

## REZUMAT

În ultimii ani, în întreaga lume se dorește creșterea gradului de flexibilitate a proceselor de deformare plastică. Acest lucru este posibil prin creșterea flexibilității sculelor de deformare. Se dorește acest lucru atât în cazul procedeelor de deformare volumică cât și în cazul procedeelor de deformare a tablelor. Dintre procedeele noi apărute pentru deformarea tablelor, procedeul de deformare incrementală într-un punct reprezintă o metodă modernă de deformare plastică, cu un potențial enorm în ceea ce privește gradul de personalizare a pieselor obținute prin acest procedeu.

În producția de serie mică sau de unicat a pieselor din tablă, costurile specifice deosebit de ridicate ale matrițelor și preselor își pun amprenta în mod negativ pe dezvoltarea acestor tehnologii. Din această cauză, deoarece există evident o direcție spre individualizare a produselor, se impune pe viitor creșterea flexibilității și în acest domeniu.

Datorită simplității cinematicii procedeului de deformare incrementală, matrița poate fi montată pe diverse mașini (freze cu comandă numerică, mașini de găurit în coordonate, roboți antropomorfi etc.) sau pe o presă prevăzută cu o masă deplasabilă în coordonate. Forma finală a piesei nu se obține prin copierea conturului uneia dintre scule ca la ambutisare, ci printr-o succesiune de apăsări repetate ale unor scule cu geometrie simplă asupra piesei. Apăsarea este repetată incremental pe întreaga suprafață a semifabricatului, pe traiectoria dorită, suprafața piesei obținându-se ca înfășurătoare a pozițiilor succesive ale poansonului. Pentru realizarea formei dorite poansonul are o mișcare de avans axial, perpendicular pe direcția tablei, continuu sau în trepte, iar placa activă o mișcare în plan. Procedeul prezintă o flexibilitate ridicată deoarece cu același poanson și aceeași placă activă dar cu traiectorii de deplasare incrementale diferite se pot obține o multitudine de forme cave.

De-a lungul timpului domeniile de aplicare ale deformării incrementale s-au extins dincolo de ideile inițiale, acelea de a realiza nervuri pe piesele de tablă ambutisate anterior și includ domenii precum implanturi medicale, prototipare de produs, arhitectură, industria auto, echipamente de deformare, industria aerospațială și de transport etc.

Structura tezei de abilitare a fost concepută astfel încât să cuprindă elementele esențiale ale unei astfel de teze, și anume: conține principalele contribuții științifice

ale autorului ei în perioada scursă de la obținerea titlului de doctor în științe inginerești, un capitol dedicat dezvoltării carierei și a propunerilor de dezvoltare ulterioară, rezumatul în limbile română și engleză și bibliografia. Principalele contribuții științifice sunt defalcate după cum urmează: stadiul actual în domeniu în perioada 2005-2016, studiul variației forțelor și stabilirea influenței principalilor factori din proces, analiza variației deformațiilor principale și a subțierii relative, studiul preciziei geometrice, a revenirii elastice și a rugozității în cadrul procedeului de deformare incrementală, simularea numerică folosind metoda elementului finit, identificarea principalelor aplicații ale procedeului de deformare incrementală (în special în domeniul medical) și nu în ultimul rând găsirea unei metode bazate pe analiza inversă care să ajute la identificarea coeficienților de material ce urmează a fi introduși în programele de simulare numerică.

Teza de abilitare debutează cu un capitol introductiv care prezintă principalele avantaje și dezavantaje ale procedeului de deformare incrementală dar și domeniile de utilizare ale acestui procedeu.

Capitolul dedicat principalelor contribuții științifice ale autorului debutează cu un subcapitol care tratează cercetările care au avut loc în domeniul tezei de abilitare din anul 2005 (anul susținerii tezei de doctorat) și până astăzi. Pentru început este prezentat stadiul actual în ceea ce privește calculul forțelor în procesul de deformare incrementală respectiv modelele matematice existente care aproximează calculul forțelor. Sunt prezentate și cercetări care au ca scop validarea acestor modele teoretice prin cercetări experimentale. O altă direcție din subcapitolul dedicat stadiului actual se referă la îmbunătățirea preciziei pieselor obținute prin deformare incrementală. Sunt evidențiate principalele echipamente folosite la deformarea incrementală (mașini unelte cu comandă numerică, roboți industriali) și este studiată influența acestora asupra preciziei pieselor obținute. Se ajunge la concluzia că mașinile de frezat sunt mai rigide decât roboții industriali, și, prin urmare, piesele fabricate pe mașini de frezat sunt mai precise. Sunt prezentate câteva strategii on-line și off-line pentru îmbunătățirea preciziei pieselor. Este prezentată metoda care utilizează curbe de regresie multivariate adaptive pentru anticiparea suprafeței formate prin deformare incrementală. Sunt de asemenea prezentate tehnici de optimizare topologică a traiectoriei poansonului. Un alt subcapitol prezintă cercetările numerice și experimentale care au avut ca temă distribuția grosimii (sau a subțierii relative) la piesele obținute prin acest procedeu. O atenție aparte a fost acordată tehnicilor de simulare numerică prin metoda elementului finit. Sunt clasificate analizele după tipul de element folosit: bi-dimensional sau de tip solid. De asemenea sunt prezentate modelele de materiale utilizate, algoritmi și metodele de simulare utilizate și tehnicile de optimizare utilizate pentru simulare. Au fost prezentate atât studii realizate cu programe comerciale (Abaqus, Ls-Dyna) cât și cu coduri de

programe destinate special simulării proceselor de deformare plastică de diferite instituții de cercetare. În ceea ce privește algoritmi și metodele de simulare au fost prezentate atât schemele de integrare explicite cât și cele implicite. O atenție deosebită este acordată materializării contactului dintre poanson și semifabricat. În ceea ce privește tehnicile de optimizare în domeniul simulării procedeului de deformare incrementală sunt prezentate strategiile de discretizare și strategiile adaptive de rediscretizare. Sunt subliniate avantajele și dezavantajele fiecărei strategii mai ales din prisma timpului consumat în analiză. La finalul acestui subcapitol este realizat un studiu succint privind aplicațiile procedeului de deformare incrementală, în special aplicațiile în domeniul medical, domeniu care s-a dezvoltat mult în ultimii 10 ani. Ultimul subcapitol este destinat posibilelor direcții ulterioare de cercetare.

Al doilea subcapitol din capitolul destinat principalelor contribuții științifice ale autorului este destinat cercetărilor personale în domeniul determinării forțelor din procesul de deformare incrementală. O primă direcție a urmărit determinarea valorilor maxime ale forțelor pe două direcții (una verticală și una orizontală) și determinarea influenței diametrului poansonului, a grosimii inițiale a semifabricatului și a înălțimii maxime a piesei. Forma elementului realizat prin deformare incrementală a fost de tip nervură, fapt pentru care piesele au fost realizate cu un singur pas pe direcție verticală. Pentru realizarea experimentelor a fost utilizată o freză universală iar măsurarea forțelor pe două direcții s-a realizat cu ajutorul unei mese dinamometrice. Achiziția semnalului electric s-a realizat prin intermediul unui instrument virtual realizat în programul TestPoint. Semifabricatele au constatat din semifabricate individuale de formă pătrată din oțel pentru ambutisare DC03. Concluzia l-a care s-a ajuns a fost: atât forța pe direcție verticală cât și forța pe direcție orizontală cresc odată cu creșterea grosimii inițiale a semifabricatului, înălțimea piesei deformate influențează și ea atât forța pe direcție verticală cât și forța pe direcție orizontală, în sensul creșterii lor odată cu creșterea acesteia. Diametrul poansonului influențează forța pe direcție verticală în sensul creșterii forței odată cu creșterea diametrului poansonului iar forța pe direcție orizontală scade puțin odată cu creșterea diametrului. În continuare, cercetările experimentale dedicate determinării forțelor din procesul de deformare incrementală s-au diversificat, urmărindu-se diferite traiectorii. Au fost realizate de la piese de tip trunchiuri de con, trunchi de piramidă, semisfere etc. Utilajul folosit a fost o freză cu comandă numerică în trei axe. Astfel, pentru o piesă semisferică au fost folosite două poansoane cu diametre diferite și au utilizate două valori ale pasului vertical. S-a concluzionat că, atât creșterea diametrului poansonului cât și creșterea valorii pasului vertical conduc la creșterea valorilor maxime ale forțelor atât pe direcție verticală cât și pe direcție orizontală.

O altă direcție, din același subcapitol, și-a propus studiul influenței strategiei de

deformare (prin schimbarea traiectoriei poansonului) asupra forțelor pentru obținerea pieselor de tip trunchi de con. Se constată că cea mai favorabilă traiectorie este traiectoria în spirală la care variația componentei verticale a forței este lină, fără maxime sau minime locale și în plus se obține o scădere a valorii maxime în cazul de 23% față de celelalte tipuri de strategii.

Următorul subcapitol este destinat studiilor pentru determinarea deformațiilor principale și a subțierii relative la procedeul de deformare incrementală. Subcapitolul este divizat în două direcții și anume: evaluarea deformațiilor principale și subțierii relative la finalul procesului de deformare și evaluarea lor pe parcursul procesului de deformare. Primele cercetări au făcut referire la evaluarea deformațiilor principale la finalul procesului. O primă cercetare a studiat influența parametrilor geometrici, mai exact a diametrului poansonului și a pasului pe direcție verticală asupra deformațiilor principale și secundare și a subțierii materialului. Au fost realizate măsurători pe piese realizate din două tipuri de materiale diferite, cu grosimi diferite. Piesele realizate au fost de tip trunchi de piramidă. Sistemul folosit la măsurarea deformațiilor este un sistem optic Argus. Au fost alese trei strategii (traiectorii) de deformare diferite. Concluziile care s-au evidențiat au fost: valorile deformațiilor și subțierea cresc odată cu scăderea diametrului poansonului, valoarea pasului poansonului pe direcție verticală influențează valorile maxime ale deformațiilor și subțierii în sensul creșterii acestora odată cu scăderea valorii pasului și valoarea pasului poansonului în planul tablei, influențează foarte puțin valorile maxime ale deformațiilor și subțierii materialului. Alt studiu în domeniul determinării deformațiilor și subțierii relative s-a axat tot pe determinarea acestora la finalul procesului de prelucrare la o piesă de tip trunchi de con realizată cu mai multe traiectorii diferite. Se concluzionează din analiza stării de deformare și a subțierii relative la piesele de tip trunchi de con că strategia de deformare optimă este cea la care poansonul urmărește o traiectorie spirală. Următoarea direcție de cercetare a urmărit determinarea deformațiilor principale dar mai ales a subțierii relative pe parcursul procesului de deformare. Au fost realizate piese de tip trunchi de piramidă. Pentru realizarea pieselor am utilizat un robot Kuka iar pentru măsurarea lor am folosit sistemul optic Aramis. Folosirea robotului a permis poziționarea matriței pe verticală și, automat, posibilitatea evaluării deformațiilor și subțierii pe toată durata prelucrării. Se presupune la deformarea incrementală că variația grosimii peretelui lateral al piesei respectă legea sinus. Problema care s-a dorit a fi rezolvată a fost aceea a evaluării acurateței legii sinus la procedeul de deformare incrementală. Concluziile cercetărilor au fost că: legea sinus nu este respectată decât prin prisma valorilor maxime ale subțierii relative la procedeul de deformare incrementală, valoarea maximă a subțierii relative nu se atinge încă de la început ci doar după ce se atinge o "valoare critică" a înălțimii piesei și atât distribuția subțierii relative cât și valorile maxime ale ei depind într-o oarecare

măsură de diametrul poansonului și de valoarea pasului vertical.

Alt subcapitol se referă la simularea numerică prin metoda elementului finit a procedeului de deformare incrementală. Simulările au fost realizate pentru a efectua studii comparative privind deformațiile pieselor, variația forțelor și revenirea elastică. Primul studiu a constat în realizarea unui studiu comparativ bazat pe metoda elementului finit între procedeul de deformare incrementală într-un singur punct și unul din procedeele clasice de deformare a tablelor: tragerea pe calapod. În ceea ce privește procedeul de deformare incrementală au fost realizate trei analize fiecare cu câte o strategie de deformare diferită. O altă direcție de cercetare și-a propus studiul teoretic și experimental al procesului de deformare incrementală într-un punct, din punct de vedere al preciziei pieselor obținute. Studiul analizează diferența de nivel ce se obține pe fundul piesei, revenirea elastică dar și factorii de influență: diametrul poansonului și adâncimea de pătrundere a acestuia. Un alt studiu comparativ numeric experimental a avut ca scop evidențierea celor mai bune formulări pentru elementul finit de tip Thin Shell 163 la simularea procesului de deformare incrementală. Pentru patru formulări diferite au fost analizate și comparate cu rezultatele experimentale deformațiile principale, deformațiile secundare, variația forțelor din proces și revenirea elastică. O atenție deosebită a fost acordată revenirii elastice deoarece de aceasta depinde cel mai mult precizia pieselor obținute prin deformare incrementală. S-a constatat astfel că valoarea maximă a revenirii elastice se înregistrează foarte aproape de locul în care poansonul iese din material, undeva în peretele lateral al piesei.

Un subcapitol special este destinat aplicațiilor din domeniul medical al procedeului de deformare incrementală. O primă cercetare a propus realizarea unor implanturi pentru suprafața condrală de la nivelul genunchiului. Pentru aceasta au fost realizate simulări numerice folosind metoda elementului finit. O altă cercetare s-a referit la evaluarea calității suprafeței la implanturile pentru suprafața articulară, a capului radial și a bazei falangei, obținute prin deformare incrementală. Au fost luați în considerare factorii de influență: calitatea suprafeței poansonului, coeficientul de frecare și diametrul poansonului.

Ultimul subcapitol al capitolului destinat principalelor contribuții științifice este destinat unei metode care are la bază analiza inversă pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor. Analiza inversă constă practic în modelarea geometrică prin metoda elementelor finite a modelului fizic pe care urmează să se realizeze cercetările, și simularea procesului real de deformare. În paralel cu aceasta modelul fizic este solicitat în condiții identice cu cele aplicate modelului geometric discretizat măsurându-se anumiți parametri de răspuns. Prin micșorarea diferențelor dintre mărimile determinate experimental și cele obținute prin simulare se obțin valorile caracteristicilor de material. Cercetările din acest subcapitol

au fost bazate pe testul Erichsen și cu testul Hecker pentru determinarea deformabilității materialelor metalice sau nemetalice. Datele de material obținute în urma analizei inverse au fost validate prin utilizarea lor la simularea procesului de deformare incrementală.

Ultimul capitol al tezei de abilitare prezintă activitatea didactică și de cercetare, contribuția științifică și prestigiul profesional și propunerile de dezvoltare a carierei autorului.