] Mulay A., Ben B.S., Ismail S., Kocanda A., *Experimental investigation and modeling of single point incremental forming for AA5052-H32 aluminum alloy*, Arab. J. Sci. Eng, 42, 4929–4940, 2017. http://dx.doi.org/10.1007/s13369-017-2746-1.

[N01] Nasulea M. D, Oancea G., *Incremental deformationa: A literature review*, MATEC Web of Conferences, 121, 03017, 2017. http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/201712103017.

[N06] Nimbalkar D. H., Nandedkar V. M., *Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components*, International Journal of Engineering Research and Applications, 3, 39-51, 2013.

[N06] Nimbalkar D.H., Nandedkar V.M., *Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components*, International Journal of Engineering Research and Applications, 3, 39–51, 2013.

[N07] Nirala H. K., Agrawal A., *Adaptive increment based uniform sheet stretching in Incremental Sheet Forming (ISF) for curvilinear profiles*, Journal of Materials Processing Technology, 306, 117610, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117610.

[O02] Optris. Infrared camera optris PI 400i / PI 450i. 2022 (26.07.2025), Disponibil la: https://optris.com/products/infrared-cameras/precision-line/pi-400i/.

[O03] Ozturk F., Sisman A., Toros S., Kilic S., Picu R.C., *Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy*, Materials & Design Volume 31, Issue 2, Pages 972-975, 2010. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.017.

[P01] Pandivelan C., Jeevanantham A.K., *Formability Evaluation of AA 6061 Alloy Sheets on Single Point Incremental Forming using CNC Vertical Milling Machine*, J. Mater. Environ. Sci. 6 (5) 1343-1353, 2015.

[S04] Sharma M., Bhattacharya A., Paul S.K. , Failure Behavior in Single Point Incremental Forming Parts of AA6061-T6, Eng. Fail. Anal., 177, 2025. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109682.

[S13] Starman B., Cafuta G., Mole N., *A method for simultaneous optimization of blank shape and forming tool geometry in sheet metal forming simulations*, Metals, 11, 544, 2021. http://dx.doi.org/10.3390/met11040544.

[S14] Sy L. V., *Modeling of single point incremental forming process for metal and polymeric sheet*, PhD thesis, University Of Padova, Italy, 2009. (accesat 26.07.2023), Disponibil la: https://www.researchgate.net/publication/340115690_MODELING_OF_SINGLE_POINT_INCREMENTAL_FORMING_PROCESS_FOR_METAL_AND_POLYMERIC_SHEET.

[T07] Trzepieciński, T.; Krasowski, B.; Kubit, A.; Wydrzyński, D., *Possibilities of application of incremental sheet-forming technique in aircraft industry*, Zesz. Nauk. Politech. Rzeszow. Mech., 87–100, 2018. http://dx.doi.org/10.7862/rm.2018.08.

[U01] Ullah S., Li X., Li D., *Fast simulation of incremental sheet metal forming by multi-tooling*, Journal of Manufacturing Processes, 84, 669–680, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.025.

[W02] Wang T, Zou Y, Matsuda K., *Microstructure and microtextural studies of friction stir welded AA6061-T6 subjected to different rotational speeds*, Materials & Design, 90, 13-21, 2016. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.100.

[Z02] Zhang M.H., Lu B., Chen J., Long H., Ou H., *Selective element fission approach for fast FEM simulation of incremental sheet forming based on dual-mesh system*., Int. J. Adv. Manuf. Technol., 78, 1147–1160, 2015. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6723-5.

[Z03] Zhao X., Ou H., *A new flexible multi-point incremental sheet forming process with multi-layer sheets*, Journal of Materials Processing Technology, 322, 118214, 2023 https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118214.

[Z05] Zhu H., Cheng G., Jung D., *Toolpath planning and generation for multi-stage incremental forming based on stretching angle*, Materials, 14(17), 4818, 2021. https://doi.org/10.3390/ma14174818.

Anexe

Anexa 1 Valorile efective ale grosimii pereților piesei, măsurate cu micrometrul/ scannerul.....181

Anexa 2 Valorile efective ale parametrilor de rugozitate Ra şi Rt.....182

Anexa 3 Valorile efective ale microdurităților HV.....185