

Constantin DRĂGHICI

TEZĂ DE DOCTORAT

**Contribuții la optimizarea unor caracteristici
constructive ale pieselor realizate prin
deformare plastică la rece**

**Contributions to the optimization of design
features of the products made by cold plastic
deformation**

**Conducător științific,
Prof.univ.emerit dr.ing. Florian DRĂGĂNESCU**

București, 2017

Cuprins

	(Rezumat: R, Teză: T)	R	T
<i>Cuvânt înainte</i>		3	5
Introducere		4	6
<i>Partea I. Stadiul actual al cercetărilor privind prelucrarea pieselor cu margini răsfrânte din table metalice</i>			
<i>Capitolul 1. Cercetări privind răsfrângerea marginilor conturului exterior al pieselor din table metalice prin deformare plastică la rece</i>			
		5	15
1.1. Forme, caracteristici constructive și tehnologicitatea acestor piese		5	15
1.1.1. Piese cu forme simple și piese cu forme complexe		5	15
1.1.2. Necesitatea răsfrângerii marginilor conturului exterior		5	15
1.1.3. Tehnologicitatea pieselor cu marginile conturului exterior răsfrânte		5	17
1.1.4. Defecte ale pieselor din tablă cu margini răsfrânte		6	21
1.2. Metode experimentale pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor și a Curbei Limită de Formare (CLF)		6	29
1.2.1. Noțiuni generale privind modul de evaluare grafică a formabilității pieselor simulate numeric		6	29
1.2.2. Teste experimentale utilizate pentru determinarea Curbei Limită de Formare		7	31
1.3. Procedee tehnologice de obținere a pieselor cu margini răsfrânte		7	34
<i>Capitolul 2. Cercetări privind simularea numerică și modelarea statistică a caracteristicilor procesului de răsfrângere a marginilor</i>			
		7	37
2.1. Simularea numerică a răsfrângerii marginilor conturului exterior		7	37
2.1.1. Simularea numerică a proceselor de deformare plastică la rece. Definiție, scop, avantaje față de cercetarea experimentală.....		7	37
2.1.2. Rolul simulării numerice în cadrul procesului de fabricare a produselor.....		8	40
2.1.3. Tipuri de defecte prezise și studiate cu ajutorul simulării numerice.....		9	42
2.1.4. Modelarea statistică a caracteristicilor de proces cu ajutorul metodei suprafețelor de răspuns		9	55
2.2. Modelarea caracteristicilor procesului de răsfrângere a marginilor cu ajutorul datelor obținute din simularea numerică		9	55
2.2.1. Modelarea matematică cu ajutorul metodei suprafețelor de răspuns		9	55
<i>Capitolul 3. Concluzii referitoare la stadiul actual al cercetărilor privind obținerea pieselor cu margini răsfrânte din table metalice</i>			
		10	67
<i>Partea a II - a. Contribuții la cercetarea răsfrângerii marginilor conturului exterior al pieselor prelucrate prin deformare plastică la rece</i>			
<i>Capitolul 4. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare privind optimizarea constructiv - tehnologică a caracteristicilor pieselor cu margini exterioare răsfrânte</i>			
		10	71
4.1. Direcțiile de cercetare-dezvoltare		10	71
4.2. Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare		11	71
4.3. Metodologia de cercetare-dezvoltare		11	71
4.3.1. Simularea numerică a răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor obținute din table metalice prin deformare plastică la rece		11	72
4.3.2. Modelarea statistică a rezultatelor simulării.....		11	72
4.3.3. Reprezentarea grafică a modelelor obținute și analiza influenței parametrilor asupra caracteristicilor răsfrângerii marginilor		11	72

UPB	Teză de doctorat	Contribuții la optimizarea unor caracteristici constructive ale pieselor realizate prin deformare plastică la rece	Constantin DRĂGHICI
<i>Capitolul 5. Cercetări privind răsfrângerea marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor din table metalice prin simulare numerică cu elemente finite</i>			
		12	73;125
5.1.	Definirea caracteristicilor constructive	12	74;125
5.2.	Tehnologia de răsfrângere a marginilor	13	75;127
5.3.	Parametrii procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex sau concav luați în studiu	13	77;128
5.3.1.	Domeniile de variație ale parametrilor geometrici	13	79;130
5.3.2.	Nivelurile de variație ale parametrilor geometrici	13	87;130
5.4.	Alegerea tipului de program de simulare, proiectarea lui și stabilirea numărului de simulări necesar modelării statistice	13	80;131
5.5.	Softul folosit pentru simularea numerică a procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex sau concav	14	80;132
5.6.	Datele inițiale necesare pentru simularea cu elemente finite a răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav	14	85;136
5.6.1.	Concepția modelului geometric numeric	14	85;136
5.6.2.	Concepția modelului numeric	15	86;136
5.6.3.	Condiții de lucru considerate	15	88;139
5.6.4.	Stabilirea răspunsurilor măsurate	16	89;140
5.7.	Simularea numerică a procesului de răsfrângere a marginilor pentru fiecare din punctele programelor de simulare	16	90;141
5.7.1.	Evaluarea calitativă a solicitărilor cu ajutorul Diagramei Limită de Formare	16	90;141
5.7.2.	Evaluarea grafică calitativă a gradului de deformare	17	91;142
5.7.3.	Evaluarea cantitativă a îngroșării și a subțierii materialului în timpul procesului de răsfrângere a marginilor conturului convex sau concav exterior al piesei.....	17	93;146
5.8.	Concluzii privind simularea numerică a răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav	18	103;154
<i>Capitolul 6. Cercetări privind răsfrângerea marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor din table metalice prin modelare statistică</i>			
		18	105;157
6.1.	Alegerea formei și a complexității modelelor	18	105;157
6.2.	Estimarea coeficienților modelelor	19	106;158
6.3.	Analiza statistică a modelelor obținute	19	107;159
6.3.1.	Verificarea adecvantei modelelor obținute	19	107;159
6.3.2.	Verificarea semnificației coeficienților	20	108;160
6.3.3.	Determinarea intervalelor de încredere 95% pentru coeficienții modelelor și pentru răspunsurile prezise de modele	20	110;162
<i>Capitolul 7. Cercetarea influenței parametrilor răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav asupra procesului de prelucrare</i>			
		20	113;165
7.1.	Reprezentarea grafică 2D și 3D a modelelor caracteristicilor procesului de răsfrângere	20	113;165
7.2.	Valori optime ale parametrilor răsfrângerii marginilor pieselor cu contur exterior convex sau concav	25	120;173
7.3.	Concluzii privind influența parametrilor răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav asupra caracteristicilor de proces.....	26	123;175
<i>Capitolul 8. Concluzii finale și contribuții principale la optimizarea proceselor de deformare plastică la rece cu ajutorul simulării numerice</i>			
		27	177
<i>Bibliografie</i>			
		29	179

Cuvânt înainte

Cercetarea-dezvoltarea estimării tehnologicității și soluționarea unor probleme de optimizare a pieselor cu suprafețe complexe din industria auto cu margini răsfrânte după un contur curbiliniu convex sau concav obținute prin deformare plastică la rece cu ajutorul simulării numerice reprezintă motivația și direcția studiilor de doctorat, finalizate prin prezenta teză de doctorat.

Programul de doctorat a constat în pregătirea, prezentarea și susținerea examenelor și a rapoartelor științifice, aprofundarea studiului, abordarea unor probleme privind dezvoltarea de modele matematice de reproducere a fenomenelor studiate, respectiv, tehnologicitatea pieselor, îngroșarea sau subțierea produse în timpul și la sfârșitul proceselor de deformare plastică la rece, realizarea și publicarea de lucrări științifice, precum și elaborarea prezentei teze de doctorat privind optimizarea unor caracteristici constructive ale pieselor realizate prin deformare plastică la rece.

La obținerea acestor rezultate am beneficiat de îndrumarea atentă și suportul conducătorului științific, precum și a profesorilor din comisia de îndrumare a activității de doctorat.

Adresez profunde mulțumiri domnului Prof.univ. emerit dr.ing. Florian DRĂGĂNESCU, pentru îndrumarea științifică și coordonarea întregii activități de parcurgere a programului de doctorat, deplina încredere, sprijinul și disponibilitatea totală acordate în această perioadă.

Adresez sincere mulțumiri domnilor Prof.univ.dr.ing. Marian GHEORGHE, Prof.univ. emerit dr.ing. Aurel STURZU, Prof.univ.dr.ing. Sergiu TONOIU și Conf.univ.dr.ing. Mihail PURCĂREA - de la Universitatea POLITEHNICA din București, pentru comentariile și recomandările constructive în cadrul comisiilor de evaluare a examenelor și referatelor de doctorat, precum și tuturor profesorilor care m-au îndrumat și format profesional în cadrul catedrei TCM.

Adresez sincere mulțumiri domnului Prof.univ.dr.ing. Constantin OCNĂRESCU, Directorul Departamentului de Teoria Mecanismelor și Roboților - de la Universitatea POLITEHNICA din București, pentru încurajări și susținere de-a lungul perioadei de pregătire a tezei de doctorat.

Exprim profunde mulțumiri d-lui Prof.univ.dr.ing. Marian GHEORGHE - de la Universitatea POLITEHNICA din București, d-lui Prof.univ.dr.ing. Octavian BOLOGA - de la Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, d-lui Prof.univ.dr.ing. Viorel PĂUNOIU - de la Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați și d-lui Conf.univ.dr.ing. Mihail PURCĂREA - de la Universitatea POLITEHNICA din București, pentru comentariile și recomandările adresate în cadrul Comisiei de evaluare și susținere publică a tezei de doctorat.

Sunt recunoscător familiei mele, pentru suportul moral și înțelegerea manifestate pe toată perioada studiilor de doctorat.

O serie de activități privind elaborarea prezentei teze de doctorat au beneficiat de sprijinul Programului Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane (POS DRU), finanțat de către Fondul Social European și Guvernul României, prin contractul nr. POSDRU/187/1.5/ S/155536

Constantin Drăghici

Introducere

Activitatea de cercetare-dezvoltare din cadrul pregătirii doctorale este parte integrantă a preocupărilor științifice ale autorului în domeniul deformării plastice la rece. Ea concentrează rezultate ale studiului întreprins asupra răsfrângerii marginilor exterioare de contur convex și contur concav ale pieselor de aspect cu impact vizual, din industria automobilelor.

* * *

Stadiul actual al cercetării-dezvoltării în raport cu tema de doctorat, tratează, în trei capitole , cercetări privind răsfrângerea marginilor conturului exterior al pieselor din table metalice prin deformare plastică la rece și cercetări privind simularea numerică și modelarea statistică a caracteristicilor procesului de răsfrângere a marginilor.

Pe baza concluziilor desprinse din analiza literaturii de specialitate, se formulează direcțiile și obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare în cadrul doctoratului: *cercetarea caracteristicilor de îngroșare și de subțiere a marginilor răsfrânte ale pieselor din table metalice obținute prin deformare plastică la rece folosind simularea cu elemente finite și modelarea statistică*

Se dezvoltă o metodologie generală de estimare a tehnologicității pieselor cu margini răsfrânte după un contur curbiliniu convex și concav. Se dezvoltă o metodologie generală de *adaptare a metodologiei suprafețelor de răspuns* pentru obținerea modelelor caracteristicilor răsfrângerii marginilor luate în studiu. Se dezvoltă o metodologie și se descoperă o relație funcțională pentru optimizarea caracteristicilor geometrice ale pieselor cu margini răsfrânte. Cu ajutorul relațiilor determinate pentru estimarea tehnologicității pieselor cu margini răsfrânte după un contur curbiliniu convex și concav și al unor restricții impuse, s-au determinat valori optime recomandate pentru diferite cazuri de lucru considerate.

În ultima parte a lucrării se prezintă contribuțiile principale aduse de către teza de doctorat la optimizarea unor caracteristici constructive ale pieselor realizate prin deformare plastică la rece, importanța științifică și practică a lucrării, precum și perspectivele legate de activitatea de cercetare-dezvoltare a optimizării unor caracteristici constructive ale pieselor realizate prin deformare plastică la rece, inclusiv prin simulare numerică.

Partea I.

Stadiul actual al cercetărilor privind prelucrarea pieselor cu margini răsfrânte din table metalice

Capitolul 1. Cercetări privind răsfrângerea marginilor conturului exterior al pieselor din table metalice prin deformare plastică la rece

1.1. Forme, caracteristici constructive și tehnologicitatea acestor piese

1.1.1. Piese cu forme simple și piese cu forme complexe

Răsfrângerea marginilor conturilor exterioare ale pieselor este o operație răspândită care se aplică la o mare diversitate de piese cu forme simple sau forme complexe din componența automobilelor sau altor produse (elemente de caroserie, piese componente ale aeronavelor etc.). Acestea, se pot împărți în trei mari grupe în funcție de rolul lor funcțional, și anume:

- piese de rezistență;
- piese de aspect;
- piese care îmbină ambele roluri funcționale, respectiv, de aspect și de rezistență.

1.1.2. Necesitatea răsfrângerii marginilor conturului exterior

Procedeul de răsfrângere a marginilor conturilor exterioare ale pieselor după un contur curbiliniu convex sau concav, constă în formarea unei perete la marginea conturului exterior al pieselor în vederea:

- creșterii rigidității;
- creării de zone de sprijin;
- creării de zone de asamblare prin sudare;
- asigurării de zone de etanșare.

Acest perete se poate obține după caz, într-o singură sau mai multe operații de răsfrângere, cu ajutorul matrițelor montate pe prese.

1.1.3. Tehnologicitatea pieselor cu marginile conturului exterior răsfrânte

Pentru piesele cu marginile conturului exterior convex sau concav răsfrânt, tehnologicitatea acestora este apreciată prin analiza gradului de deformare și, respectiv, a razelor de racordare a marginii(-lor) răsfrânte, [R01, C02, S03].

Comparând valorile calculate cu valorile limită ale acestui coeficient, se poate aprecia dacă piesa este tehnologică sau nu.

O altă metodă de evaluare a tehnologicității pieselor cu marginile conturului exterior convex sau concav răsfrânt este prezentată de Ivana Suchy [I02], plecând de la faptul că aceste tipuri de deformări sunt întotdeauna însoțite de solicitări de compresiune în cazul pieselor cu contur curbiliniu concav și, respectiv, la solicitări de întindere în cazul pieselor cu contur curbiliniu convex. Astfel, cunoscând valoarea deformației, în %, care apare în timpul procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior, se poate determina forma semifabricatului.

1.1.4. Defecte ale pieselor din tablă cu margini răsfrânte

Defectele care apar la piesele cu margini răsfrânte sunt generate de starea de tensiune care apare în timpul deformării semifabricatului și anume:

- la piesele cu margini răsfrânte după un contur convex apar solicitări de compresiune circumferențiale care produc ondulații în flanșa răsfrântă și, respectiv, o creștere a grosimii acesteia către extremitatea flanșei;
- la piesele cu margini răsfrânte după un contur concav apar solicitări de întindere circumferențiale care produc fisuri în flanșa răsfrântă și, respectiv, o micșorare a grosimii acesteia către extremitatea flanșei.

Frecvent, se pot întâlni ambele tipuri de răsfrângere a marginilor la aceeași piesă, sau uneori răsfrângere după un contur mixt concav-convex.

1.2. Metode experimentale pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor și a Curbei Limită de Formare (CLF)

1.2.1. Noțiuni generale privind modul de evaluare grafică a formabilității pieselor simulate numeric

Evaluarea grafică a formabilității pieselor, adică a potențialelor defecte care pot apărea în timpul simulării numerice se face cu ajutorul *Curbei Limită De Formare* (CLF). Principiul acestei evaluări se bazează pe faptul că starea fiecărui punct de pe suprafața unei piese poate fi descrisă cu ajutorul a doi parametri:

- deformarea principală majoră, ε_1 , (major principle strain), Fig. 1.1;
- deformarea principală minoră, ε_2 , (minor principle strain), Fig. 1.1.

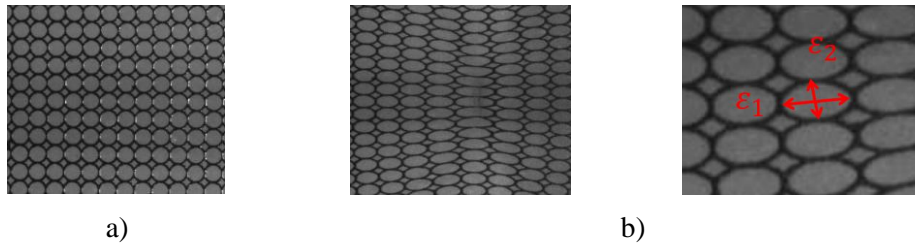


Fig. 1.1. Determinarea valorilor deformațiilor principale majore și minore

Trasarea graficului *Curbei Limită de Formare*, Fig. 1.2, [S01], se realizează în urma încercărilor experimentale de deformare la tracțiune, întindere plană, întindere bi-axială și întindere echibi-axială echidistantă, Fig.1.3, în ipoteza unei legături liniare între deformația principală maximă ε_1 , și deformația principală minimă ε_2 , conform rel. (1.1) [A05], Fig. 1.3.

$$\varepsilon_1 = \text{const} * \varepsilon_2 \quad (1.1)$$

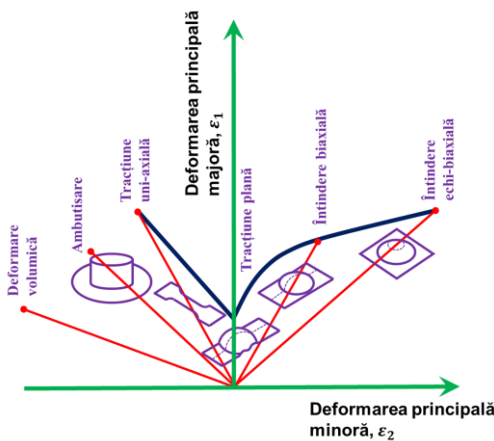


Fig. 1.2. Graficul Curbei Limită de Formare, (CLF)

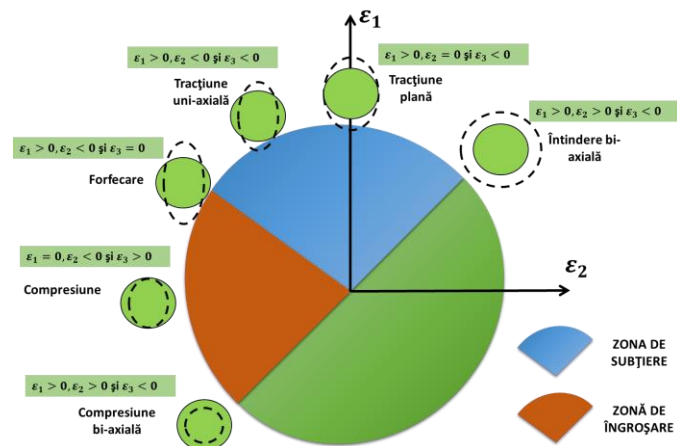


Fig. 1.3. Zonele caracteristice stării de deformare

1.2.2. Teste experimentale utilizate pentru determinarea Curbei Limită de Formare

Cercetările pentru analiza și determinarea caracteristicilor mecanice a materialelor sau unor *criterii și modele experimentale* care să descrie comportamentul acestor materiale sub acțiunea stărilor complexe de tensiuni care apar în timpul proceselor de deformare plastică la rece constituie o continuă preocupare pentru mulți cercetători. Printre încercările experimentale utilizate atât în industrie cât și în cercetare pentru determinarea Curbei Limită de Formare menționăm:

- Testul Nakazima
- Testul de umflare hidraulică (BULGE TEST)
- Testul de solicitare la tracțiune (întindere uniaxială)

1.3. Procedee tehnologice de obținere a pieselor cu margini răsfrânte

Cele mai răspândite procedee de răsfrângere a marginilor conturului exterior al pieselor din tablă subțire utilizate în industria auto sunt cele realizate cu ajutorul matrițelor metalice sau cu ajutorul matrițelor de cauciuc.

În Fig. 1.4 se prezintă schematic procesul de răsfrângere a marginilor cel mai uzual folosit, unde *direcția de mișcare a poansoanelor de răsfrângere este paralelă cu direcția de lucru a preseii*, în cazurile realizării acestei deformări de jos în sus sau de sus în jos. Există și situații speciale în care *direcția de mișcare a poansoanelor de răsfrângere nu este paralelă cu direcția de lucru a preseii*. În aceste situații se utilizează elemente de tip camă, care transformă mișcarea verticală preluată de la culisoul preseii în mișcări pe direcții cu anumite unghiuri față de direcția de lucru a preseii.

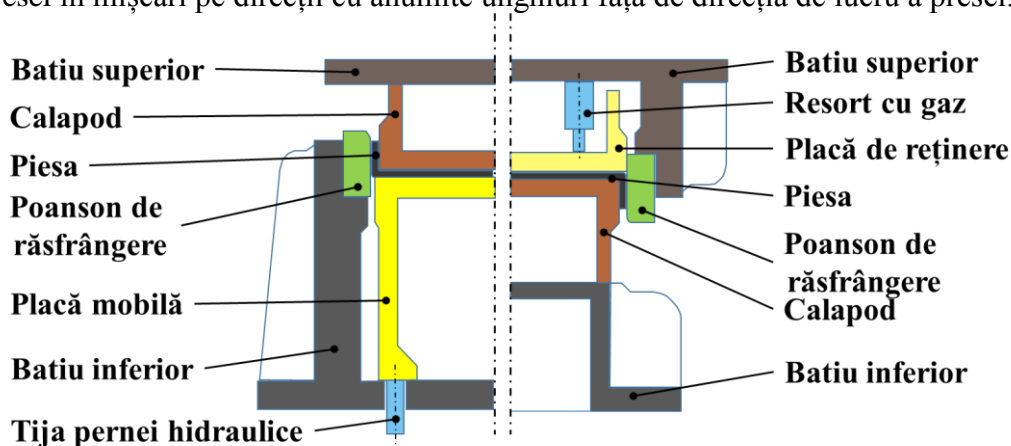


Fig. 1.4. Schema procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior al pieselor

Capitolul 2. Cercetări privind simularea numerică și modelarea statistică a caracteristicilor procesului de răsfrângere a marginilor

2.1. Simularea numerică a răsfrângerii marginilor conturului exterior

2.1.1. Simularea numerică a proceselor de deformare plastică la rece. Definiție, scop, avantaje față de cercetarea experimentală

Procesele de deformare plastică la rece au o răspândire foarte ridicată în industria auto dar și în alte domenii cum ar fi industria constructoare de aeronave, mașini și aparate electrice, mecanică fină, utilaje pentru industria ușoară, produse casnice etc.

Datorită utilizării pe scară largă a acestor procese, a apărut și s-a dezvoltat necesitatea modelării și simulării numerice a acestora.

Programele utilizate s-au dezvoltat în concordanță cu cererile și nevoile exprimate de industriile care utilizează deformarea plastică pot modela și simula aproape toate necesitățile tehnice care pot apărea în timpul proceselor de deformare plastică la rece, rezultatele obținute având o precizie foarte ridicată.

Principalele probleme analizate și rezolvate cu ajutorul simulării numerice a proceselor de deformare plastică la rece sunt:

- **validarea utilizării de noi oțeluri** avansate cu rezistență ridicată [S02, S08];
- **analiza fezabilității și formabilității** la ambutisarea pieselor complexe [P05, J01, V01] ;
- **determinarea valorilor forțelor de reținere a semifabricatului** pentru prevenirea apariției ondulațiilor și/sau cutelor în timpul desfășurării proceselor de deformare [S10], **forțe generate cu ajutorul plăcilor de reținere (presiune) sau a nervurilor de reținere dispuse în zonele cu probleme puse în evidență cu ajutorul simulării numerice** [P04];
- **determinarea valorilor forțelor necesare desfășurării proceselor de deformare plastică**
- **punerea în evidență și prevenirea diverselor defecte care pot apărea în timpul desfășurării procesului de deformare** [M03];
- **determinarea formei optime a semifabricatelor** (dimensiuni minime) [A04, J02];
- **predicția apariției ruperilor** în piese în timpul procesului de deformare plastică la rece [V03, T01, R02];
- **analiza stării complexe de tensiuni:** întindere uniaxială, întindere plană sau întindere biaxială (expansiune) [S07, S09];
- **determinarea revenirii elastice** a pieselor, atât global (toată piesa), cât și local în anumite zone de interes cum ar fi zonele supuse proceselor de îndoire;
- **îmbunătățirea și validarea conceptului de design** ;
- **realizarea zonelor de trecere dintre piesa finală și zonele de adaos de material** necesare desfășurării proceselor de deformare plastică.

Pe baza celor prezentate mai sus, se observă că utilizarea simulării numerice a devenit parte integrantă a proiectării și planificării proceselor de deformare plastică la rece. Acest instrument oferă o serie de *avantaje față de cercetarea experimentală* cum ar fi:

- permite identificarea zonelor de pe suprafața piesei care vor pune probleme pentru obținerea lor în timpul procesului de deformare;
- permite determinarea gradului de deformare a materialului pieselor cu forme complexe încă din faza de proiectare a procesului tehnologic, lucru imposibil de estimat până la apariția simulării numerice fără efectuarea de încercări experimentale;
- permite optimizarea caracteristicilor geometrice ale suprafețelor ce definesc forma pieselor sau ale semifabricatelor;
- permite verificarea corectitudinii soluțiilor tehnice adoptate pentru evitarea obținerii de piese cu defecte;
- permite determinarea numărului minim de operații necesare pentru obținerea pieselor;
- reduce costurile de proiectare;
- permite validarea posibilității de utilizare a unor noi tipuri de materiale, mai ieftine decât cele utilizate în mod uzual, sau cu grosimi mai mici;
- permite stabilirea condițiilor de lucru necesare obținerii pieselor cu costuri cât mai mici;
- permite determinarea dimensiunilor minime ale semifabricatelor.

2.1.2. Rolul simulării numerice în cadrul procesului de fabricare a produselor

Simularea numerică este prezentă pe tot parcursul concepției procesului de fabricare a unui produs, rezultatele simulării numerice reprezentând datele de intrare pentru realizarea viitoarelor utilaje de deformare plastică cu ajutorul cărora va fi materializat viitorul produs.

Imediat după definitivarea etapei de concepție a unui nou produs, simularea numerică este utilizată pentru verificarea fezabilității, atât a formei produsului cât și a procesului de fabricare propus pentru obținerea acestuia. În cele mai multe cazuri, pentru produsele cu forme complexe, prima verificare a fezabilității produsului propus are scopul de a identifica zonele critice supuse solicitărilor de întindere sau compresiune excesive, adică zonele care sunt predispuse la subțieri excesive, respectiv, la apariția fisurilor sau a ruperii materialului pe suprafața piesei, și/sau a zonelor predispuse la apariția undulațiilor sau la creșterea grosimii materialului peste o limită maximă impusă.

2.1.3. Tipuri de defecte prezise și studiate cu ajutorul simulării numerice

În timpul desfășurării proceselor de deformare plastică la rece, datorită modificării continue a stării de tensiuni care acționează asupra pieselor, apar diverse defecte legate în mod direct de aceste stări. Defectele apărute pot fi tranzitorii sau remanente, însă toate influențează în mod negativ calitatea piesei. În funcție de rolul funcțional al piesei, aceste defecte pot fi acceptate sau nu.

Printre defectele cele mai des întâlnite se întâlnesc:

- fisuri sau rupturi ale pieselor - apar în zonele intens solicitate la întindere;
- undulațiile sau cutele - apar sub elementul de reținere al semifabricatului sau pe suprafețele care definesc forma piesei, în zonele supuse la stări de compresiune;
- zone concave (Oreilles de Mickey), apar în zonele solicitate insuficient la tensiuni de întindere și, în consecință, materialul nu a depășit încă limita de curgere, σ_c ;

2.1.4. Modelarea statistică a caracteristicilor de proces cu ajutorul metodei suprafețelor de răspuns

Programarea statistică a experiențelor, respectiv analiza influenței parametrilor de proces asupra rezultatului sau rezultatelor finale este realizată cu ajutorul Metodei Suprafețelor de Răspuns. Această metodă este utilizată în lucrările lor de către [D01, D02, D03, D05, D06, V05, S06], pentru determinarea influenței parametrilor așchierii asupra rugozității suprafeței la frezarea frontală a aliajelor de aluminiu cu siliciu [D01], modelarea statistică a forței maxime și a coeficientului forței medii de stanțare [D02] sau modelarea statistică a revenirii elastice a pieselor îndoite în forma de V [D06]. Utilizarea acestei metode a permis o ierarhizare a influenței factorilor considerați și evidențierea interacțiunii existente între variabilele independente.

2.2. Modelarea caracteristicilor procesului de răsfrângere a marginilor cu ajutorul datelor obținute din simularea numerică

2.2.1. Modelarea matematică cu ajutorul metodei suprafețelor de răspuns

Cercetarea experimentală a unui proces constă în evidențierea celor mai semnificativi parametri care pot influența procesul analizat, x_1, x_2, \dots, x_i , și stabilirea legăturilor existente între aceștia și răspunsurile obținute, y_1, y_2, \dots, y_n , Fig. 2.1.

Metoda suprafețelor de răspuns consideră legătura între parametri unui proces, (x_1, x_2, \dots, x_i) , și efectele acestora asupra fenomenului studiat ca suprafețe în spațiul tridimensional al variabilelor, numite suprafețe de răspuns. Acest lucru presupune că pentru fiecare valoare a parametrilor considerați, se va determina o valoare pentru funcția dependentă, ce se va afla pe suprafața de răspuns, Fig. 2.2, [D04, S04].

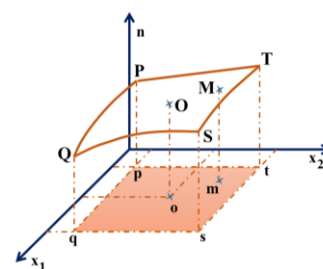
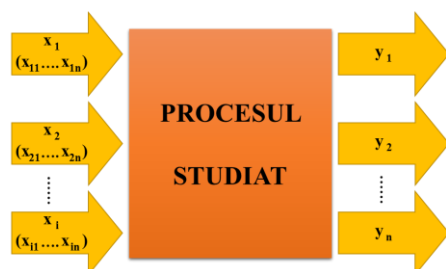


Fig. 2.1. Schema cercetării experimentale a
unui procesFig. 2.2. Suprafața de răspuns
a unui proces studiat

Problemele pe care le ridică determinarea unei funcții de regresie sunt, în principal, următoarele:

- a) programarea statistică a experimentelor;
- b) stabilirea formei funcției (modelului);
- c) calculul coeficienților de regresie;
- d) analiza de regresie;
- e) determinarea erorilor statistice și a intervalelor de încredere pentru variabila dependentă.

Capitolul 3. Concluzii referitoare la stadiul actual al cercetărilor privind obținerea pieselor cu margini răsfrânte din table metalice

Din analiza stadiului actual al cercetării-dezvoltării referitoare la obținerea pieselor cu margini răsfrânte din table metalice prin deformare plastică la rece se desprind concluzii importante după cum urmează.

- Utilizarea simulării numerice a devenit parte integrantă a proiectării și planificării proceselor de deformare plastică la rece;
- Utilizarea simulării numerice încă din faza de proiectare, permite identificarea zonelor care vor pune probleme în timpul deformării;
- Simularea numerică este utilizată pentru verificarea corectitudinii soluțiilor tehnice adoptate în scopul minimizării probabilității de obținere de piese cu defecte;
- Simularea numerică este utilizată pentru optimizarea caracteristicilor geometrice ale suprafețelor ce definesc forma pieselor sau a semifabricatelor;
- Simularea numerică este utilizată pentru optimizarea caracteristicilor geometrice ale suprafețelor elementelor active din componența ștanțelor sau matrițelor;
- Simularea numerică este utilizată pentru stabilirea numărului minim necesar de operații pentru prelucrarea piesei;
- Simularea numerică este utilizată pentru validarea posibilităților de utilizare a unor noi tipuri de materiale;
- Lucrările care au făcut obiectul cercetării documentare acoperă o problemă largă a evaluării tehnologicității pieselor din tablă prin simulare numerică;
- Se poate afirma că, în proporție de peste 90%, procesele de deformare plastică la rece din industria auto sunt validate pe baza rezultatelor obținute prin simulare numerică, metodă utilizată de toți marii producători auto.

Partea a II-a.

Contribuții la cercetarea răsfrângerii marginilor conturului exterior al pieselor prelucrate prin deformare plastică la rece

Capitolul 4. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare privind optimizarea constructiv - tehnologică a caracteristicilor pieselor cu margini exterioare răsfrânte

4.1. Direcțiile de cercetare-dezvoltare

Pe baza celor desprinse din analiza stadiului actual al cercetărilor, se apreciază a fi de actualitate

următoarele direcții de cercetare-dezvoltare privind răsfrângerea marginilor conturului exterior al pieselor din table metalice prin deformare plastică la rece:

- aprofundarea teoretico-experimentală a proiectării și prelucrării zonelor pieselor cu margini răsfrânte, inclusiv în construcția caroseriilor de automobile;
- aplicarea pe scară largă a simulării numerice și modelării statistice, prin studii de caz, pentru determinarea influenței caracteristicilor de material și geometrice ale pieselor din table metalice asupra tehnologicității acestora, inclusiv în legătură cu prelucrarea de margini răsfrânte;
- realizarea de baze de date cu produse/ piese care includ zone cu margini răsfrânte, utilizabile în procese de proiectare și fabricare a produselor;
- dezvoltarea de echipamente modulate pentru prelucrarea de margini răsfrânte în sisteme tehnologice de fabricare prin deformare plastică.

4.2. Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare

Având în vedere datele și concluziile desprinse din analiza stadiului actual, precum și direcțiile de cercetare-dezvoltare privind răsfrângerea marginilor pieselor metalice prin deformare plastică la rece, se asumă ca obiectiv principal al activității de cercetare-dezvoltare avansate în cadrul tezei de doctorat: **cercetarea prin simulare numerică și modelare statistică a caracteristicilor marginilor răsfrânte ale pieselor din table metalice prelucrabile prin deformare plastică la rece.**

4.3. Metodologia de cercetare-dezvoltare

Pentru realizarea obiectivului principal de cercetare-dezvoltare se propun etapele metodologice după cum urmează.

4.3.1. Simularea numerică a răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor obținute din table metalice prin deformare plastică la rece

- a. Alegerea programului de realizare a simulărilor și a structurii acestuia
- b. Configurarea programului de simulare
- c. Stabilirea datelor inițiale necesare simulării
- d. Introducerea datelor în calculator
- e. Rularea programului de simulare
- f. Extragerea rezultatelor simulării.

4.3.2. Modelarea statistică a rezultatelor simulării

- a. Stabilirea formei și a complexității modelelor;
- b. Estimarea coeficienților modelelor;
- c. Analiza statistică a modelelor obținute:
 - verificarea semnificației coeficienților modelelor;
 - determinarea intervalelor de încredere 95% pentru coeficienții modelelor și răspunsurile prezise de modele.
- d. Restructurarea modelelor reținând numai termenii cu coeficienții puternic semnificativi.

4.3.3. Reprezentarea grafică a modelelor obținute și analiza influenței parametrilor asupra caracteristicilor răsfrângerii marginilor

- a. Reprezentarea grafică 3D și 2D a modelelor obținute;
- b. Analiza influenței parametrilor asupra caracteristicilor răsfrângerii marginilor conturului exterior convex și concav;
- c. Optimizarea structurii constructive a marginilor răsfrânte ținând seamă de restricțiile impuse
- d. Concluzii.

Capitolul 5. Cercetări privind răsfrângerea marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor din table metalice prin simulare numerică cu elemente finite

5.1. Definierea caracteristicilor constructive

În cazul pieselor complexe cu formă convexă sau concavă a conturului exterior, literatura de specialitate nu oferă suficiente informații privind tehnologicitatea acestor piese. Toți marii producători auto se bazează pe experiența proprie acumulată la fabricarea de piese similare și pe preluarea de valori ale *caracteristicilor geometrice constructive de la piese care au fost fabricate anterior*.

Se poate considera că tehnologicitatea pieselor cu marginile conturului exterior convex răsfrânt este influențată de următoarele caracteristici constructive ale piesei (Fig. 5.1, a, b c și d):

- r_{so} - raza de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal, mm, Fig. 5.1 (c);
- r_{sv} - raza de racordare stânga în plan vertical, mm, Fig. 5.1 (b) (secțiunea C-C);
- r_{mv} - raza de racordare mediană în plan vertical, mm, Fig. 5.1 (a) (secțiunea A-A);
- r_{dv} - raza de racordare dreapta în plan vertical, mm, Fig. 5.1 (d) (secțiunea B-B);
- α_{ro}° - unghiul în plan orizontal dintre pereții laterali răsfrânți ai piesei, grade, Fig. 5.1 (c);
- α_m° - unghiul de înclinare median dintre normala la suprafața piesei și peretele de racordare, grade, Fig. 5.1 (a);
- α_s° - unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și peretele răsfrânt din partea stângă, grade, Fig. 5.1 (b);
- α_d° - unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și peretele răsfrânt din partea dreaptă, grade, Fig. 5.1 (d);
- l_s - lungimea peretelui răsfrânt din partea stângă, mm, Fig. 5.1 (b);
- l_m - lungimea peretelui răsfrânt din mijlocul zonei de racordare, mm, Fig. 5.1 (a);
- l_d - lungimea peretelui răsfrânt din mijlocul zonei de racordare, mm, Fig. 5.1 (a);
- g - grosimea materialului utilizat, mm, Fig. 5.1 (b).

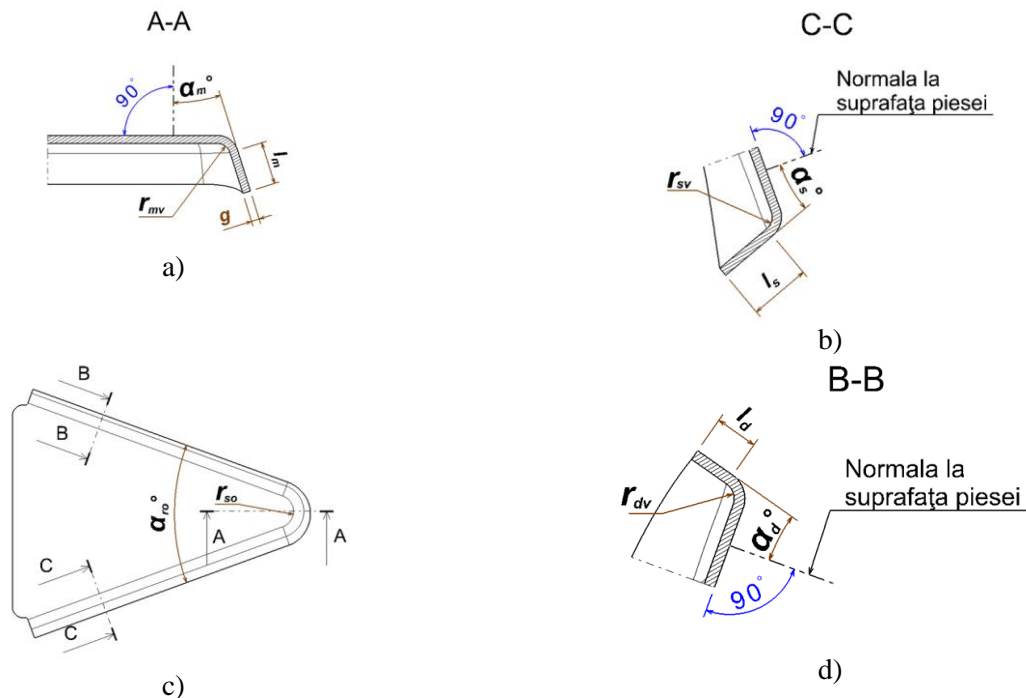


Fig. 5.1. Caracteristicile constructive ale pieselor cu marginile conturului exterior convex răsfrânt

Aceste caracteristici constructive evidențiate mai sus, influențează de asemenea și tehnologicitatea pieselor cu marginile conturului exterior concav răsfrânt.

5.2. Tehnologia de răsfrângere a marginilor folosită

Simularea numerică oferă posibilitatea evaluării tehnologicității și, respectiv, a prescrierii corecte a valorilor caracteristicilor constructive ale pieselor, prin analiza creșterii valorii grosimii piesei în zonele supuse la solicitări de compresiune, sau analiza diminuării valorii grosimii piesei în zonele supuse la solicitări de întindere.

5.3. Parametrii procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex sau concav luați în studiu

Pentru stabilirea parametrilor procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex sau concav s-a plecat de la ipoteza că tehnologicitatea procesului de deformare este influențată de toate caracteristicile geometrice constructive ale piesei.

Deoarece numărul de parametri ai procesului de răsfrângere rezultați care ar trebui studiați este foarte mare, ceea ce implica un număr foarte mare de simulări, și ținând seama că în realitate unii dintre parametri definiți anterior nu au valori impuse sau pot avea aceleași valori, s-au considerat *ipoteze simplificatoare* în vederea reducerii numărului acestor parametri.

În concluzie, dintre cei 11 parametri geometrici inițiali considerați că influențează procesul de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor, se vor utiliza următorii șase parametri:

- r_{so} - raza de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal, în mm;
- r_v - raza de racordare stânga în plan vertical, în mm;
- α_{ro}° - unghiul în plan orizontal dintre pereții laterali răsfrânți ai piesei, în grade;
- α_s° - unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și peretele răsfrânt din partea stângă, în grade;
- α_d° - unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și peretele răsfrânt din partea dreaptă, în grade;
- l - lățimea pereților răsfrânți, în mm.

5.3.1. Domeniile de variație ale parametrilor geometrici

Limitele intervalelor de variație ale parametrilor geometrici considerați, pentru piesele cu marginile conturului exterior convex sau concav răsfrânte, *au fost alese pe baza observațiilor, cazurilor de lucru și a experienței acumulate în activitatea de proiectare a pieselor auto* desfășurată la sediul RENAULT TEHNOLOGIE ROUMANIE.

5.3.2. Nivelurile de variație ale parametrilor geometrici

Pentru determinarea modelului statistic polinomial utilizat, care este unul de ordinul 2 cu interacțiuni, s-au considerat cinci niveluri de variație ale variabilelor independente.

5.4. Alegerea tipului de program de simulare, proiectarea lui și stabilirea numărului de simulări necesar modelării statistice

Plecând de la recomandări din literatura de specialitate, pe baza experienței acumulate la cercetarea proceselor de deformare plastică la rece, s-a ales un program factorial compus cu puncte centrale, ortogonal, în vederea alcătuirii programelor de simulare a proceselor de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex și concav [D03].

Astfel, pentru un număr de șase parametri geometrici (variabile independente) *programul factorial compus cu puncte centrale ortogonal* va cuprinde un număr de 100 de simulări experimentale dintre care 64 de puncte unghiulare, 12 puncte axiale și 24 de puncte centrale.

5.5. Softul folosit pentru simularea numerică a procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex sau concav

Softul de simulare utilizat la studiul procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor din tablă se numește AutoForm, soft utilizat de multe dintre marile companii producătoare auto ca: Renault, Audi, BMW, Chrysler, Fiat, Ford, GAZ Group, General Motors, Honda, Volkswagen, Volvo etc.

În vederea rulării simulărilor procesului de răsfrângere a marginilor pieselor cu contur convex sau concav s-au parcurs următoarele etape:

1. Importarea modelului geometric și a curbei care definește forma și dimensiunile semifabricatului;
2. Alegerea tipului de presă;
3. Definirea planului de operații;
4. Definirea suprafețelor obiectiv pentru generarea elementelor active și a elementului de presare;
5. Definirea caracteristicilor dimensionale ale poansonului de răsfrângere;
6. Definirea semifabricatului utilizat: dimensiuni, tip de material, grosimea acestuia;
7. Definirea caracteristicilor de lucru ale preseii: forța de reținere, cursa de lucru, poziția elementelor active etc.;
8. Analiza și evaluarea rezultatelor obținute;

5.6. Datele inițiale necesare pentru simularea cu elemente finite a răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav

5.6.1. Concepția modelului geometric numeric

Modelul geometric numeric, Fig. 5.2 și 5.3, reprezintă concretizarea virtuală a piesei fizice care se urmărește să se obțină.

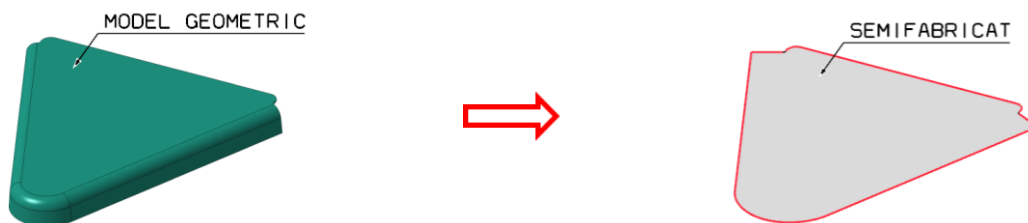


Fig. 5.2. Representarea modelului geometric numeric și a semifabricatului utilizat pentru piese cu marginile conturului exterior convexe

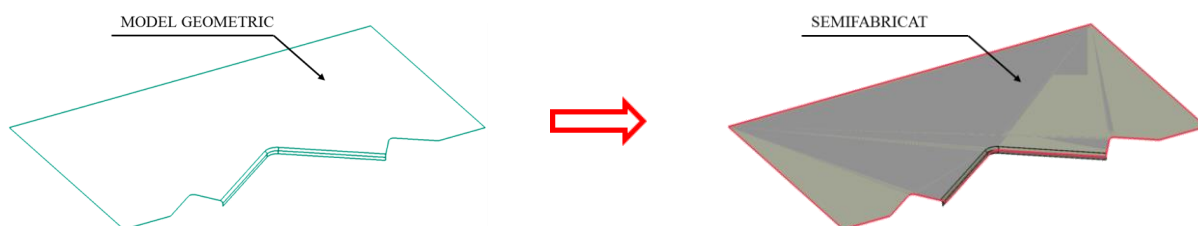


Fig. 5.3. Representarea modelului geometric numeric și a semifabricatului utilizat pentru piese cu marginile conturului exterior concave

Pentru ușurința modificării dimensiunilor și formei piesei cât și a semifabricatului, s-a realizat cu ajutorul softului CATIA o interfață, Fig. 5.4, care face legătura dintre parametrii modelului geometric cu un tabelul centralizator, de tip excel, Fig. 5.5, ce conține valorile parametrilor geometrici considerați, aranjați conform structurii programului de simulări experimentale adoptat.

Line	'Raza superioară ...	'Raza de rac...	'Unghiul de ra...	'Unghiul de încl...	'Lungimea ...	'Lungimea p...	'Unghiul de i...	'Lungimea p...	'Unghiul de...
1	6.28mm	2.62mm	33.88deg	2.99deg	2.4mm	2.4mm	2.99deg	2.4mm	2.99deg
2	13.87mm	2.62mm	33.88deg	2.99deg	2.4mm	2.4mm	2.99deg	2.4mm	2.99deg
3	6.28mm	4.85mm	33.88deg	2.99deg	2.4mm	2.4mm	2.99deg	2.4mm	2.99deg
4	13.87mm	4.85mm	33.88deg	2.99deg	2.4mm	2.4mm	2.99deg	2.4mm	2.99deg

Fig. 5.4. Tabelul centralizator al parametrilor geometrici

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Nr. Crt.	'Raza superioară de racordare în plan orizontal' (mm)	'Raza de racordare în plan vertical' (mm)	'Unghiul de racordare în plan orizontal' (deg)	'Unghiul de înclinare dreapta dintre normala la suprafața piesei și peretele răsfrânt' (deg)	'Lungimea peretelui răsfrânt din partea dreaptă' (mm)	'Unghiul de înclinare median dintre normala la suprafața piesei și peretele de racordare' (deg)	'Lungimea peretelui răsfrânt din mijlocul zonei de racordare' (mm)	'Unghiul de înclinare stanga dintre normala la suprafața piesei și peretele răsfrânt' (deg)	'Lungimea peretelui răsfrânt din partea stângă' (mm)	'Grosimea' (mm)
1	6.28	2.62	33.88	2.99	2.40	2.99	2.40	2.99	2.40	0.65
2	13.87	2.62	33.88	2.99	2.40	2.99	2.40	2.99	2.40	0.65
3	6.28	4.85	33.88	2.99	2.40	2.99	2.40	2.99	2.40	0.65

Fig. 5.5. Parametrii geometrici ai modelului CAD

5.6.2. Concepția modelului numeric

Concepția *modelelor numerice* s-a realizat prin importarea *suprafețelor modelelor geometrice numerice* în softul de simulare pentru fiecare simulare în parte.

Modelele numerice, Fig. 5.6 și 5.7, sunt constituite din trei elemente rigide și anume: poanson, matriță, element de reținere (presor) și un element deformabil, semifabricatul.

Cinematica modului de lucru ales corespunde prelucrării pe o presă de tip simplu efect și este prezentată în Fig. 5.8.

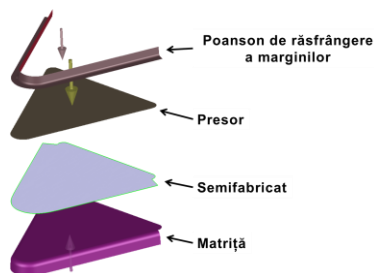


Fig. 5.6. Modelul numeric pentru piese cu marginile conturului exterior convexe

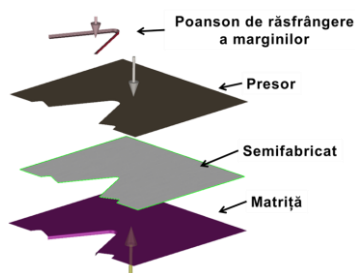


Fig. 5.7. Modelul numeric pentru piese cu marginile conturului exterior concave

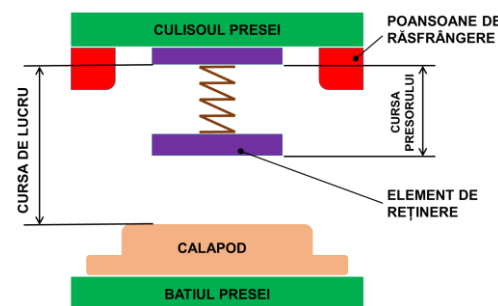


Fig. 5.8. Cinematica procesului de răsfrângere

5.6.3. Condiții de lucru considerate

Simulările s-au realizat în următoarele condiții de lucru:

- *suprafața numerizată* importată corespunde *suprafeței interioare a piesei*;
- *grosimea materialului* $g = 0,65$ mm;
- *raza de racordare a poansonului* de răsfrângere, $r_{rp} = 2$ mm;
- poansonul trebuie să depășească peretele format cu minim 5 mm de unde se termină raza de racordare a acestuia;
- tipul de material utilizat, DC04;
- *valoarea coeficientului de frecare* dintre elementele active și semifabricat este de 0,16;

- *cursa preseii este de 700 mm, viteza de 233,33 mm/s, timpul de ciclu este de 6 secunde rezultând o rată de 10 lovituri/minut;*
- *cursa presorului se reglează conform situațiilor reale de lucru - 450 mm;*
- *abaterea de la forma finală a conturului piesei cu margini răsfrânte să nu depășească valoarea de 0,15 mm;*
- *valoarea forței de reținere dezvoltate de placa de reținere, 100 kN;*

5.6.4. Stabilirea răspunsurilor măsurate

Pentru stabilirea caracteristicilor de proces (a variabilelor dependente) care se vor studia și sunt influențate pe parcursul procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior sau concav de către caracteristicile geometrice considerate, s-a ținut seama de posibilele defecte care pot apărea în timpul procesului de răsfrângere.

S-a considerat că variabilele dependente care vor fi studiate în continuare pentru analiza procesului de răsfrângere a marginilor sunt subțierea maximă admisibilă, îngroșarea maxim admisibilă, și, respectiv, variația grosimii pereților răsfrânți.

5.7. Simularea numerică a procesului de răsfrângere a marginilor pentru fiecare din punctele programelor de simulare

5.7.1. Evaluarea calitativă a solicitărilor ajutorul Diagramei Limită de Formare

Analiza gradului de deformare a pieselor cu marginilor conturului exterior convex sau concav răsfrânte, se face cu ajutorul Diagramei Limită de Formare generată de către softul de simulare la sfârșitul fiecărei simulări rulate, Fig. 5.9. În acest scop, se folosește un cod de culori care are următoarele semnificații [D05]:

- **Zona gri** - reprezintă zona în care deformațiile din material sunt foarte mici și nu sunt remanente
- **Zona verde** - reprezintă zona în care starea de tensiune din material s-a modificat, iar valorile acesteia nu depășesc limitele admisibile
- **Zona albastră** - zona în care materialul este supus unei stări puternice de compresiune uni-axială
- **Zona mov** - materialul este supus unei stări puternice de compresiune bi-axiale
- **Zona maro** - materialul este supus unei stări de întindere bi-axiale, iar grosimea acestuia se micșorează peste Limita de siguranță de 10%, caz în care piesa obținută este considerată nefezabilă
- **Zona roșie** - reprezintă zona în care starea de tensiune a semifabricatului depășește starea de tensiune admisibilă, apar fisuri pe suprafața piesei, aceasta fiind considerată rebut

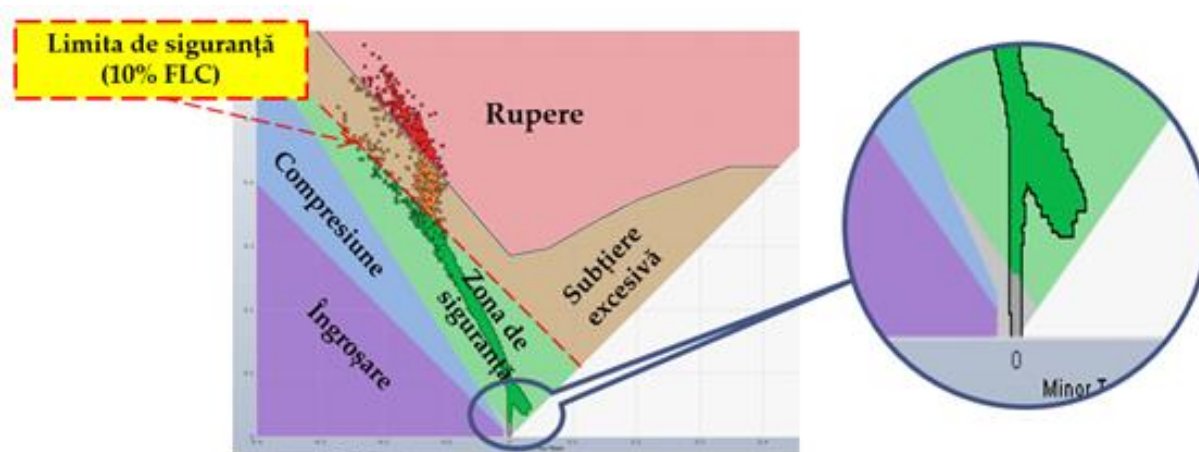


Fig. 5.9. Analiza fezabilității pieselor cu ajutorul Diagramei Limită de Formare

5.7.2. Evaluarea grafică calitativă a gradului de deformare

Pentru *determinarea și interpretarea stării de solicitare a materialului pieselor cu marginile conturului exterior convex și concav supuse procesului de răsfrângere a marginilor*, s-au rulat în total 200 de simulări. Acest studiu *oferă o primă evaluare grafică calitativă generală a gradului de deformare* la care este supus semifabricatul.

5.7.3. Evaluarea cantitativă a îngroșării și a subțierii materialului în timpul procesului de răsfrângere a marginilor conturului convex sau concav exterior al piesei

Pentru *determinarea cantitativă a influențelor solicitărilor de compresiune și întindere asupra tehnologicității piesei finale și, respectiv, asupra procesului de deformare*, s-au analizat la piesele supuse procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior convex, Fig. 5.10, respectiv, concav, variația subțierii materialului, variația îngroșării pereților răsfrânți și, respectiv, evoluția gradului de deformare, între începutul cursei de lucru (Punctul Mort Superior) și sfârșitul cursei de lucru (Punctul Mort Inferior).

Pe baza analizei proceselor de răsfrângere a marginilor pieselor cu contur exterior convex, Fig. 5.10, și concav, din analiza celor 200 de simulări efectuate, s-au putut extrage informațiile necesare referitoare la caracteristicile de proces urmărite.

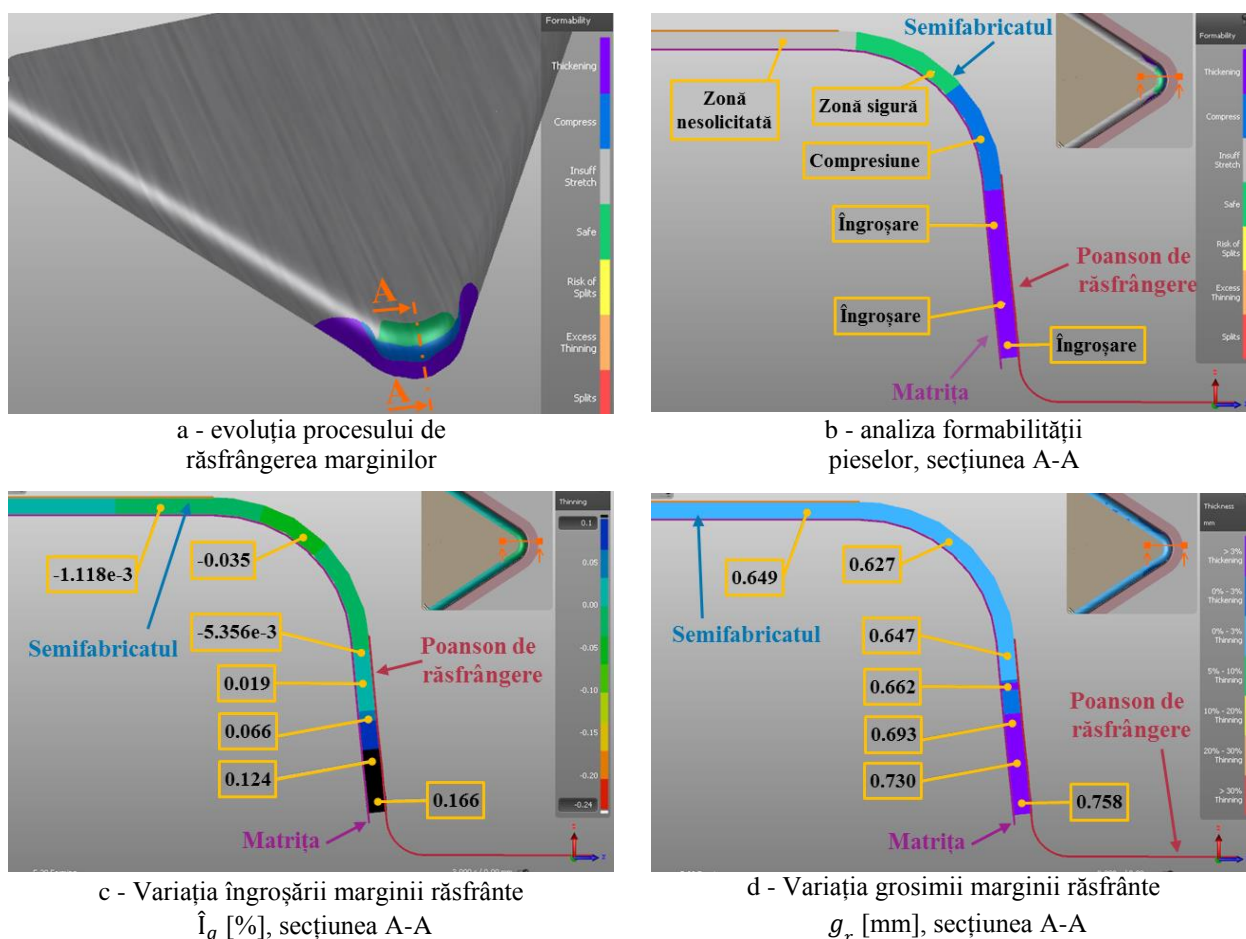


Fig. 5.10. Analiza cantitativă a influențelor solicitărilor de compresiune și întindere asupra materialului marginii răsfrânte: *sfârșitul cursei de lucru - PMI*

5.8. Concluzii privind simularea numerică a răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav

Din analiza datelor obținute prin simularea procesului de răsfrângere a marginilor conturului exterior, în cazul pieselor cu contur convex, s-au constatat următoarele:

- producerea unei subțieri a grosimii piesei S_g , în zona razei de racordare, subțiere datorată forțelor de frecare dintre elementele active și semifabricat, cu valori cuprinse în intervalul 1.6 % - 7.4 % din grosimea nominală a piesei, și, respectiv,
- producerea unei îngroșări a marginii răsfrânte la extremitatea acesteia datorită surplusului de material, cu valori cuprinse în intervalul 2.9% (exp. nr. 5) - 23.6% (exp. nr. 76) din grosimea nominală a piesei;

În cazul pieselor cu contur concav s-au constatat:

- producerea unei subțieri a grosimii piesei S_g , la extremitatea marginii răsfrânte datorită solicitărilor de întindere circumferențiale cu valori cuprinse în intervalul 9.5% (exp. nr. 4) - 31.1% (exp. nr. 35) din grosimea nominală a piesei, și, respectiv,
- solicitările de compresiune în marginea răsfrântă sunt inexistente.

Având în vedere *valorile maxime admisibile* ale parametrilor analizați, **24% din grosimea nominală a piesei pentru subțierea maximă admisibilă și 1% din grosimea nominală a piesei pentru îngroșarea maximă admisibilă**, se poate concluziona că:

- *influența subțierii produsă la piesele cu margini răsfrânte convexe este neglijabilă*, de 7.4%, grosimea minimă a piesei ajungând la valoarea de 0.602 mm, comparativ cu *îngroșarea semnificativă a marginilor răsfrânte ale piesei*, de 23.6%, grosimea maximă a acesteia ajungând la 0.803 mm;
- *influența subțierii produsă la piesele cu margini concave răsfrânte are o mărime apreciabilă*, grosimea minimă a piesei ajungând la 0.448 mm, ceea ce prezintă un potențial risc major de fisurare sau chiar rupere a marginilor piesei;
- nu există solicitări de compresiune în marginea răsfrântă, și deci, influența îngroșării marginilor răsfrânte ale piesei asupra tehnologicității piesei poate fi neglijată.

Capitolul 6. Cercetări privind răsfrângerea marginilor conturului exterior convex sau concav al pieselor din table metalice prin modelare statistică

6.1. Alegerea formei și a complexității modelelor

În cazul studiului proceselor de deformare plastică la rece, legătura dintre parametri și caracteristicile de proces se exprimă cu ajutorul unor relații de formă polinomială. În cazul de față programul experimental s-a desfășurat luându-se în considerare șase parametri:

- raza de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} , în mm;
- raza de racordare în plan vertical r_v , în mm;
- unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° , în grade;
- unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° , în grade;
- unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° , în grade;
- lățimea marginii răsfrânte l , în mm.

Datorită domeniilor largi de variație ale parametrilor considerați, se consideră a fi corespunzător utilizarea unor modele matematice de ordinul 2 cu interacțiuni alcătuite dintr-un număr de 48 de coeficienți.

6.2. Estimarea coeficienților modelelor

Determinarea coeficienților prin metoda celor mai mici pătrate, presupune rezolvarea sistemului de ecuații normale corespunzătoare formei modelelor propuse. Utilizând formele matriceale a sistemelor de ecuații normale aferente formei modelelor matematice considerate, au fost determinați coeficienții *modelelor cu variabile naturale* aferente pieselor cu marginile conturului exterior convex sau concav răsfrânte. În cazul pieselor cu marginile conturului exterior convex răsfrânte, aceștia sunt prezentați în Tabelul 6.1.

Tabelul 6.1

Coeficienții modelului cu variabile naturale

$b_0 = 0.28129377$	$b_{66} = 0.004627554$	$b_{36} = 0.000405759$	$b_{146} = 0.000271915$
$b_1 = -0.019794384$	$b_{12} = 0.001653903$	$b_{45} = -0.000534868$	$b_{156} = 0.000164534$
$b_2 = -0.032505167$	$b_{13} = 0.000409064$	$b_{46} = -0.006887872$	$b_{234} = -7.48E-05$
$b_3 = -0.0088978$	$b_{14} = -0.00104063$	$b_{56} = -0.006630418$	$b_{235} = -5.66E-05$
$b_4 = 0.005359221$	$b_{15} = 9.61E-05$	$b_{123} = -5.34E-05$	$b_{236} = -5.98E-05$
$b_5 = 0.000283628$	$b_{16} = -0.003674727$	$b_{124} = 0.000115531$	$b_{245} = 5.88E-05$
$b_6 = 0.048026495$	$b_{23} = 0.001531539$	$b_{125} = -3.48E-05$	$b_{246} = -2.95E-05$
$b_{11} = 0.000468213$	$b_{24} = 0.00186304$	$b_{126} = 0.000184949$	$b_{256} = 0.000785894$
$b_{22} = -0.002412187$	$b_{25} = -0.000792806$	$b_{134} = -7.98E-06$	$b_{345} = -3.65E-05$
$b_{33} = -8.07E-06$	$b_{26} = 0.000787298$	$b_{135} = -1.48E-05$	$b_{346} = 1.35E-05$
$b_{44} = -0.000276335$	$b_{34} = 0.000543806$	$b_{136} = -1.36E-05$	$b_{356} = -2.65E-05$
$b_{55} = -5.63E-05$	$b_{35} = 0.000681121$	$b_{145} = 5.57E-05$	$b_{456} = 0.000257912$

6.3. Analiza statistică a modelelor obținute

6.3.1. Verificarea adecvanței modelelor obținute

În scopul verificării adecvanței modelelor matematice determinate, s-au calculat următorii parametri statistici, Tabelul 6.2 și 6.3:

Tabelul 6.2

Verificarea adecvanței modelului în cazul răsfrângerii marginilor pieselor cu contur exterior convex

Dispersia	Valoarea
$SP_{rz} = \sum_{i=1}^n (y_u - \tilde{y}_u)^2$	0.006823
$f_{rz} = n - m - 1$	52
$PM_{rz} = SP_{rz}/n - m - 1 = s_{rz}^2$	0.000131217
$SP_{er} = (Y_0 - \tilde{Y}_0)^T \cdot (Y_0 - \tilde{Y})$	0.002760958
$f_{er} = n_0 - 1$	23
$PM_{er} = SP_{er}/f_{er} = s_{er}^2$	0.000120042
$SP_{in} = SP_{rz} - SP_{er}$	0.004062373
$f_{in} = f_{rz} - f_{er} = n - m - n_0$	29
$PM_{in} = SP_{in}/f_{in}$	0.000140082
$F_{ci} = PM_{in}/PM_{er}$	1.166943436
$F_T(f_{in}; f_{er}; 95\%)$	1.976923077

Tabelul 6.3

Verificarea adecvanței modelului în cazul răsfrângerii marginilor pieselor cu contur exterior concav

Dispersia	Valoarea
$SP_{rz} = \sum_{i=1}^n (y_u - \tilde{y}_u)^2$	0.0061426
$f_{rz} = n - m - 1$	52
$PM_{rz} = SP_{rz}/n - m - 1 = s_{rz}^2$	0.000131217
$SP_{er} = (Y_0 - \tilde{Y}_0)^T \cdot (Y_0 - \tilde{Y})$	0.000118128
$f_{er} = n_0 - 1$	23
$PM_{er} = SP_{er}/f_{er} = s_{er}^2$	0.000077650
$SP_{in} = SP_{rz} - SP_{er}$	0.004356715
$f_{in} = f_{rz} - f_{er} = n - m - n_0$	29
$PM_{in} = SP_{in}/f_{in}$	0.000150232
$F_{ci} = PM_{in}/PM_{er}$	1.934717991
$F_T(f_{in}; f_{er}; 95\%)$	1.976923077

Adecvanța modelelor este dată de raportul care reprezintă valoarea unei distribuții statistice Fischer. Aceasta se compară cu valoarea critică cunoscută a celei corespunzătoare numărului de grade de libertate, f_{in} , f_{er} și probabilității de 95% cu care este acceptată semnificația inadecvanței.

În concluzie se poate observa că modelele propuse sunt adecvate și pot reproduce corect legătura dintre parametri considerați și răspunsurile considerate.

6.3.2. Verificarea semnificației coeficienților

Pentru verificarea semnificației coeficienților modelelor determinate, acestea fiind adecvate, se determină pentru fiecare coeficient valoarea raportului F_{CS_i} , în care pătratul mediu al coeficienților PM_{b_i} , se calculează pentru fiecare coeficient în parte. Pentru modele adecvate, coeficientul testat este semnificativ și trebuie reținut dacă [D04]:

$$F_{CS} > F_T(1; f_{rz}; 95\%) = 4.023 \quad (6.1)$$

Din studiul datelor obținute, a rezultat că toți coeficienții modelelor determinate sunt puternic semnificativi, concluzie reflectată pe baza valorilor ridicate ale raportului F_{CS} .

6.3.3. Determinarea intervalelor de încredere 95% pentru coeficienții modelelor și pentru răspunsurile prezise de modele

Intervalele de încredere caracterizează precizia răspunsului prezis de modelul determinat pe baza dispersiei erorilor răspunsurilor măsurate. Acestea se calculează cu rel. (6.2) [D04]:

$$V(\hat{y}) = x^T \cdot (X^T X)^{-1} \cdot x \cdot s_{rz}^2 \quad (6.2)$$

- unde:
- $V(\hat{y})$ este dispersia răspunsurilor prezise de model;
 - s_{rz}^2 este pătratul mediu al rezidualelor PM_{rz} , sau pătratul mediu al erorii experimentale PM_{er} , după cum modelul determinat este adecvat sau inadecvat;
 - X este matricea valorilor naturale ale variabilelor de proces;
 - x este vectorul termenilor modelului;
 - x^T este transpusa vectorului termenilor modelului.

Distribuția Student ce intervine în relația cu care se determină intervalele de încredere 95% are valoarea $t_T(52; 95\%) = 2,0072$.

Se constată că majoritatea răspunsurilor măsurate se încadrează în intervalele de încredere 95% aferente răspunsurilor omoloage prezise, iar erorile de precizie a răspunsurilor măsurate, sunt destul de mici, majoritatea acestora având valori sub 10% în cazul pieselor cu marginile conturului exterior convex răsfrânte, Fig. 6.1, și sub 3% în cazul pieselor cu marginile conturului exterior concav răsfrânte, Fig. 6.2.

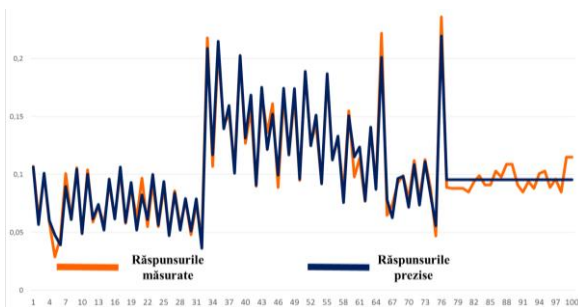


Fig. 6.1. Evidențierea erorilor prezise de modelul determinat pentru piese cu marginile conturului exterior convex răsfrânte

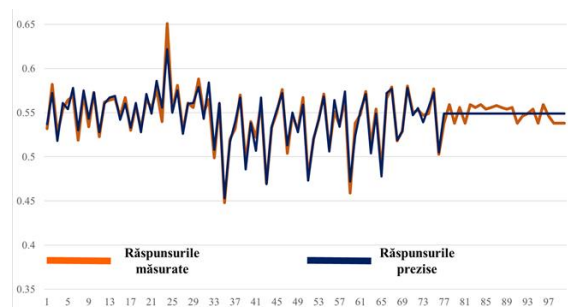


Fig. 6.2. Evidențierea erorilor prezise de modelul determinat pentru piese cu marginile conturului exterior concav răsfrânte

Capitolul 7. Cercetarea influenței parametrilor răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav asupra procesului de prelucrare

7.1. Reprezentarea grafică 2D și 3D a modelelor caracteristicilor procesului de răsfrângere

Prezentul capitol prezintă contribuții teoretice ale autorului, diseminate sintetic în cadrul [D07]. Deoarece toți coeficienții modelelor determinate au o influență foarte puternică asupra mărimilor prezise de acestea, formele generale ale modelelor determinate pentru răspunsurile de proces studiate sunt de gradul al doilea cu toate interacțiunile considerate, date de rel. (7.1) și (7.2) :

$$\begin{aligned}
y = & 0.28129377 - 0.019794384r_{s0} - 0.032505167r_v - 0.0088978 \alpha_{r0} + 0.005359221 \alpha_s + 0.000283628 \alpha_d \\
& + 0.048026495l + 0.000468213r_{s0}^2 - 0.002412187r_v^2 + -8.07e^{-6} \alpha_{r0}^2 + -0.000276335 \alpha_s^2 \\
& - 5.63e^{-5} \alpha_d^2 + 0.004627554l^2 + 0.001653903r_{s0}r_v + 0.000409064r_{s0} \alpha_{r0} - 0.00104063r_{s0} \alpha_s \\
& + 9.61e^{-5}r_{s0} \alpha_d - 0.003674727r_{s0}l + 0.001531539r_v \alpha_{r0} + 0.00186304r_v \alpha_s \\
& - 0.000792806r_v \alpha_d + 0.000787298r_vl + 0.000543806 \alpha_{r0} \alpha_s + 0.000681121 \alpha_{r0} \alpha_d \\
& + 0.000405759 \alpha_{r0} l - 0.000534868 \alpha_s \alpha_d - 0.006887872 \alpha_s l - 0.006630418 \alpha_d l \\
& - 5.34e^{-5}r_{s0}r_v \alpha_{r0} + 0.000115531r_{s0}r_v \alpha_s - 3.48e^{-5}r_{s0}r_v \alpha_d + 0.000184949r_{s0}r_vl \\
& - 7.98e^{-6}r_{s0} \alpha_{r0} \alpha_s - 1.48e^{-5}r_{s0} \alpha_{r0} \alpha_d - 1.36e^{-5} \alpha_{r0} l + 5.57e^{-5}r_{s0} \alpha_s \alpha_d + 0.000271915r_{s0} \alpha_s l \\
& + 0.000164534r_{s0} \alpha_d l - 7.48e^{-5}r_v \alpha_{r0} \alpha_s - 5.66e^{-5}r_v \alpha_{r0} \alpha_d - 5.98e^{-5}r_v \alpha_{r0} l + 5.88e^{-5}r_v \alpha_s \alpha_d \\
& - 2.95e^{-5}r_v \alpha_s l + 0.000785894r_v \alpha_d l - 3.65e^{-5} \alpha_{r0} \alpha_s \alpha_d + 1.35e^{-5} \alpha_{r0} \alpha_s l - 2.65e^{-5} \alpha_{r0} \alpha_d l \\
& + 0.000257912 \alpha_s \alpha_d l
\end{aligned} \tag{7.1}$$

$$\begin{aligned}
y = & 0.300984411 + 0.016606830 r_{s0} + 0.039160636 r_v + 0.000584447 \alpha_{r0} + 0.002735605 \alpha_s - 0.027617219 \alpha_d \\
& - 0.033452961 l - 0.000255803 r_{s0}^2 - 0.000194866 r_v^2 + 0.000000956 \alpha_{r0}^2 + 0.000067308 \alpha_s^2 \\
& - 0.000072692 \alpha_d^2 - 0.001286434 l^2 - 0.000677554 r_{s0}r_v - 0.000020013 r_{s0} \alpha_{r0} \\
& - 0.000147606 r_{s0} \alpha_s - 0.000323460 r_{s0} \alpha_d + 0.001763188 r_{s0}l - 0.000628189 r_v \alpha_{r0} \\
& + 0.002677515 r_v \alpha_s + 0.001881626 r_v \alpha_d - 0.010794844 r_vl + 0.000264110 \alpha_{r0} \alpha_s \\
& - 0.000241390 \alpha_{r0} \alpha_d + 0.000420432 \alpha_{r0} l + 0.003331836 \alpha_s \alpha_d - 0.007584001 \alpha_s l \\
& + 0.012452777 \alpha_d l + 0.000015337 r_{s0}r_v \alpha_{r0} - 0.000086640 r_{s0}r_v \alpha_s + 0.000113009 r_{s0}r_v \alpha_d \\
& + 0.000068180 r_{s0}r_vl - 0.000009374 r_{s0} \alpha_{r0} \alpha_s + 0.000011473 r_{s0} \alpha_{r0} \alpha_d - 0.000014182 \alpha_{r0} l \\
& + 0.000019588 r_{s0} \alpha_s \alpha_d + 0.000170178 r_{s0} \alpha_s l - 0.000223359 r_{s0} \alpha_d l \\
& - 0.000010494 r_v \alpha_{r0} \alpha_s + 0.000036203 r_v \alpha_{r0} \alpha_d + 0.000029439 r_v \alpha_{r0} l \\
& - 0.000697832 r_v \alpha_s \alpha_d + 0.000678055 r_v \alpha_s l - 0.000744531 r_v \alpha_d l - 0.000012823 \alpha_{r0} \alpha_s \alpha_d \\
& + 0.000018271 \alpha_{r0} \alpha_s l - 0.000030617 \alpha_{r0} \alpha_d l - 0.000124443 \alpha_s \alpha_d l
\end{aligned} \tag{7.2}$$

Prin studierea ecuației de regresie determinate pentru estimarea îngroșării marginilor pieselor supuse la procedeul de răsfrângere a marginilor conturului exterior \hat{I}_g , se pot face următoarele aprecieri:

- odată cu **creșterea valorii lățimii marginilor răsfrânte l** , Fig. 7.1, valoarea **îngroșării** materialului \hat{I}_g **crește**, lucru explicat prin mărirea aportului de material în exces care trebuie deformat și redistribuit;
- același fenomen de **creștere a grosimii marginii răsfrânte** se manifestă și la **micșorarea valorilor unghiurilor de înclinare dintre normala la suprafață și marginile răsfrânte din partea stângă α_s° și dreaptă a piesei α_d°** însă într-o măsură mai mică, Fig. 7.2 și 7.3;
- variația **razei de racordare în plan vertical r_v** , Fig. 7.4, **influențează defavorabil îngroșarea produsă odată cu creșterea valorii acestuia**;
- de asemenea, s-a constatat că odată cu **creșterea valorii razei de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal r_{s0}** , Fig. 7.5, **respectiv a unghiului din plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{r0}°** , Fig. 7.6, **valoarea îngroșării materialului \hat{I}_g scade**, fenomen explicat prin faptul că în aceste situații, volumul de material care necesită a fi deformat și redistribuit se micșorează.

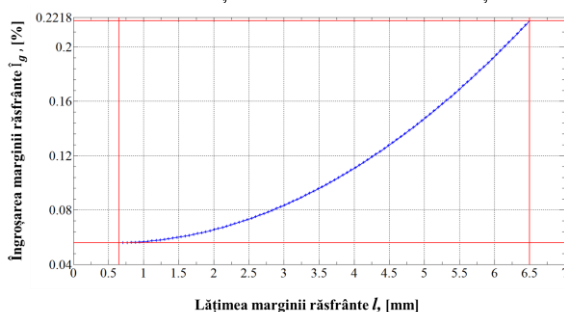


Fig. 7.1. Variația îngroșării marginilor răsfrânte ale pieselor \hat{I}_g [%] în funcție de valoarea lățimii marginii răsfrânte l [mm]

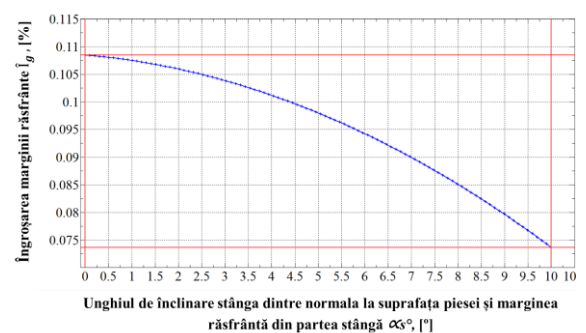


Fig. 7.2. Variația îngroșării marginilor răsfrânte ale pieselor \hat{I}_g [%] în funcție de valoarea unghiului de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° [°]

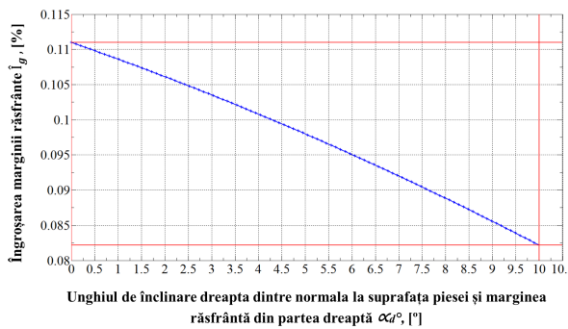


Fig. 7.3. Variația îngroșării marginilor răsfrânte ale pieselor \hat{I}_g [%] în funcție de valoarea unghiului de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° [°]

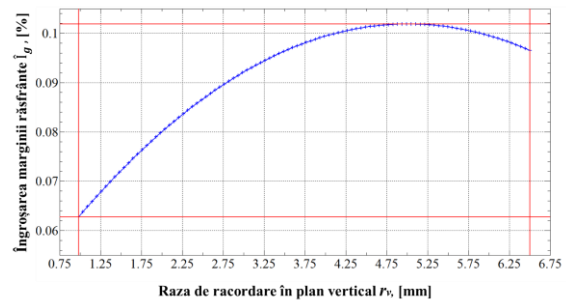


Fig. 7.4. Variația îngroșării marginilor răsfrânte ale pieselor \hat{I}_g [%] în funcție de valoarea razei de racordare în plan vertical r_v [mm]

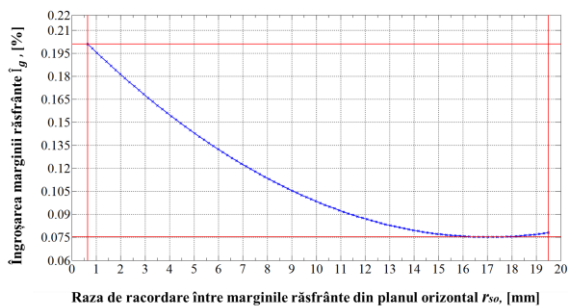


Fig. 7.5. Variația îngroșării marginilor răsfrânte ale pieselor \hat{I}_g [%] în funcție de valoarea razei de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} [mm]

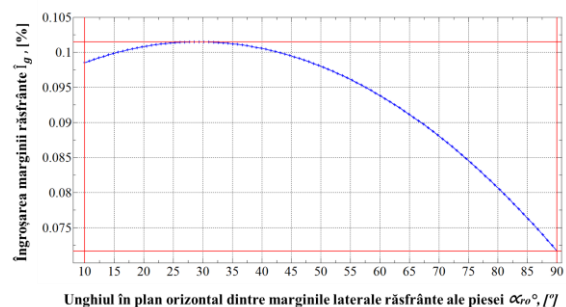


Fig. 7.6. Variația îngroșării marginilor răsfrânte ale pieselor \hat{I}_g [%] în funcție de valoarea unghiului în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° [°]

Din examinarea graficelor 3D prezentate în Fig. 7.7. - 7.11, se poate observa forma suprafețelor de răspuns corespunzătoare caracteristicilor de proces studiate cu ajutorul modelului determinat, prin intermediul căruia s-a aproximat foarte bine dependențele și influențele dintre parametri considerați și mărimea analizată.

S-au constatat următoarele:

- prin creșterea valorii parametrului razei de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} , Fig. 7.7, valoarea îngroșării \hat{I}_g scade;
- lățimea marginii răsfrânte l , Fig. 7.11, are o influență mare asupra îngroșării care apare în marginile răsfrânte, prin faptul că este principalul parametru geometric care influențează în mod direct aportul de volum de material care trebuie deformat și redistribuit;
- referitor la parametrul raza de racordare în plan vertical r_v , din Fig. 7.7 și 7.8, se observă că influența acestuia asupra îngroșării \hat{I}_g , este una defavorabilă odată cu creșterea valorii acestuia;
- referitor la parametrul unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° , din analiza Fig. 7.8 și 7.10, s-a observat că influența acestuia este una favorabilă diminuării îngroșării pe măsură ce acesta ia valori spre limita superioară a intervalului de variație studiat, respectiv, 90° ;
- unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° și unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° , Fig. 7.9 - 7.11, au o influență similară, respectiv, o diminuare a îngroșării produse dacă valorile acestora tind către limita superioară a intervalelor studiate;

În cazul pieselor cu marginile conturului exterior concave răsfrânte, din studiul graficelor 2D și 3D, s-au putut face următoarele aprecieri:

- odată cu creșterea valorii razei de racordare între marginile răsfrânte în plan orizontal r_{so} panta curbei de variație a grosimii marginilor răsfrânte ale piesei crește, Fig. 7.7,
- influența unghiului din planul orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° , Fig. 7.8, asupra grosimii marginii răsfrânte se diminuează pe măsură ce acesta tinde către limita superioară a intervalului de variație studiat,
- raza de racordare în plan vertical r_v , Fig. 7.8, are o influență pozitivă asupra grosimii marginilor răsfrânte ale pieselor odată cu creșterea valorii acestuia,
- din analiza Fig. 7.9 - 7.12, s-a observat că unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° și, respectiv, din partea dreaptă α_d° , au influențe similare, respectiv, obținerea unei valori ridicate a grosimii în marginile răsfrânte ale piesei, dacă valorile acestora tind către limita superioară a intervalelor studiate,
- o valoare ridicată a lățimii marginii răsfrânte l înseamnă un volum mare de material care trebuie redistribuit, și deci o probabilitate mare de apariție a unei îngroșări excesive a marginilor răsfrânte ale piesei, Fig. 7.11 și 7.12.

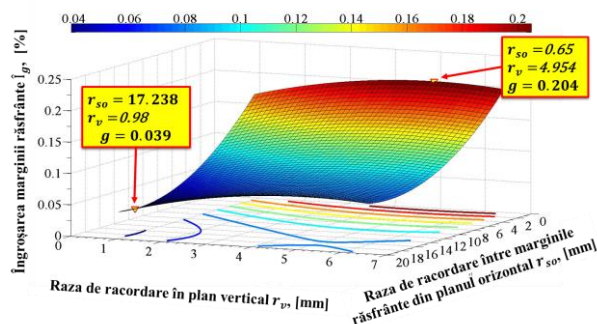


Fig. 7.7. Dependența îngroșării marginii răsfrânte \hat{I}_g [%] în funcție de raza de racordare dintre marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} [mm] și raza de racordare în plan vertical r_v [mm]

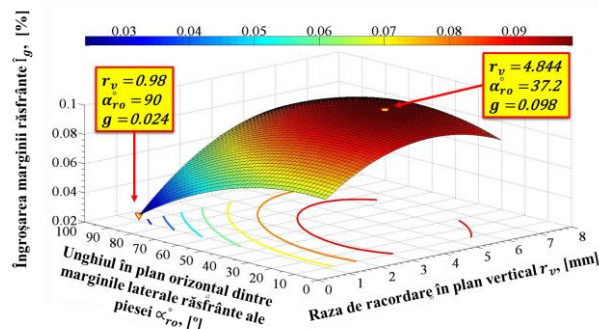


Fig. 7.8. Dependența îngroșării marginii răsfrânte \hat{I}_g [%] în funcție de raza de racordare în plan vertical r_v [mm] și unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° [°]

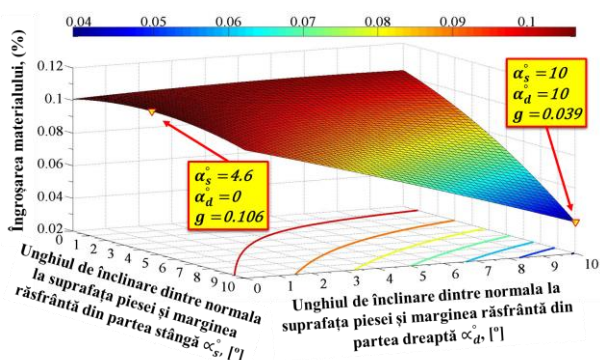


Fig. 7.9. Dependența îngroșării marginii răsfrânte \hat{I}_g [%] în funcție de unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° [°] și unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă, α_d° [°]

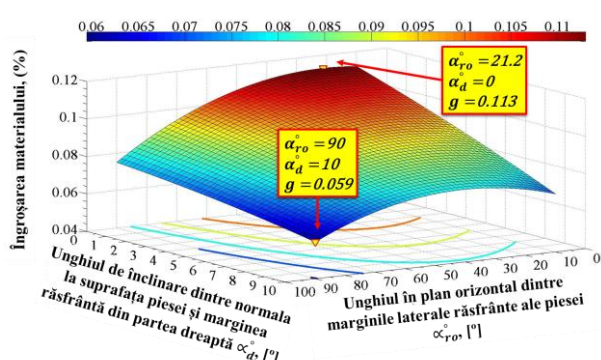


Fig. 7.10. Dependența îngroșării marginii răsfrânte \hat{I}_g [%] în funcție de unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° [°] și unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° [°]

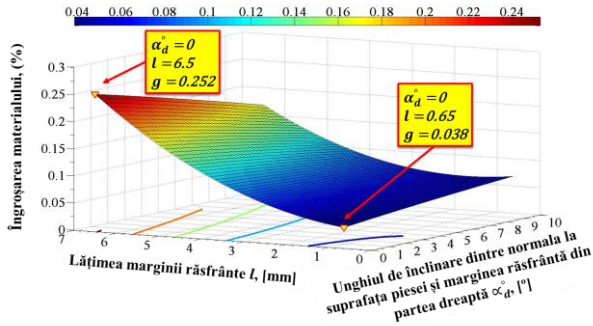


Fig. 7.11. Dependența îngroșării marginii răsfrânte \hat{I}_g [%] în funcție de unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d [°] și lățimea marginii răsfrânte l [mm]

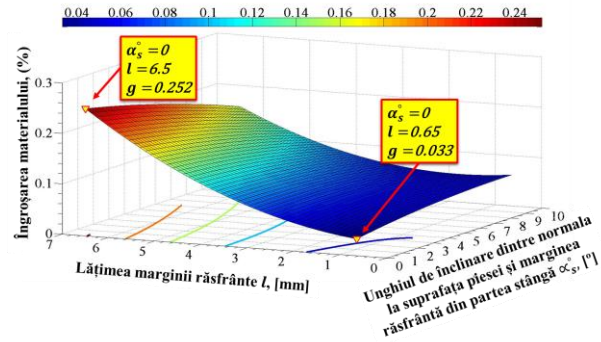


Fig. 7.12. Dependența îngroșării marginii răsfrânte \hat{I}_g [%] în funcție de unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s [°] și lățimea marginii răsfrânte l [mm]

În cazul pieselor cu marginile conturului exterior concave răsfrânte, din studiul graficelor 2D și 3D, s-au putut face următoarele aprecieri:

- odată cu **creșterea valorii razei de racordare între marginile răsfrânte în plan orizontal r_{so}** , panta curbei de variație a **grosimii marginilor răsfrânte ale piesei crește**, Fig. 7.13,
- influența **unghiului din planul orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}** , Fig. 7.13, asupra grosimii marginii răsfrânte, **se diminuează pe măsură ce acesta tinde către limita superioară** a intervalului de variație studiat,
- **raza de racordare în plan vertical r_v** , Fig. 7.14, **are o influență pozitivă asupra grosimii** marginilor răsfrânte ale pieselor odată cu creșterea valorii acestuia,
- din analiza Fig. 7.14 - 7.16, s-a observat că **unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s , și respectiv, din partea dreaptă α_d** , au influențe similare, respectiv, obținerea unei **valori ridicate a grosimii** în marginile răsfrânte ale piesei, **dacă valorile acestora tind către limita superioară a intervalelor studiate**,
- o **valoare ridicată a lățimii marginii răsfrânte l** , înseamnă un volum mare de material care trebuie redistribuit, și deci, o probabilitate mare de **aparitie a unei subțiri excesive** în zona de racordare dintre marginile răsfrânte a piesei, Fig. 7.16.

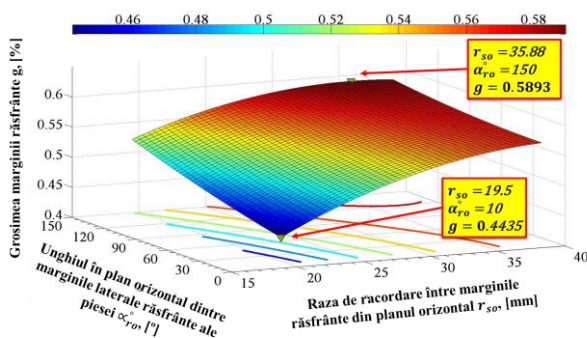


Fig. 7.13. Variația grosimii marginilor răsfrânte g [mm] în funcție de raza de racordare dintre marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} [mm] unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro} [°]

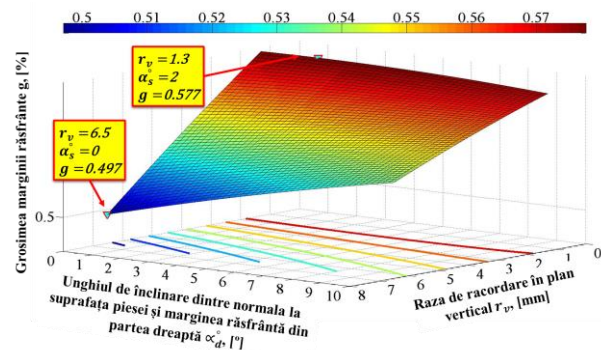


Fig. 7.14. Variația grosimii marginilor răsfrânte g [mm] în funcție de raza de racordare în plan vertical r_v [mm] și unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d [°]

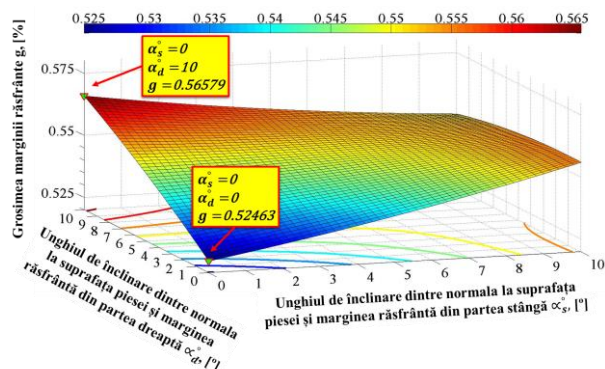


Fig. 7.15. Variația grosimii marginilor răsfrânte g [mm] în funcție de unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° [°] și unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° [°]

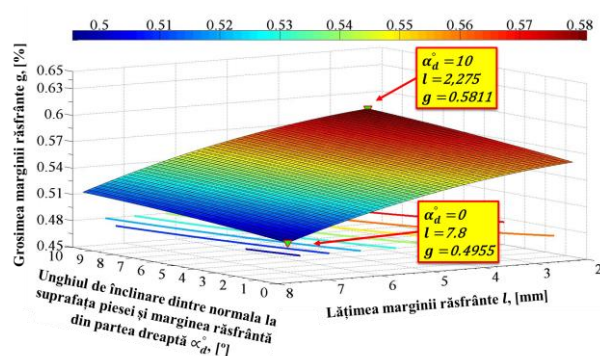


Fig. 7.16. Variația grosimii marginilor răsfrânte g [mm] în funcție de unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° [°] și lățimea marginii răsfrânte l [mm]

7.2. Valori optime ale parametrilor răsfrângerii marginilor pieselor cu contur exterior convex sau concav

Cu datele obținute cu ajutorul modelelor matematice determinate și a observațiilor făcute în urma analizei reprezentărilor 2D și 3D ale acestor modele, s-au determinat valori optime ale caracteristicilor geometrice studiate pentru diverse cazuri de lucru impuse, Tabelele 7.1 și 7.2.

Tabelul 7.1

Caracteristici geometrice ale pieselor cu contur convex cu margini răsfrânte pentru grosime de 0.65 mm și îngroșare maximă admisibilă de 1%

Caracteristica geometrică a piesei						Îngroșarea estimată a marginii răsfrânte, \hat{g} [%]	Grosimea marginii răsfrânte, g [mm]	Caracteristica geometrică a piesei						Îngroșarea estimată a marginii răsfrânte, \hat{g} [%]	Grosimea marginii răsfrânte, g [mm]
r_{so} [mm]	r_v [mm]	α_{ro}° [°]	α_s° [°]	α_d° [°]	l [mm]			r_{so} [mm]	r_v [mm]	α_{ro}° [°]	α_s° [°]	α_d° [°]	l [mm]		
8	2	60	8	8	5	0,093	0,590	11,8	2	60	8	8	5	0,070	0,604
8,2	2	60	8	8	5	0,091	0,591	12	2	60	8	8	5	0,069	0,605
8,4	2	60	8	8	5	0,090	0,592	12,2	2	60	8	8	5	0,069	0,605
8,6	2	60	8	8	5	0,088	0,593	12,4	2	60	8	8	5	0,068	0,606
8,8	2	60	8	8	5	0,087	0,594	12,6	2	60	8	8	5	0,067	0,606
9	2	60	8	8	5	0,085	0,594	12,8	2	60	8	8	5	0,067	0,607
9,2	2	60	8	8	5	0,084	0,595	13	2	60	8	8	5	0,066	0,607
9,4	2	60	8	8	5	0,083	0,596	13,2	2	60	8	8	5	0,065	0,607
9,6	2	60	8	8	5	0,082	0,597	13,4	2	60	8	8	5	0,065	0,608
9,8	2	60	8	8	5	0,080	0,598	13,6	2	60	8	8	5	0,064	0,608
10	2	60	8	8	5	0,079	0,599	13,8	2	60	8	8	5	0,064	0,608
10,2	2	60	8	8	5	0,078	0,599	14	2	60	8	8	5	0,064	0,609
10,4	2	60	8	8	5	0,077	0,600	14,2	2	60	8	8	5	0,063	0,609
10,6	2	60	8	8	5	0,076	0,601	14,4	2	60	8	8	5	0,063	0,609
10,8	2	60	8	8	5	0,075	0,601	14,6	2	60	8	8	5	0,062	0,609
11	2	60	8	8	5	0,074	0,602	14,8	2	60	8	8	5	0,062	0,610
11,2	2	60	8	8	5	0,073	0,603	15	2	60	8	8	5	0,062	0,610
11,4	2	60	8	8	5	0,072	0,603	15,2	2	60	8	8	5	0,062	0,610
11,6	2	60	8	8	5	0,071	0,604	15,4	2	60	8	8	5	0,062	0,610
19,5	2	10	8	8	7	22,9	24	0,501	19,5	2	10	8	8	7	22,9
19,5	2	20	8	8	7	22,3	24	0,505	19,5	2	20	8	8	7	22,3
19,5	2	30	8	8	7	21,6	24	0,509	19,5	2	30	8	8	7	21,6
19,5	2	40	8	8	7	21,0	24	0,513	19,5	2	40	8	8	7	21,0
19,5	2	50	8	8	7	20,3	24	0,518	19,5	2	50	8	8	7	20,3
19,5	2	60	8	8	7	19,6	24	0,522	19,5	2	60	8	8	7	19,6
19,5	2	70	8	8	7	18,8	24	0,527	19,5	2	70	8	8	7	18,8
19,5	2	80	8	8	7	18,0	24	0,532	19,5	2	80	8	8	7	18,0
19,5	2	90	8	8	7	17,2	24	0,538	19,5	2	90	8	8	7	17,2
19,5	2	100	8	8	7	16,4	24	0,543	19,5	2	100	8	8	7	16,4
19,5	2	110	8	8	7	15,5	24	0,549	19,5	2	110	8	8	7	15,5

7.3. Concluzii privind influența parametrilor răsfrângerii marginilor conturului exterior convex sau concav asupra caracteristicilor de proces

Astfel, conform datelor sintetizate în Tabelul 7.3 și 7.4, s-a constatat că pentru a obține o valoare acceptabilă a îngroșării sau grosimii marginilor răsfrânte, este necesar ca **parametrii**:

- raza de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} ,
- unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° ,
- unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° ,
- unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d°

să aibe valori către limitele superioare ale intervalelor de variație studiate.

De asemenea, este necesar ca **parametrii** :

- raza de racordare în plan vertical r_v ,
- lățimea marginii răsfrânte l

să aibe valori către limitele inferioare ale intervalelor de variație studiate.

Observațiile remarcate sunt prezentate sintetic în Tabelele 7.3 și 7.4.

Tabelul 7.3

Influență caracteristicilor geometrice ale piesei asupra îngroșării marginilor exterioare răsfrânte ale pieselor cu contur convex

Caracteristica geometrică	Modul de variație	Efectul asupra Îngroșării \hat{I}_g , [%]
Raza de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} [mm]	↗	↘
Raza de racordare în plan vertical r_v [mm]	↗	↗
Unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° [°]	↗	↘
Unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° [°]	↗	↘
Unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° [°]	↗	↘
Lățimea marginii răsfrânte l [mm]	↗	↗

Tabelul 7.4

Influență caracteristicilor geometrice ale piesei asupra îngroșării marginilor exterioare răsfrânte ale pieselor cu contur concav

Caracteristica geometrică	Modul de variație	Valoarea grosimea marginii răsfrânte g , [mm]
Raza de racordare între marginile răsfrânte din planul orizontal r_{so} [mm]	↗	↗
Raza de racordare în plan vertical r_v [mm]	↗	↘
Unghiul în plan orizontal dintre marginile laterale răsfrânte ale piesei α_{ro}° [°]	↗	↗
Unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea stângă α_s° [°]	↗	↗
Unghiul de înclinare dintre normala la suprafața piesei și marginea răsfrântă din partea dreaptă α_d° [°]	↗	↗
Lățimea marginii răsfrânte l , [mm]	↗	↘

Capitolul 8. Concluzii finale și contribuții principale la optimizarea proceselor de deformare plastică la rece cu ajutorul simulării numerice

- (1) Din analiza stadiului actual al cercetărilor privind prelucrarea pieselor cu margini răsfrânte din table metalice, s-au desprins concluzii importante, care sunt prezentate în capitolul 3.
- (2) Având în vedere datele și concluziile din analiza stadiului actual al cercetărilor privind prelucrarea pieselor cu margini răsfrânte din table metalice, s-au considerat a fi de perspectivă următoarele direcții de cercetare-dezvoltare: aprofundarea teoretico-experimentală a proiectării și prelucrării zonelor pieselor cu margini răsfrânte, inclusiv în construcția caroseriilor de automobile; aplicarea pe scară largă a simulării numerice și modelării statistice, prin studii de caz, pentru determinarea influenței caracteristicilor de material și geometrice ale pieselor din table metalice asupra tehnologicității acestora, inclusiv în legătură cu prelucrarea de margini răsfrânte; realizarea de baze de date cu produse/ piese care includ zone cu margini răsfrânte, utilizabile în procese de proiectare și fabricare a produselor; dezvoltarea de echipamente modulate pentru prelucrarea de margini răsfrânte în sisteme tehnologice de fabricare prin deformare plastică.
- (3) În raport cu stadiul actual și direcțiile de cercetare-dezvoltare privind optimizarea unor caracteristici constructive ale pieselor realizate prin deformare plastică la rece, s-a asumat ca obiectiv principal al activității de cercetare-dezvoltare avansate în cadrul doctoratului (v. și § 4.2): **cercetarea prin simulare numerică și modelare statistică a caracteristicilor marginilor răsfrânte ale pieselor din table metalice prelucrabile prin deformare plastică la rece.**
- (4) La realizarea obiectivului principal al activității doctorale de cercetare-dezvoltare, prezenta teză de doctorat aduce o serie de contribuții, dintre care cele mai importante sunt după cum urmează.
 - Evaluarea stadiului cercetărilor privind performanțele atinse în proiectarea și fabricarea pieselor din table metalice cu margini răsfrânte obținute prin deformare plastică la rece.
 - Definierea obiectivului principal și a etapelor metodologice de cercetare-dezvoltare privind optimizarea caracteristicilor constructive și tehnologice ale pieselor din table metalice cu margini răsfrânte realizabile prin deformare plastică la rece.
 - Aplicarea simulării numerice cu elemente finite (MEF) și a curbelor limită de deformare (CLD), respectiv, a software-ului AutoForm, utilizat de institutele de cercetare și marile întreprinderi producătoare de autoturisme din lume, la cercetarea procesului de deformare plastică la rece a tablelor metalice, care a făcut posibilă realizarea în condiții economice a cercetării ample prezentate în teza de doctorat.
 - Evidențierea caracterului aleator al valorilor caracteristicilor răsfrângerii marginilor în cadrul definirii punctelor centrale ale programului de simulare, fiind astfel posibile determinarea erorii de simulare și, corespunzător, analiza statistică a rezultatelor.
 - Determinarea modelelor matematice polinomiale de ordinul doi cu interacțiuni ale îngroșării marginilor răsfrânte ale conturului exterior convex și a subțierii grosimii marginilor răsfrânte ale conturului exterior concav, în funcție de șase parametri ai procesului, pe baza datelor obținute prin simularea numerică a procesului și analiza statistică a lor prin metoda suprafețelor de răspuns.

- Determinarea valorilor optime ale caracteristicilor de îngroșare și, respectiv, de subțiere ale marginilor răsfrânte, pentru condiții date, pe baza modelelor matematice obținute.
- Dezvoltarea unei metode de optimizare a cercetării prin aplicarea simulării numerice cu MEF, a curbelor limită de deformare și a modelării statistice în domeniul proceselor de prelucrare prin deformare plastică la rece.

* * *

Importanța științifică a prezentei teze de doctorat este susținută de contribuțiile aduse la dezvoltarea unor modele de optimizare a caracteristicilor constructive ale pieselor cu marginile exterioare convexe sau concave răsfrânte.

Importanța practică a prezentei teze de doctorat rezidă în aceea că modelele și studiile de caz realizate reprezintă un sistem - suport util specialiștilor din domeniul prelucrărilor prin deformare plastică la rece.

Problematika produselor care includ zone funcționale complexe reclamă o activitate de cercetare - dezvoltare constructivă și tehnologica continuă, în raport cu evoluția produselor și a condițiilor industriale de producție.

BIBLIOGRAFIE

- [D01] Drăgănescu Fl., Gheorghe M., **Drăghici C.**, *Influence of process parameters on surface roughness at face milling of an aluminum - silicon alloy*, Int'l Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT 2003) 8 - 11 July, 2003, Dublin City University, vol. II, pp. 1658 - 1661, 2003
- [D02] Drăgănescu Fl., Drăgănescu B., **Drăghici C.**, *Punching a statistical model of maximum force and medium force's coefficient*, TCM 50 Years Evolution Present and Beyond 1954 - 2004, Production Engineering Department Jubilee, University „Lucian Blaga” of Sibiu, October 7 - 8, pp.147 - 152, 2004
- [D03] Drăgănescu Fl., Carp-Ciocârdia D., Gheorghe M., *Modelarea matematică a proceselor de prelucrare prin presare la rece cu ajutorul metodei suprafețelor de răspuns, partea I și a II-a*, A III-a Conf. Națională de Tehnologii și Utilaje pentru Prelucrarea Materialelor prin Deformare Plastică la Rece, Institutul Politehnic „Traian Vuia” Timișoara. 16-17 Mai 1991
- [D04] Drăgănescu Fl., *Îndrumar pentru întocmirea proiectelor de an la Tehnologia și utilajul prelucrărilor prin deformare plastică la rece și Ștanțare și matrițare la rece*, Plan local IPB, 1971
- [D05] **Drăghici C.**, Mihăilă F. - *Feasibility analysis of flanged holes with support of numerical simulation*, Third International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2015, 10-11 December, Int'l J. of Advancements in Mechanical and Aeronautical Engineering, vol. 3 issue 1, ISBN: 978-1-63248-080-4, ISSN 2372-4153, doi: 10.15224/ 978-1-63248-080-4-116, Page(s): 84 - 88
- [D06] **Drăghici C.**, *Statistical modelling of the spring back behavior for bending of V-shaped parts from common sheet metal*, Int'l Conference on Structural, Mechanical and Material Engineering (ICSMME 2015), Advances in Engineering Research, vol. 19, ISBN (on-line): 978-94-6252-144-5, ISSN 2352-5401, doi:10.2991/icsmme-15.2015.25
- [D07] **Drăghici C.**, Feasibility analysis of shrink flanging process with support of numerical simulation, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 79, Iss. 1, 2017, https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez846_703380.pdf, ISSN 1454-2358, pp. 127-138
- [H01] Hernández R., Llobet A., Gomez X. and Riera M.D., *FLSD as a good choice in sheet forming of AHSS* - "2011 SIMULIA Customer Conference", Barcelona: Dassault Systèmes, 2011, p. 238-246
- [I02] Ivana Suchy, *Handbook of die design, Second Edition*, McGraw-Hill, ISBN 0-07-146271-6
- [J01] Ji You Yoon, *Evaluation of formability and determination of flow stress curve of sheet materials with dome test*, Thesis, The Ohio State University, 2012
- [J02] Jong-Yop Kim, Naksoo Kim, Man-Sung Huh, *Optimum blank design of an automobile sub-frame*, J. of Materials Processing Technology 101 (2000), pp. 31-43
- [M03] Miklós Tisza and Zsolt Lukács, *Computer aided process planning and die design in simulation environment in sheet metal forming* - Numisheet 2014: The 9th Int'l Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (American Institute of Physics), pp. 1002 - 1007
- [P04] Peter Kováč, Viktor Tittel, Jozef Bilika, *Influence of variable blank holder force on rectangular box drawing*, J. of Material Science and Technology, Vol.21 No.6, 2005, pp 909 - 913
- [P05] Pop Alin Florin, *Cercetări și contribuții privind proiectarea asistată de calculator a tehnologiilor de ambutisare*, Teză de doctorat, Universitatea din Oradea, 2014
- [R01] Romanovski V.P., *Ștanțarea și matrițarea la rece (trad. din limba rusă)*, ET, București, 1970

- [R02] Reddy Venkat R., Reddy Janardhan T.A., Reddy G.C.M., *Optimization of blank holder force to control wrinkling and fracture of cylindrical cups in deep drawing*, Int'l J. of Engineering Trends and Technology- Volume3Issue5- 2012, pp. 669 – 676, ISSN: 2231-5381
<http://www.ijettjournal.org/volume-3/issue-5/IJETT-V3I5P220.pdf> (accesat la 18.06.2017)
- [R03] Rumsiski L. Z., *Prelucrarea matematică a datelor experimentale*, Îndrumar, ET, București, 1974
- [S01] Shigeki A., Ryutaro H., Yuki M., Yasuhiro S., Hiroki K., Fusahito Y., *Optimum draw-beads design for stepped-shape beam forming to suppress wrinkle and torsional springback*, 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, June 13 - 17, 2011, Shizuoka, Japan
- [S02] Simunovic S., Shaw J., and Aramayo G., *Steel Processing Effects on Impact Deformation of UltraLight Steel Auto Body*, SAE Technical Paper 2001-01-1056, 2001, doi:10.4271/2001-01-1056
- [S03] Sindilă Gh., *Tehnologii de fabricare prin presare la rece*, Editura BREN, București, 2001.
- [S04] Sindilă Gh., *Prelucrări prin deformare plastică la rece*, Editura BREN, București 2009, ISBN 978-973-648-871-9
- [S06] Spiridonescu Cornelia, Paunoiu V., Epureanu A., Nicoara D., *The response surface method applied to deep drawing with combined restraint*, The annals of “DUNĂREA DE JOS” University of GALAȚI, fascicle V, Technologies in machine building, ISSN 1221- 4566, 2010, PP. 145-149
- [S07] Spiridonescu Cornelia, *Cercetări privind parametrii și eficiența unui proces de ambutisare adâncă*, Teză de doctorat, Universitatea Dunărea de Jos din Galați, Septembrie 2010
- [S08] Sriram S., Chintamani J., *Guidelines for stretch flanging advanced high strength steels*, Volume A, Numisheet August 2005, Detroit, Michigan (USA), AIP Conf. Proc. 778, 681 (2005); <http://dx.doi.org/10.1063/1.2011301>, pp 681 – 686
- [S09] Surajit Kumar Paul, *Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams*, J. of Strain Analysis for Engineering Design, pp. 177 – 188, April 2013, DOI: 10.1177/0309324712468524
- [S10] Surya Prakash, Dinesh Kumar, *Investigation and analysis for the wrinkling behavior of deep drawn die sheet metal component by using fast form*, Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, YMCA University of Science & Technology, Faridabad, Haryana, Oct 19-20, 2012, -536 - 543
- [T01] Tahir Altinbalik, Aysun Tonka, *Numerical and experimental study of sheet thickness variation in deep drawing processes*, Int'l J. of Modern Manufacturing Technologies, ISSN 2067–3604, Vol. IV, No. 2 / 2012, pp. 9 - 16
- [V01] Vasco Manuel Neto Simões, *Analysis of the influence of process parameters in the deep drawing of a cylindrical cup*, Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, July 2012
- [V03] Vitthal A. L., Kiran D. K., *Modelling and failure analysis in sheet metal forming process using CAE*, Int'l J. of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Vol. 3 Issue 7, July - 2014
- [V05] Volk M., Nardin B., Dolšak B., *Determining the optimal area dependent blank holder forces in deep drawing using the response surface method*, Advances in Production Engineering & Management, Volume 9 | Number 2 | June 2014 | pp 71–82