



Uvodni referat i Rad po pozivu

AKTUELNI TRENDOWI RAZVOJA TEHNOLOGIJE PLASTICNOG OBLIKOVANJA METALA

Milentije Stefanovic¹, Srbislav Aleksandrovic², Vesna Mandic³

¹Mašinski fakultet u Kragujevcu, SCG, stefan@kg.ac.yu

²Mašinski fakultet u Kragujevcu, SCG, srba@kg.ac.yu

³Mašinski fakultet u Kragujevcu, SCG, mandic@kg.ac.yu

Rezime: Savremenu tehnologiju plasticnog oblikovanja (TPO) karakteriše: razvoj postupaka modeliranja procesa oblikovanja-tečenja metala, definisanje naponsko-deformacionih polja i sl., u cilju optimizacije parametara obrade, primena sistema CAD/CAM za projektovanje i izradu alata, razvoj i primena veštacke inteligencije i ekspertnih sistema u osvajanju procesa obrade i konstrukcije alata, razvoj razlicitih postupaka, alata i mašina za delove koji se ne obraduju naknadano ("Net Shape" obrada) itd. U radu se daje pregled savremenih postupaka obrade plasticnim deformisanjem metala, navode elementi obradivosti novih materijala i daju primeri numericko-fizickog modeliranja razlicitih procesa TPO.

Kljucne reci: plasticno oblikovanje metala, novi materijali i tehnologije, obradivost, aplikacija racunara

Abstract: Modern metal forming technologies are characterized by: development of metal forming processes – determination of stress-strain field on the aim of optimization of forming parameters, application of CAD/CAM system for design and tool manufacturing, development of artificial intelligence and expert systems in forming system, development of methods, tools and machines for Net Shape forming. This paper presents review of actual forming methods, elements of new materials formability, and examples of numerical-physical modelling in different forming processes.

Key words: forming, new technologies and materials, formability, computers application

1. UVOD

Obrada metala plasticnim oblikovanjem (deformisanjem) se može definisati kao kontrolisana izmena geometrije i/ili oblika komada pod dejstvom spoljašnjih sila i bez dekompozicije mase komada. Danas se ovakvim postupcima preraduju vrlo razliciti metali i dobijaju delovi razlicitog stepena tacnosti i mase od jednog grama do preko jedne tone. Ova obrada je stara koliko i covek iz neolitskog perioda kada su oblikovani zlato, srebro i bakar u prirodnom obliku, a zatim i legure-bronza, gvožđe i mesing. Sa razvojem postupaka dobijanja metala, razvijali su se i postupci obrade deformisanjem, posebno intenzivno u periodu prve industrijske revolucije. Dvadesetih i tridesetih godina prošlog veka uvode se fundamentalne postavke teorije plasticnosti i temelji prvih nauka o materijalima, sistematski pristupa razvoju mašina i konstrukciji alata. Pocinje se sa zapreminskim oblikovanjem, a zatim se, u skladu sa potrebama automobilske industrije, intenzivno razvijaju i postupci prerade limova. Ova druga faza u razvoju tehnologija plasticnog oblikovanja (TPO) traje do šezdesetih godina 20. veka. Od tog vremena, pocinje treca faza u razvoju TPO, koju karakteriše uvođenje racunara za analizu procesa, konstrukciju delova i alata i odgovarajucu optimizaciju, ali takode i za upravljanje procesom obrade, uvođenje fleksibilne automatizacije, primena novih materijala i tehnologija kroz razvoj baznog sistema obrade, cime se podiže kvalitete proizvoda, produktivnost, fleksibilnost i economicnost.

U tzv. sekundarnoj obradi metala deformisanjem, o kojoj je i rec u ovom radu, postoji oko 200 razlicitih procesa obrade, koji se karakterišu razlicitim nacinom ostvarivanja deormacione sile, kinematikom izvršnih elemata alata i sl. Generalno, TPO karakterišu:

- visoka produktivnost;
- niska cena koštanja po komadu;
- visok stepen iskorišćenja materijala;
- uskladenost kvaliteta delova sa funkcijom;
- široko podrucje primene (masa delova od 1gr do 1 t);
- korišćenje vrlo razlicitih metala (celici, obojeni metali).

Podrazumevajuci osnovni razvoj u oblasti novih tehnologija na bazi fundamentalnih fizicko-hemijskih istraživanja, glavni pravci razvoja u okviru obrade metala plasticnim oblikovanjem-deformisanjem mogu se uslovno predstaviti kao: razvoj postupaka modeliranja procesa oblikovanja-tecenja metala, definisanje naponsko-deformacionih polja i sl., u cilju optimizacije parametara obrade, primena sistema CAD/CAM za projektovanje i izradu alata, razvoj i primena veštacke inteligencije i ekspertnih sistema u osvajanju procesa obrade i konstrukciji alata.

Sve strožiji zahtevi koje moraju ispunjavati razliciti proizvodi, dovodi i do razvoja specificnih postupaka TPO i vrlo usmerene specijalizacije u ovoj oblasti. Karakteristicne savremene tehnologije u tom smislu su [1],[2].:

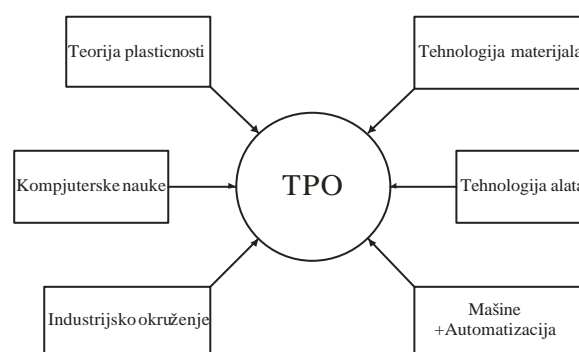
- precizno toplo kovanje (u alatima), slozenih delova od celika povecane cvrstoce za olakšane konstrukcije;
- hladno kovanje postupcima koji omogucavaju dobijanje dolova za ugradnju ili korišćenje, bez nakandne obrade rezanjem (NSF - Net Shape Forming) odnosno NNSF (Near Net Shape Forming);
- oblikovanje limova i izrada delova razlicitih oblika i dimenzija;
- fino prosecanje kombinovano sa operacijama oblikovanja za celike povecane cvrstoce i limove vece debljine;
- zapreminsko oblikovanje koje predstavlja kombinaciju hladnog, polutoplog i toplog kovanja jednog komada u cilju optimizacije deformacionog stanja i kvaliteta proizvoda,
- ekspanziono oblikovanje pod dejstvom unutrašnjeg pritiska i sl.

Modernu TPO, uz prethodno nabrojano, posebno karakterišu aspekti povišene tacnosti (NSF i NNSF), upravljanje i pouzdanost obradnog procesa, koji se mogu iskazati na sledeci nacin:

- proizvodnja delova sa merama u granicama tolerancija (NSF);
- proizvodnja komponenti vrlo kompleksne geometrije sa tolerancijima bliskom zadatim (NNSF);
- upravljanje procesom sa obezbedenjem visokog kvaliteta i mehanickih osobina i tacnosti geometrije delova;
- smanjenje utroška materijala i energije uz poštovanje ekoloških zahteva.

Generalno, TPO se ne može realizovati kroz individualne nezavisne mere, vec jedino kroz dobro koordinisan sistem odlucivanja u okviru sledecih elemenata, sl.1.:

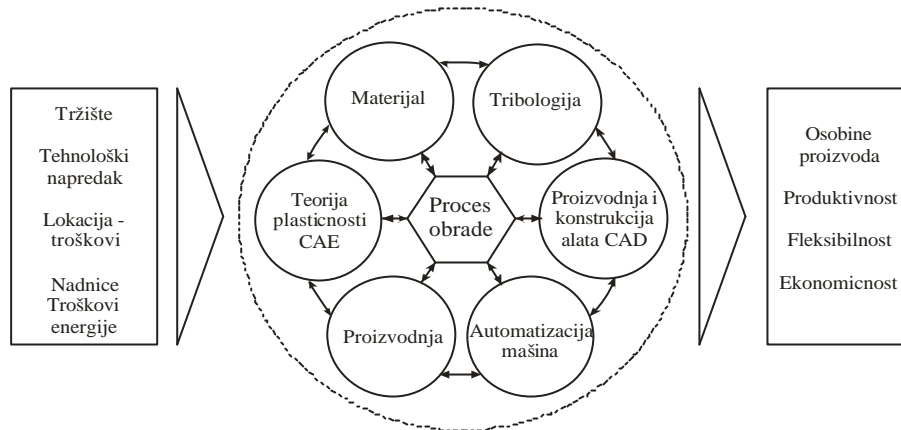
- strateškim pomeranjem od empirijskih ka naucnim saznanjima (korišćenje know-how visoko kvalifikovanih strucnjaka);
- specificnom aplikacijom CA tehnologija za konstrukciju delova, simulaciju, vodenje i upravljanje obradnog procesa;
- selekcijom materijala koji su razvijani za odredene aplikacije, sa optimalnim finalnim karakteristikama materijala;
- korišćenjem visoko –preciznih tehnologija izrade alata;
- korišćenjem naprednih mašina u TPO;
- razvojem kvalitetne poslovne politike preduzeca.



Slika 1. Elementi savremene tehnologije plasticnog oblikovanja [1]

Savremeni model sistema TPO karakteriše sinergijski efekt izmedu komponenata i elemenata sistema, prema sl.2 Centralni deo sistema, obrada u užem smislu (geometrija komada i alata i odgovarajuca kinematika) je povezana sa 6 modula, raspoređenih oko jezgra procesa: fundamentalni deo teorije plasticnosti ukljucuje analizu procesa i projektovanje (metod konacnih elemenata), tehnologiju materijala, tribologiju, tehnologiju alata, mašinu i automatizaciju procesa, okruženje u preduzecu. Svi moduli mogu biti medusobno povezani do određenog nivoa. Relacije izmedu njih i sa jezgrom procesa mogu biti posebno matematicki formulisane ili definisane modelima koji opisuju uticaje pojedinih modula. Ovako definisana struktura problema, za cije se rešavanje mora zalaziti u

vrlo različite detalje, često obeshrabruje korisnike da primene pomenuti integralni pristup: svi aspekti moraju biti tačno definisani i uključeni kroz "simultano inženjerstvo" u cilju realizacije efikasnog proizvodnog procesa.



Slika 2. Struktura modela sistema TPO[1]

Navedeni pristup podrazumeva integrisanost modula u ekonomskom okruženju kao dinamičkom sistemu. Ovakav sistem se permanentno kreće kao deo tehnološkog progresa, u skladu sa tržištem, uzimajući u obzir troškove energije, poboljšanje kvaliteta, produktivnost i fleksibilnost na putu ka naprednoj ekonomiji.

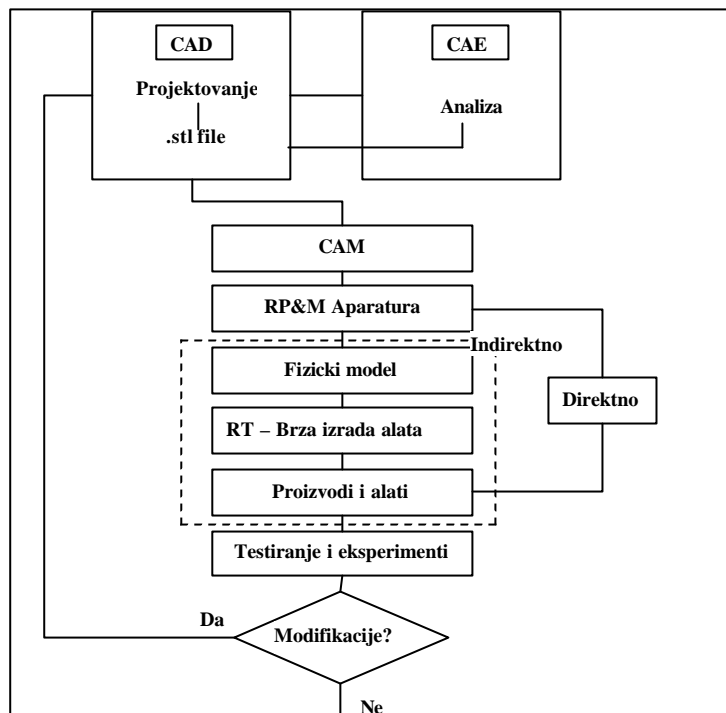
Bez pretenzija da se u ovakvim radovima mogu potpuno obuhvatiti u potpunosti svi aspekti vrlo dinamičnog razvoja tehnologija plasticnog oblikovanja metala, u navedenom pregledu značajno mesto zauzimaju i rezultati i doprinosi domaćih istraživača i stručnjaka u oblasti TPO. Takođe, zbog preglednosti, sadržaj u radu je podeljen u dve osnovne grupe postupaka, koji pripadaju zapreminskom oblikovanju i obradi lima, čime se i drugačiji pristupi ne isključuju.

2. ZAPREMINSKO OBLIKOVANJE

2.1. Savremeni postupci projektovanja procesa i alata za zapreminsko oblikovanje

Današnji zahtevi svetskog tržišta u pogledu cene i visokog kvaliteta proizvoda nameću potrebu smanjenja ciklusa razvoja proizvoda i optimizacije parametara procesa. Primena koncepta konkurentnog inženjeringa, koji podrazumeva upravo tehnološko spajanje CAD/CAM/CAE, kao VP&M (*Virtual Prototyping and Manufacturing*) metode, sa RP&M kao PP&M (*Rapid and Physical Prototyping and Manufacturing*) metodom, je neophodna u brzom razvoju novih proizvoda koji mogu odgovoriti zahtevima tržišta. Brza izrada prototipova novog proizvoda daje model na osnovu koga projektant može testirati funkcionalne zateve proizvoda i smišljenim izmenama poboljšati njegov kvalitet. RP&M uključuje i RT (*Rapid Tooling*) – brzu izradu alata za skoro sve vrste obrade metala deformisanjem (obrada lima, kovanje, istiskivanje, livenje, injekciono presovanje plastike ...). Na ovaj način se rezultati dobijeni CAD/CAM/CAE tehnologijom mogu verifikovati korišćenjem fizičkih modela proizvoda i alata [3].

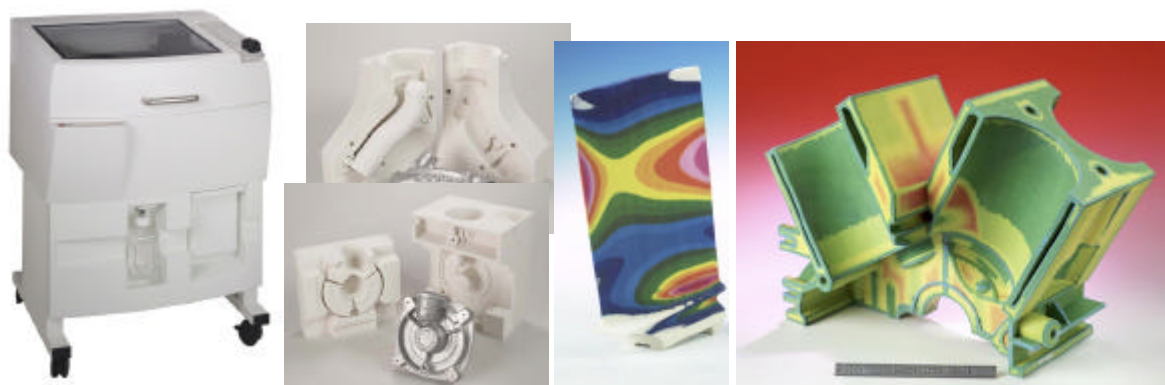
Integracija CAD/CAM/CAE i RP&M tehnologija prikazana je na slici 3. Procedura počinje generisanjem ulaznih podataka za CAM sistem na osnovu podataka i rezultata CAD/CAE sistema. Obično se prenos podataka iz CAM sistema u RP&M uređaje izvodi preko STL formata. Komercijalni softveri, kao što su CATIA, I-DEAS, Pro-Engineer, Solidworks i ost., imaju sopstvene module za generisanje fajlova u navedenim format, tako da je taj postupak potpuno automatizovan, i obično se izvodi bez ikakvih intervencija korisnika. Obično su i alati i proizvodi od metala, pa se i eksperimentalni alati i modeli proizvoda moraju napraviti od metala, da bi rezultati testiranja i eksperimenta bili verodostojni. U tom slučaju se RP modeli koriste direktno za pravljenje alata nekoj od CNC mašina, na primer CNC kopirnoj glodalici. U nekim slučajevima, kao što su procesi livenja, mogu se koristiti RT modeli indirektno. Takvi alati imaju jednokratnu upotrebu i koriste se za livenje samo jednog komada, jer se alat lomi da bi se oslobodio liveni deo. RT modele alata korisno je primeniti u fizičkom modeliranju procesa zapreminske obrade deformisanjem (kovanje, toplo istiskivanje ...) primenom mekih modelnih materijala, koji imaju slično ponašanje pri plasticnom deformisanju kao realni metalni materijali na povišenim temperaturama. Na takvim modelima može se testirati popunjavanje alata u pojedinim operacijama procesa, pratiti nastanak defekata u tecenju materijala itd. Na slici 4 prikazana je RP mašina Zprinter 310 i neki od modela dobijeni RP tehnologijom.



Slika 3: Procedura integracije CAD/CAM/CAE i RP&M tehnologija [4]

Poslednjih godina široko se primenjuje tehnika numeričke simulacije procesa obrade deformisanjem, u osnovi bazirana na metodi konacnih elemenata (FEM - *Finite Element Method*) i metodi konacnih zapremina (FVM - *Finite Volume Method*), u cilju kompletne analize procesa i optimizacije projektnih rešenja za samu tehnologiju izrade i konstrukciju alata. Novija naučna literatura u svetu potvrđuje da je skoro nezamislivo raditi razvoj proizvoda i procesa bez primene novih C tehnologija i numeričke simulacije. Sve se više govori o tzv. VIRTUELNOJ PROIZVODNJI (v.sl.5).

Cesto okarakterisana kao «Sledeća revolucija u globalnoj proizvodnji», virtualna proizvodnja podrazumeva nelinearnu FE ili FV analizu i simulaciju svih procesa u tehnologiji izrade nekog proizvoda. Simulacija tehnologije omogućuje kompanijama da optimiziraju ključne faktore koji direktno utiču na profitabilnost proizvoda, kao što su: obradivost, finalni oblik i tačnost, nivo zaostalih napona, pouzdanost u eksploataciji itd. Profitabilnost se povećava smanjenjem troškova proizvodnje, uštedom materijala, eliminisanjem otkaza, skraćivanjem vremena i troškova razvoja proizvoda i projektovanja alata kroz samnjenje pokušaja «trial-and-error» i ostalo.



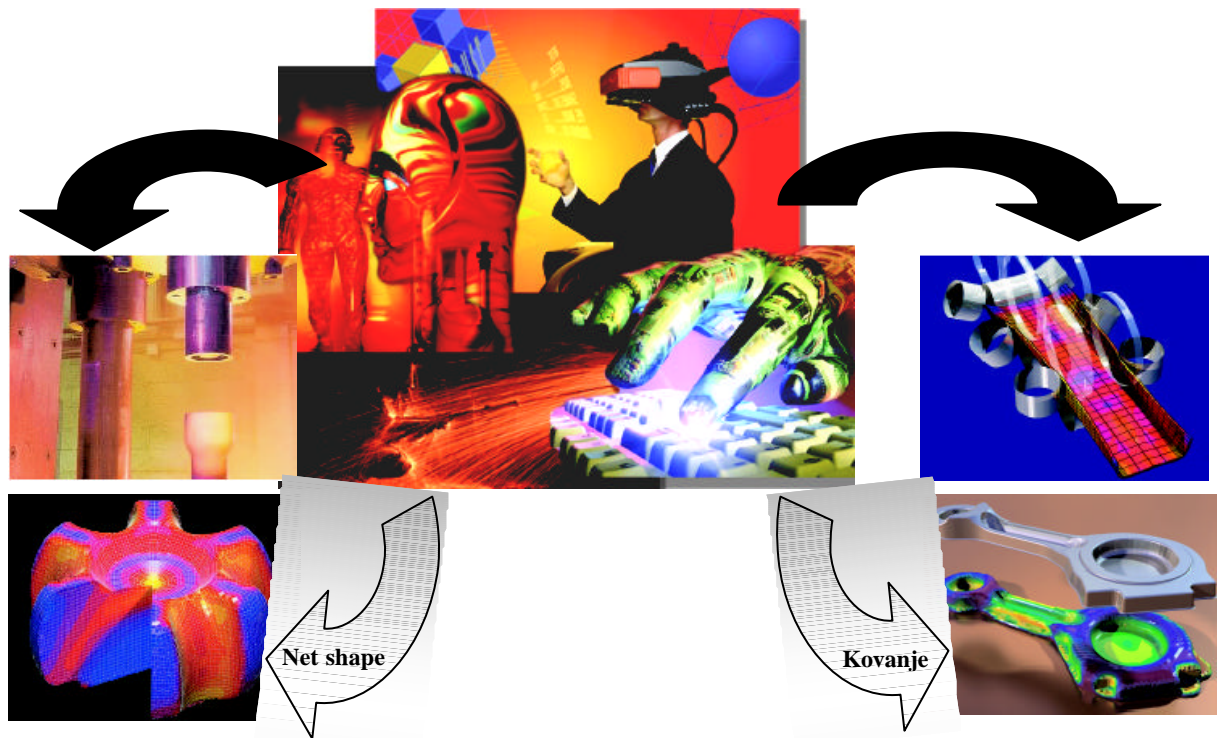
Slika 4: RP mašina Zprinter 310 i neki od modela proizvoda i alata dobijenih RP tehnologijom

Virtuelni modeli proizvoda i procesa su jako fleksibilni i omogućuju brze izmene parametara procesa, njegovu vizuelizaciju i dobijanje relevantnih informacija bez fizičke izrade alata, njihove montaže i probne proizvodnje. Testiranjem na virtuelnim modelima, kroz više projektnih iteracija, mogu se odrediti optimalni uslovi izvođenja procesa.

Iako su «numericki alati» (FEM i FVM softveri) veoma mocni oni ne mogu u potpunosti zameniti fizicke modele (*RP, scaled-down, model material...*), vec su komplementarni sa njima. Fizicki modeli dokazuju validnost kompjuterskih modela i pomažu u 3D vizuelizaciji. Veoma su korisni u identifikaciji ulaznih podataka za numericku simulaciju, kao i u verifikaciji i interpretaciji rezultata te simulacije.

U sledecem odeljku rada bice prezentirani primeri koji demonstriraju primenu numericke simulacije i modeliranja razlicitih procesa zapreminske obrade deformisanjem, koji su realizovani na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, pri Laboratoriji za obradu deformisanjem.

VIRTUELNA PROIZVODNJA Sledeca revolucija u globalnoj proizvodnji



Slika 5: VIRTUELNA PROIZVODNJA – Izazov za buducnost

2.2. Primeri modeliranja i FEA simulacije procesa zapreminske obrade deformisanjem

Osnovna ideja metode fizickog modeliranja je zamena realnih metalnih materijala sa mekim modelnim materijalima koji imaju slicno ponašanje u toku plasticnog deformisanja, kao što su voskovi i modelne gline, od kojih je najpoznatija plastelin. Pregled i karakteristike modelnih materijala koji se koriste u fizickom modeliranju dat je u radu [5]. Modelni eksperimenti se, zahvaljujuci malom naponu tecenja ovih materijala, mogu izvoditi u laboratorijama na manjim alatima i uredajima, koji mogu biti izradeni od aluminijuma, drveta, pleksiglasa, plasticnih masa itd. Primenom višebojnih modela i alata sa transparentnom prednjom stranom, kao i moderne aparature za akviziciju podataka, može se ceo proces snimiti digitalnim aparatom ili kamerom i dobiti trajni zapis, cijom analizom se dobija mnoštvo informacija o samom procesu.

Za potrebe fizickog modeliranja procesa izraden je uredaj koji je povezan sa dodatnom opremom namenjenom akviziciji podataka i montiran je na hidraulicnu presu tipa *Ericksen* [6]. Uredaj u svom centralnom delu ima lako izmenljive radne elemente alata i omogućuje simulaciju razlicitih procesa zapreminske obrade. Modelirani su jednostavniji tipski procesi zapreminske obrade (istosmerno, suprotnosmerno i kombinovano osnosimetrično istiskivanje, ravansko istosmerno istiskivanje, osnosimetrično kovanje u otvorenim alatima). Kroz transparentnu prednju stranu uredaja ceo proces deformisanja je sniman digitalnim aparatom, u više faza. Na slici 6 prikazan je uredaj sa dodatnom opremom. Deformaciona sila je registrovana preko piezoelektricnog trokomponentnog dinamometra *Kistler*.



Slika 6: Uređaj za fizicko modeliranje sa lako-izmenljivim matricama i pritiskivacima, plastelinski pripremak

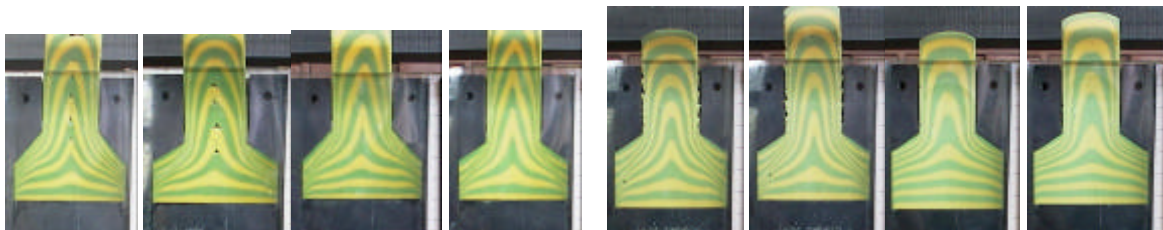
Paralelno sa fizickom modeliranjem procesa izvodi se i numericka simulacija istih procesa, pri istim uslovima, primenom softverskog paketa CAMPform 2D. Program je namenjen za simulaciju 2D procesa metodom konacnih elemenata u PC okruženju. On se sastoji iz modula za proračun, baziranog na termo-kruto-viskoplasticnom pristupu, i grafickog korisnickog interfejsa, koji u pre-procesiranju omogućuje veoma lak unos podatak o obradi a u post-procesiranju graficki prikaz rezultata simulacije. Posebna pogodnost programa je potpuno automatizovano generisanje mreže na pocetku simulacije procesa i kasnije, u toku simulacije, regenerisanje mreže, tzv. *remeshing*, bez ikakve intervencije korisnika. Izlazne informacije su, prema izboru korisnika, naponske i deformacione komponente, brzinske komponente, dijagram deformacione sile, distribucija temperature, elasticne deformacije i habanje alata itd.

Za neke FEA simulacije korišćen je program FORGE2 i FORGE3, u saradnji sa DIMEG, Univerzitet u Padovi.

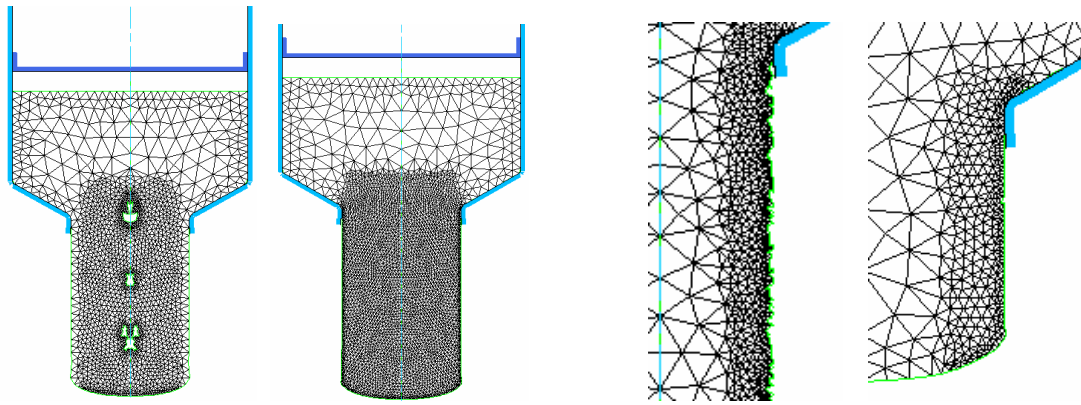
2.2.1. Istiskivanje

2.2.1.1. Eliminacija defekata u procesu istosmernog istiskivanja

U radu je modeliran proces istosmernog istiskivanja kroz konusnu matricu sa izlaznim centralnim uglom od 60° , 90° i 120° , pri podmazivanju talkom, i korišćenjem plastelinskih modela (žuti i zeleni plastelin) i modela od plastelinske mešavine ME10 [6]. Pri određenim kombinacijama uticajnih faktora procesa došlo je do pojave defekata tecenja. Na slici 7 prikazani su plastelinski modeli sa defektima centralnih naprslina i defektima spoljašnjih radijalnih naprslina. Defekti su eliminisani promenom uslova kontaktnog trenja, odnosno promenom maziva, na osnovu rezultata modeliranja i FORGE2 FE analize procesa. Program proverava vrednosti kriterijuma loma, i pri zadatim granicnim vrednostima, zapocinje deljenje konacnih elemenata, kao pocetak formiranja naprsline. Na slici 8 prikazani su numericki FORGE2 modeli, dobijeni pri istim uslovima izvođenja procesa kao u fizickom modeliranju. Analizirani defekti su karakteristicni i pri istiskivanju realnih metalnih materijala pri određenoj kombinaciji geometrijskih parametara alata i uslova podmazivanja, što je detaljnije objašnjeno u radu [7].



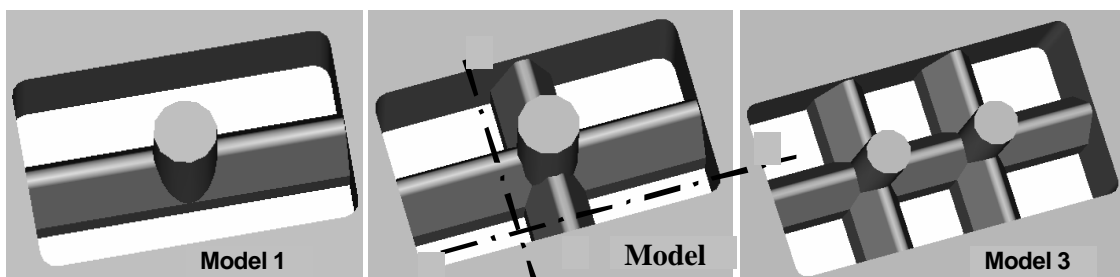
Slika 7: Plastelinski modeli sa i bez defekata centr. naprslina, modeli ME10 sa i bez defekata radij. naprslina



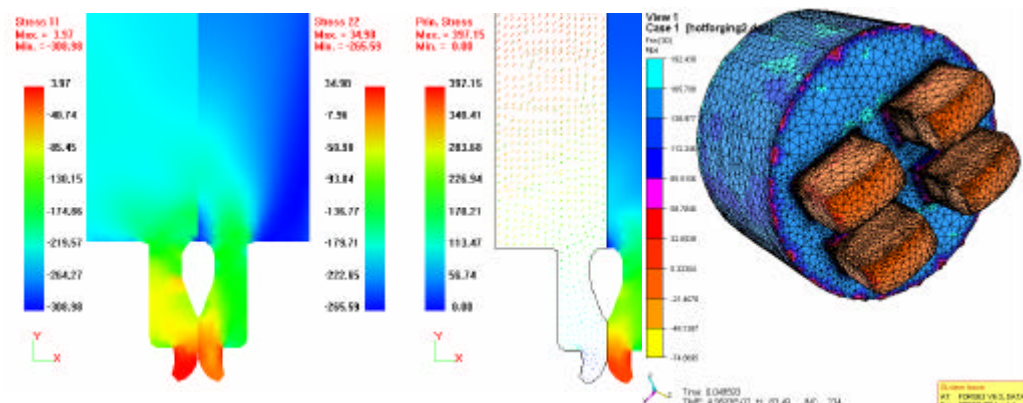
Slika 8: FORGE2 modeli sa i bez defekata centralnih i radialnih naprslina

2.2.1.2. Toplo istiskivanje šupljih Al profila kroz komornu matricu

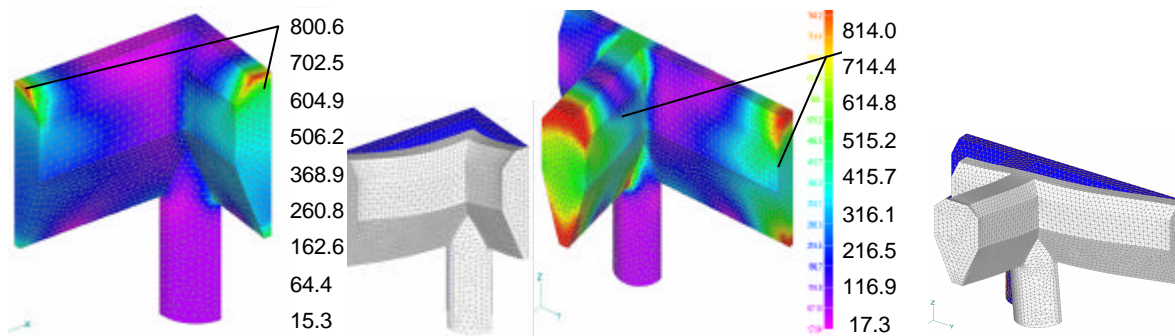
U cilju ispitivanja uticaja geometrije komorne matrice na defleksiju mosta alata uradena je 2D CAMPform i 3D FORGE simulacija procesa istiskivanja aluminijuma (Al6060). Analizirane su tri varijante komorne matrice, sa dva, cetiri i šest otvora (sl.9). Proces je analiziran u dva karakteristicka preseka, kao 2D FEA CAMPform simulacija, a takode i primenom FORGE3 softvera kao 3D simulacija. Dobijeni rezultati su dali zadovoljavajuce podudaranje 2D i 3D simulacije, tako da su određeni kontaktni naponi na mostu alata, sl.10. Primenom FE softvera PAK, razvijenog na Mašinskom fakultetu određena je defleksija alata u sva tri slucaja. Rezultati su prikazani na slici 11 [8]. Najnepovoljnija varijanta je komorna matrica sa 6 otvora, zbog pojave najvećih pomeranja u centralnom delu. Na ovaj nacin mogu se analizirati i ostali bitni uticajni faktori u procesu toplog toplog istiskivanja Al profila, kao što su: pritisci u zoni svarivanja, uticaj geometrije izlaznog profila matrice, uticaj debljine profila na naprezanja u alatu itd.



Slika 9: Modeli komornih matrica sa dva, cetiri i šest otvora



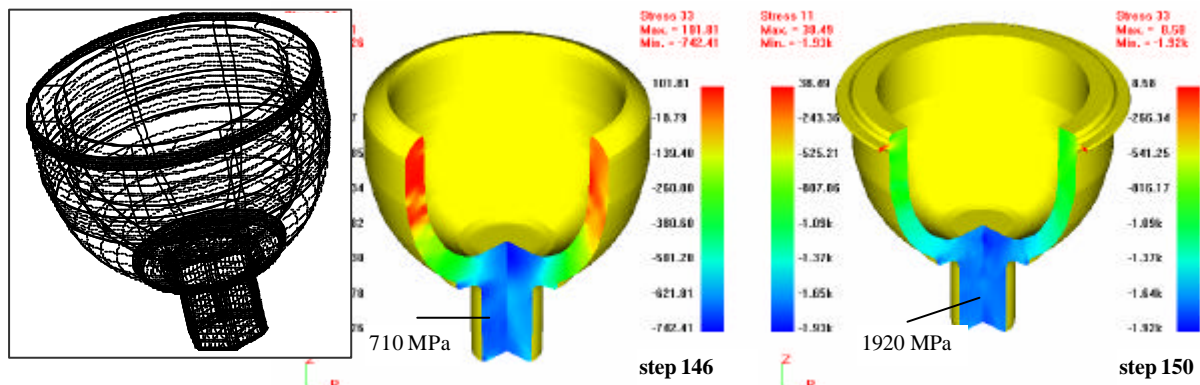
Slika 10: Rezultati CAMPform 2D simulacije u presecima A-A i B-B i rezultati FORGE3 simulacije



Slika 11: PAK FE analiza defleksije mosta komorne matrice u toplom istiskivanju Al profila

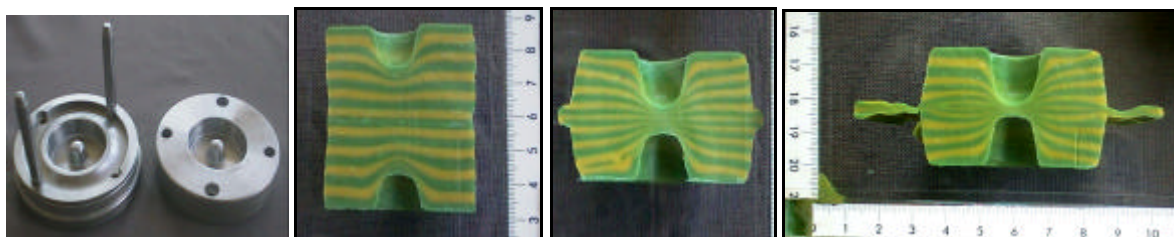
2.2.2. Toplo kovanje u otvorenim alatima

U fazi osvajanja novog proizvoda i projektovanja alata za kovanje otkovka prikazanog na slici 12, prvobitno projektno rešenje tehnologije izrade je predstavljalo kovanje u tri operacije: pripremno sabijanje, prethodno kovanje i završno kovanje sa vencem [6]. Alati su projektovani na bazi iskustva projekatanta, ali je u toku probne proizvodnje došlo do loma donjeg dela alata za prethodno kovanje. Numerickom CAMPform 2D simulacijom je trebalo utvrditi razloge takvog loma i pružiti informacije projektantima za moguće izmene projektog rešenja, da bi se sprecio lom alata i produžio njegov vek. Materijal otkovka je celik za rad na niskim temperaturama CRN460. Rezultati CAMPform simulacije su pokazali da je geometrija alata za prethodno kovanje takva da dovodi do nepravilnog tecenja materijala i stvaranja defekata, tj. mrtve zone materijala u donjem delu otkovka. Distribucije radijalnog i aksijalnog napona na slici 12 pokazuju da za svega nekoliko numerickih koraka (u praksi to je par milimetara hoda pritiskivaca), pri kraju operacije prethodnog kovanja, dolazi do naglog skoka radijalnog i aksijalnog pritiskujućeg napona u donjem delu otkovka, što dovodi do loma donjeg dela alata. Ovakvi rezultati su bili dovoljni pokazatelji da je potrebno izvršiti promene projektog rešenja alata i tehnologije.

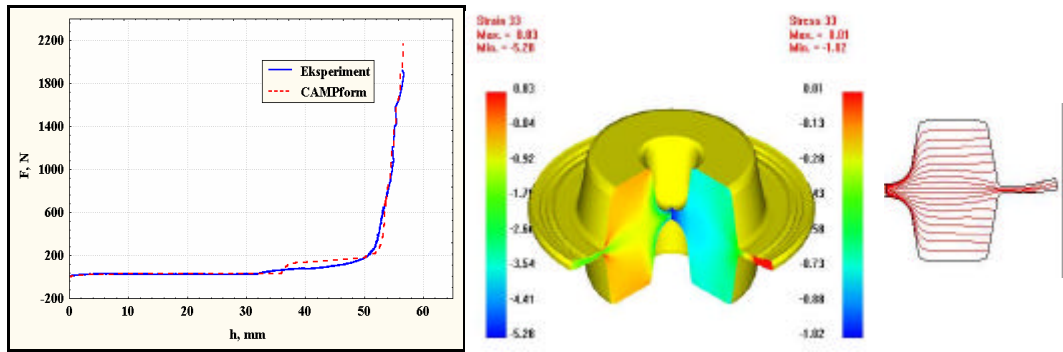


Slika 12: Geometrija otkovka, distribucije radijalnog i aksijalnog napona u operaciji prethodnog kovanja

Tehnikom fizickog modeliranja primenom plastelina kao modelnog materijala modeliran je proces kovanja u otvorenim alatima, u cilju pracenja tecenja materijala u meridijalnoj ravni, provere popunjavanja alata i odredivanja deformacione sile u modelnom eksperimentu. Korišćeni su višeslojni cilindricni plastelinski modeli. Alati su prikazani na slici 13. Da bi se pratila istorija deformisanja pracene su tri faze procesa, nakon kojih je model rasecan duž meridijalne ravni i sniman. Kao mazivo korišćen je talk. Primenjeno je nekoliko »numerickih eksperimenata« do potpune podudarnosti slika tecenja (v.sl.12), na osnovu cega je izvedena precizna deformaciono-naponska FE CAMPform analiza. Takode je dobijena odlicna FE procena deformacione sile, što se vidi na uporednom dijagramu sila, na slici 12 [6].



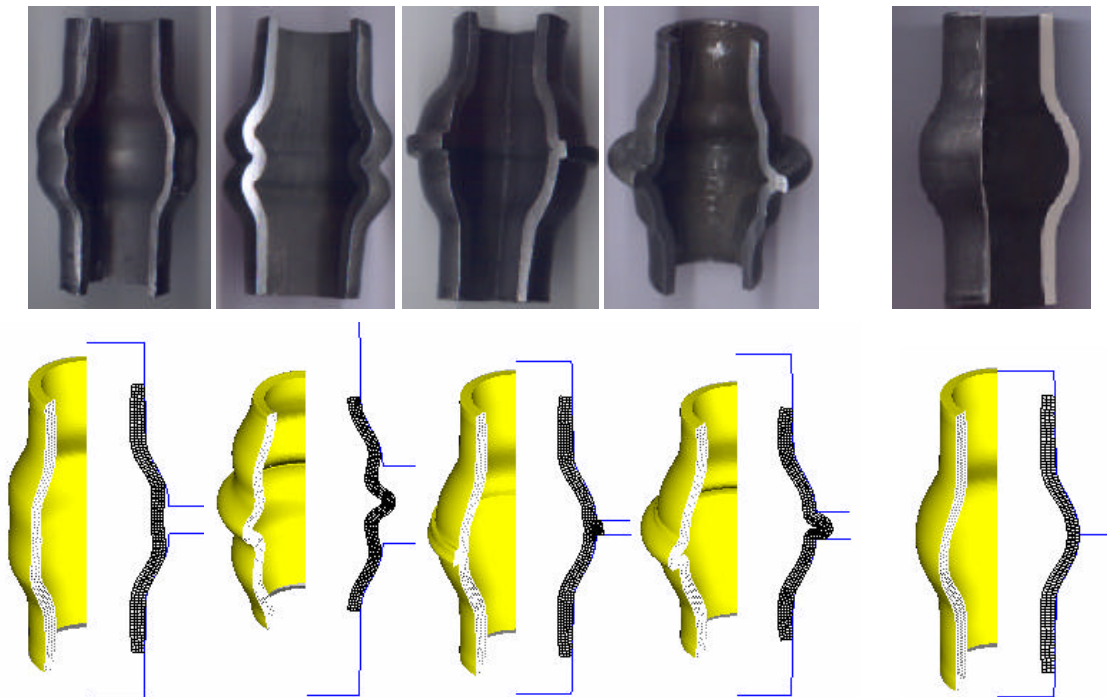
Slika 13: Alati za modeliranje procesa kovanja, plastelinski modeli u tri faze procesa



Slika 14: Usporedni dijagram eksperimentalne i FE deformacione sile, numericki modeli sa distribucijom napona

2.2.3. Oblikovanje cevnih obradaka iz celicnih šavnih cevi

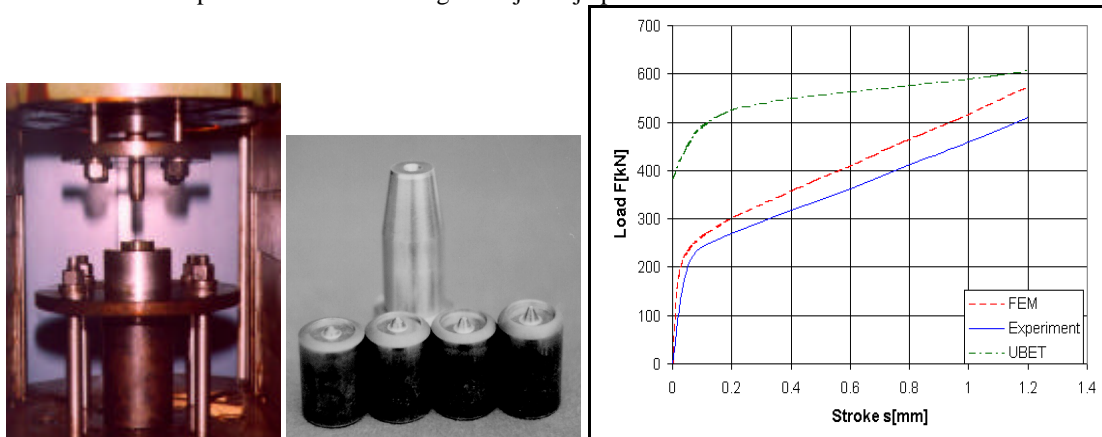
Oblikovanje celicnih šavnih cevi, uz kombinaciju istovremenog sužavanja krajeva cevi i proširivanja centralnog dela, u funkciji formiranja kalote, izvedeno je u dvodelnom alatu od tvrdog metala, koji je montiran na mehanicku presu [9]. Uobicajeno se za ovakve vrste obrade primenjuje hidro deformisanje, koje zahteva skupu opremu. Da bi se utvrdili uslovi koji obezbeduju potrebnu stabilnost procesa i dobijanje obradaka bez defekata, u kontinuiranoj proizvodnji bez otkaza, izvedena je citava serija eksperimenata. Varirani su geometrijski parametri priprema (D , s , H) i uslovi podmazivanja (mašinsko ulje, hemijska priprema). Paralelno sa eksperimentima izvedna je i numericka CAMPform simulacija. Rezultati simulacije su u potpunosti odslikavali realnu situaciju u testovima. Izvedeni eksperimenti, sa promenom geometrijskih velicina priprema i promenjenim uslovima podmazivawa pokazali su pojavu defekata i nestabilnost procesa pri primeni mašinskog ulja kao maziva. Pri primeni priprema sa hemijskom pripremom, samo jedna kombinacija geometrijskih parametara priprema je dala izradak bez defekata, sa potpunom dimenzionom tacnošcu (D_{02} , h_{02} , s_2). Ocgledno je da stabilnost, odnosno nestabilnost procesa, prati razlicita naponska šema u deformacionoj zoni obratka, kao i nivo ostvarene deformacione sile. Naime, male deformacione sile nisu dovoljne da se formira kugla izratka u potpunosti, dok kod vecih deformacionih sila trenutak proširivanja središnjeg dela cevnom priprema nastupa prerano, te deo mateijala izlazi van alata. Na slici 15 prikazani su oblici defekata nastalih u nestabilnim procesima deformisanja cevnih priprema sa odgovarajucim numerickim modelima procesa.



Slika 15: Cevni obradci sa defektima i numericki modeli (levo), cevni obradak bez defekata (desno)

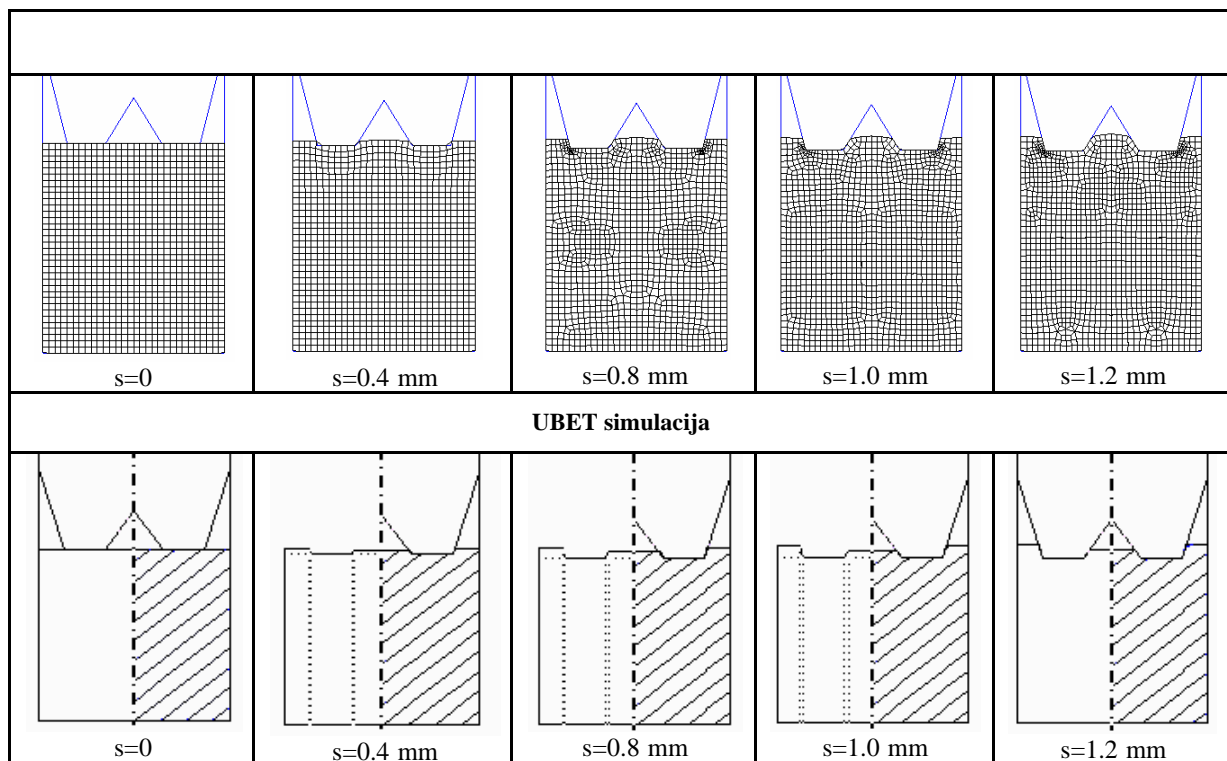
2.2.4. Hladno utiskivanje

Proces hladnog utiskivanja se veoma uspešno primenjuje u proizvodnji alata za kovanje ili livenje, gde se ojacani pritiskivac utiskuje u materijal praveci tacan otisak, odnosno gravuru. Proces je propracen pojavom velikih sila, posebno kod vecih kontaktnih površina. Na velicinu sile znacajno utice geometrija pritiskivaca, a na kraju i mogucnosti ostvarivanja željene dubine otiska. U cilju detaljne analize procesa izvedena su teorijsko-numericko-eksperimentalna istraživanja [10]. Primenjena je metoda gornje procene UBET, kao i FE CAMPform numericka analiza. Eksperimentalni alati su montirani na hidraulicnu presu Sack Kiselbach od 6400 kN, pri cemu je registrovana eksperimentalna sila. Na slici 14 prikazan je alata u presi, kao i obradci sa odgovarajucim pritiskivacem. Dijagram eksperimentalne deformacione sile prikazan je na slici 15. Numericke UBET i FEM procene sile su takode prikazane na slici. Ocigledna je bolja procena u FE analizi.



Slika 16: Alat montiran na presi, obradci u cetiri faze procesa **Slika 17:** Uporedni dijagram deformacione sile

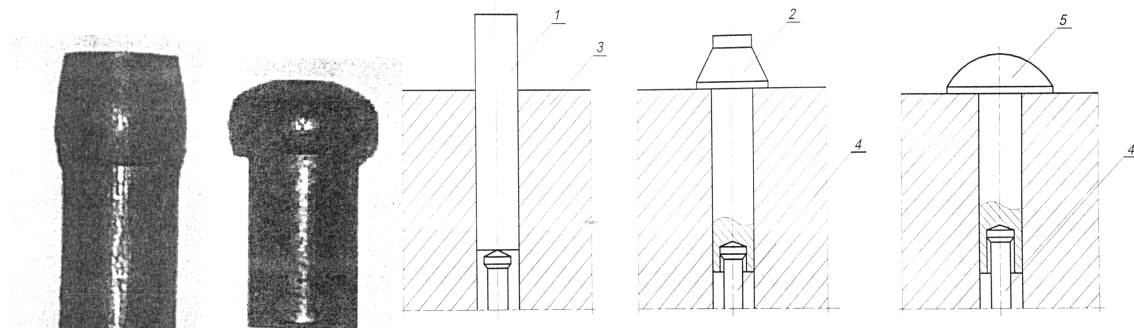
Rezultati FE i UBET analize plasticnog tecenja mterijala u meridijalnom preseku, u više faza procesa prikazani su na slici 18. Može se pratiti tecenje materijala i dubina otiska i ista uporediti sa obradcima u eksperimentalnim ispitivanjima. Dobijena je zadovoljavajuca podudarnost eksperimentalnih i numerickih rezultata. Na ovakav nacin, korišćenjem virtualnih modela, mogu se uspešno istražiti i drugi procesi, bez velikog broja eksperimentalnih jedinica.



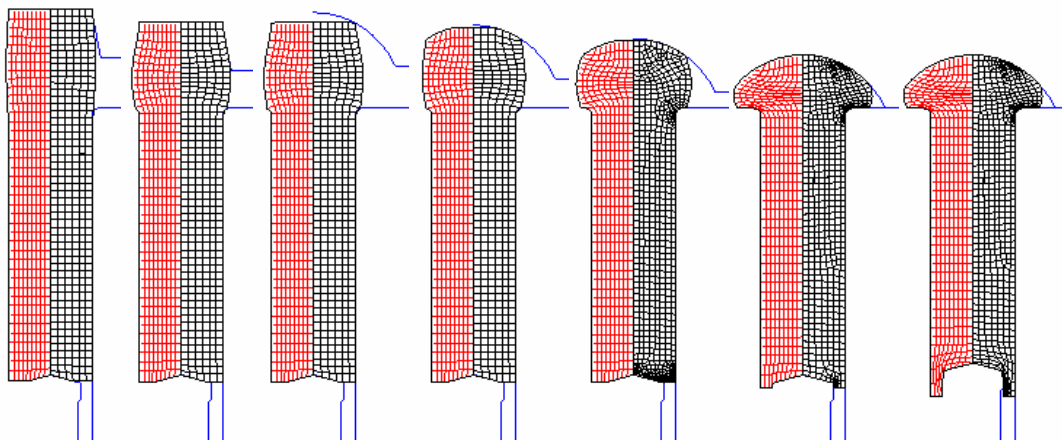
Slika 18: FE i UBET simulacija procesa hladnog utiskivanja

2.2.5. Hladno višefazno zapreminsko oblikovanje

Višefazno zapreminsko oblikovanje se primenjuje za izradu delova složenog oblika na višepozicionim presama - automatima. Delovi se izrađuju iz žice, koja je prethodno termički obradena i fosfatirana, tako da nije neophodno meduoperacijsko žarenje. Ovakve procese karakteriše velika nestabilnost, s obzirom na istovremeno plastično tecenje materijala u posebnim zonama obratka. Zbog velikog broja uticajnih parametara i njihovog interaktivnog dejstva veoma je teško precizno definisati optimalne uslove izvođenja procesa. Kada u procesima zapreminskog oblikovanja postoji podeljeno tecenje materijala u pojedinim, odvojenim deformacionim zonama u obratku, moguće je korišćenjem uprošćenih modela izvršiti parcijalnu analizu takvih procesa. U radu je analiziran proces izrade zabušene zakovice od C0247, postupkom hladnog višefaznog zapreminskog oblikovanja (v.sl.17). U tu svrhu izvedena je numerička FEM simulacija procesa, pri čemu su dobijene raspodele deformacionih, naponskih i brzinskih polja u obratku, kao i dijagram deformeacione sile za dve operacije procesa. Uz pretpostavku da se plastično tecenje materijala odvija samo u pojedinim zonama obratka, izvedena je serija eksperimenata korišćenjem jednostavnih modela. Rezultati eksperimentalnih istraživanja u potpunosti su potvrdili rezultate numeričke simulacije [11]. Na slici 20 prikazani su numerički modeli procesa u više karakterističnih faza.



Slika 19: Obradak u prvoj i drugoj fazi formiranja glave, skice obradaka u fazama tehnološkog postupka

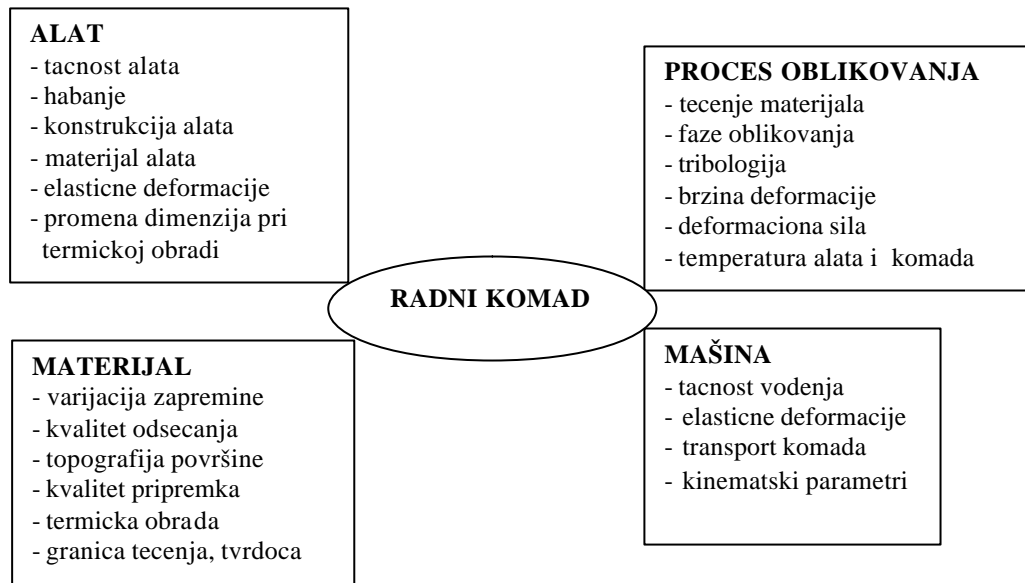


Slika. 20: Linije tecenja (flownet) i FE mreža u toku numeričke simulacije procesa oblikovanja zakovice

2.3. Plastično oblikovanje delova za ugradnju (izrada delova bez naknadne obrade) – Net Shape Forming

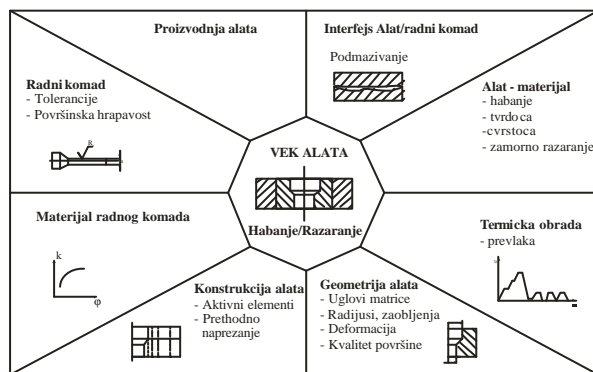
“Net Shape Forming” obuhvata grupu postupaka obrade metala plastičnim oblikovanjem kojima se dobijaju delovi spremni za ugradnju, bez potrebe za naknadnim obradama funkcionalnih površina. Npr. zubi zupčanika se dobijaju u završnoj formi, dok se bočne stranice mogu doradivati rezanjem. Na sl.21. su pokazani osnovni uticajni faktori na tačnost pri obradi postupcima NSF [12]. Postupci NSF ili NNSF se prvenstveno vezuju za postupke zapreminskog oblikovanja (hladno i polutoplo kovanje i istiskivanje), ali se često u ovu grupu svrstavaju i postupci preciznog livenja (pod pritiskom, Thixo oblikovanje) i sinterovanja. S obzirom na izuzetan značaj tačnosti alata [13], potrebno je strogo kontrolisati faktore koji utiču na proces habanja alata, prema sl.22[1]. Razvoj metoda NSF može se reći, predstavlja pravi tehnološki pokret u okviru tehnologija plastičnog oblikovanja metala, pri čemu je za uspešnu realizaciju NSF neophodna integracija znanja iz oblasti novih materijala i proizvodnih tehnologija. Npr. delovi od legura aluminijuma i titana, koji se oblikuju u oblasti superplastičnosti po zahtevima NSF postupcima izotermalnog kovanja, u suštini procesa imaju složene

metalurške promene u deformisanom materijalu (postizanja zadatih brzinsko-temperaturnih uslova tacno definisanih za pojedine vrste materijala).

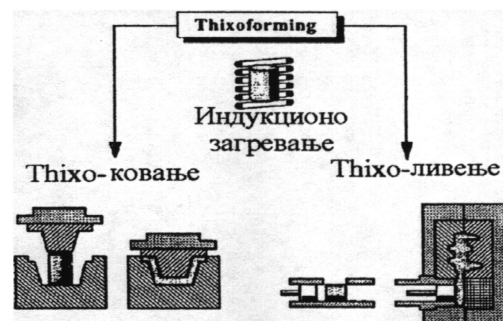


Slika 21: Uticajni parametri na tacnost pri NSF [12]

Veoma je znacajno pri realizaciji postupaka NSF, ostvarivati princip optimalne šeme naponskog stanja, odnosno koristiti maksimalni kapacitet deformabilnosti [14]. To su pritisne naponske šeme, tipicne za obradu kovanjem i istiskivanjem. Karakteristike tecenja materijala, predstavljene u obliku krivih ojacanja, za više razlicitih materijala, koji se primenjuju u TPO, navedene su u monografijama [14], [15].



Slika 22: Elementi uticajni na vek alata [1]



Slika 23: Osnovne sheme thixo-oblikovanja [17]

2.4. Oblikovanje u polu-tecnom stanju (THIXOFORMING)

Thixo deformisanje je oblikovanje metala unutar solidus/likvidus intervala. Prvi razvoj postupka datira iz perioda 1975-1980 godine (MIT-USA) sa ciljem da se postupci livenja i kovanja zamene ekonomijnim i boljim. Pripremi materijal spada u grupu specijalnih materijala, najčešće iz grupe modifikovanih legura AlMgSi1 i AlSi7Mg sa posebno pripremljenom-globularnom strukturom [16].

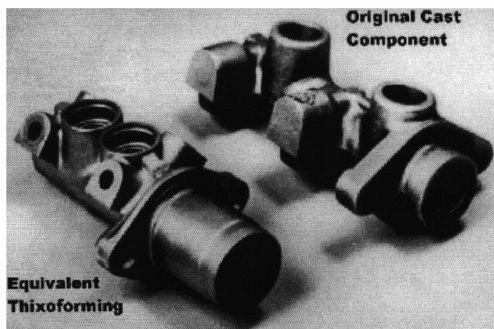
Uobicajeni naziv za ovaj postupak, koji predstavlja kombinaciju između livenja i istiskivanja, odnosno livenja pod pritiskom, je Thixoforming. Po principima Net-shape oblikovanja u oblasti kovanja aluminijumskih legura moguće je ostvariti poboljšanje kvaliteta, produktivnosti i ekonomičnosti. Kod livenja pod pritiskom, istopljeni materijal se ubacuje u kalup. Posle zatvaranja alata, uniformnim pritiskom se popunjava šupljina kalupa, te mikrostruktura zavisi od realizovanog upravljanja pritiskom i brzinom (vremena obrade). Kod thixoforming-a materijal se nalazi u testastom stanju, te se sa njime može manipulirati (vadenje iz peći i postavljanje u alat). Za vreme oblikovanja pod dejstvo smicajnih napona cvrste frakcije metala se prevode u tecne i kompletno oblikovanje se vrši pri relativno maloj sili. Vrlo je znacajno kontrolisati temperaturu na kojoj se vrši zagrevanje

materiala. Moguce je FEM analizom simulirati zagevanje komada, kako bi se našli optimalni parametri procesa pripreme na povišenoj temperaturi [18].

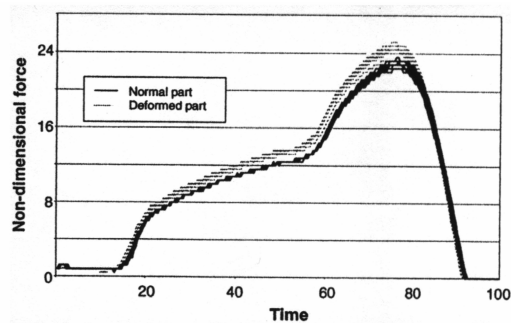
Osnovne prednosti thixoforming-a u odnosu na livenje pod pritiskom su [17]:

- energetski efikasniji proces koji se može automatizovati,
- troškovi proizvodnje su slicni ili niži;
- delovi nemaju poroznu strukturu;
- niža temperatura zagrevanja komada smanjuje termicka naprezanja alata i produžava njegov vek;
- vrlo fina mikrostruktura povećava cvrstocu delova;
- ušteda u težini zbog moguće optimizacije konstrukcije.

Na sl. 23. pokazane su osnovne sheme thixo-oblikovanja, a na sl.24. pokazani su delovi dobijeni klasicnim livenjem pod pritiskom i thixoforming-om, sa ociglednom demonstracijom near-net-shape kapaciteta thixoforming-a



Slika 24: Delovi dobijeni razlicitim tehnologijama [19]



Slika 25: Uporedenje etalon i stvarne promene kolekcije registrovanih signala pri kovanju[21]

2.5. Monitoring alata i procesa

Kako je napred navedeno, na tacnost delova koji se izraduju TPO, znacajan uticaj ima mašina za deformisanje. Krivajne mehanicke mašine su veoma osetljive prema sistematskim preopterećenjima, koja umanjuju vek trajanja osetljivih elemenata mašine [20] (ležajevi, glavno vratilo, prenosne poluge). "On-line" monitoring alata za oblikovanje deformisanjem (zapreminska obrada, oblikovanje limova) primenjuje se za prevenciju oštećenja alata i mašine, odnosno generalno za smanjenje troškova proizvodnje. Razvoj i implementacija monitoringa alata je izuzetno važna, posebno kod tzv. velikih alata, kao i alata za uzastopnu obradu, s obzirom da se time omogucava optimalno održavanje, adekvatna zamena oštećenog alata, produžetak veka trajanja alata, obezbedivanje visokog kvaliteta proizvoda i smanjenje dodanog vremena.

Najvažnije tri komponente monitoringa alata su: karakteristike materijala, obradni uslovi, model koji se koristi za predviđanje i monitoring stanja alata. Prvi element se odnosi na osobine materijala alata, maziva i materijala komada. Obradne uslove cine: brzina, pritisak, temperatura i ostali parametri koji variraju za vreme obrade. Teoretski model koji povezuje osobine materijala sa uslovima obrade i vekom alata, takode ukljucuje i istoriju deformisanja i kvalitet proizvoda. Pri tome se mogu koristiti neuronske mreže za integrisanje informacija dobijenih od senzora opterećenja i zvučne emisije.

U procesima zapreminskog oblikovanja, npr.kovanja, cesto se koriste setovi alata za uzastopnu obradu. Poznato je da su alati vrlo znacajan element obradnog preseca, i da bitno uticu na troškove proizvodnje (približno 5-30% ukupnih troškova). Kontinualna zamena alata i uobicajeno održavanje-regenaracija dramaticno umanjuje produktivnost i uvecava cenu po jedinici proizvoda. U ovom slucaju postoji više parametara koji uticu na oštećenje alata, odnosno razaranje, plasticnu deformaciju i habanje. Bilo koja degradacija alata dovodi do grešaka na površini komada i netacnih mera. Katastrofalno oštećenje alata i mašine dovodi do enormnog neplaniranog rasta troškova proizvodnje.

Za svaki radni hod se davacima registruje sila oblikovanja, a odgovarajucim akusticnim sensorima se registruje kolekcija zvučnih signala koji prate obradni proces. Dobijeni zapis u sistemu signal-vreme se upoređuje sa etalon zapisom, formiranim pri propisanom obradnom režimu (princip potpisa-signature procedure). Svaka nepravilnost koja se dešava u procesu, bilo da je u alatu, mašini ili dodatnim uredajima, detektuje se i u slucaju izlaska iz zadatih tolerantnih pojaseva, vrši se automatsko zaustavljanje mašine. Na sl.25. pokazan je primer uporedenja stvarne i etalon krive pri obradi kovanjem [21]. Na tržištu se poslednjih godina nalazi više tipova komercijalno izvedenih uredaji za monitoring procesa TPO, npr. [22].

3. OBRADA LIMOVA PLASTICNIM DEFORMISANJEM

3.1. Obradivost materijala za lake konstrukcije

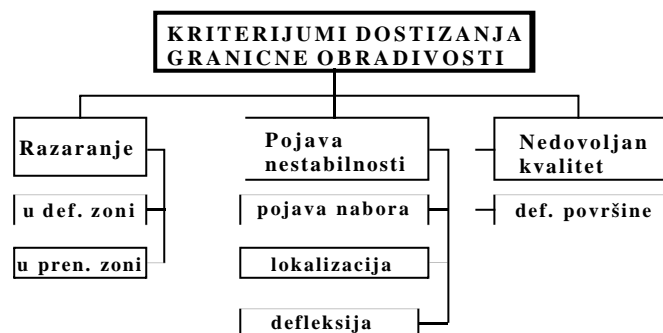
U skladu sa konstantnim porastom ekoloških zahteva, kao i potrebama za visokim performansama, uvođenje lakih konstrukcija postaje ključ uspeha u sektoru transporta, ali i generalno u oblasti mašingradnje i građevinarstva. Od Prve energetske krize sedamdesetih godina prošlog veka, zahtevi za umanjenjem mase saobraćajnih sredstava (automobili, kamioni, vagoni, brodovi) se neprekidno zaoštravaju i postavljaju nove kriterijume s obzirom na ekonomičnost, pouzdanost, sigurnost i sl. Lake konstrukcije se mogu opisati kao sistemi koji integrišu tehnologije u oblasti projektovanja, nauke o materijalima i proizvodnju, u cilju redukovanja mase kompletne strukture ili pojedinih elemenata, uz istovremeni porast funkcionalnog kvaliteta.

Automobilska industrija je svakako, najdinamičnij segment u oblasti proizvodnje transportnih sredstava, sa vrlo brzo primenom najnovijih saznanja iz vrlo različitih oblasti tehnike (materijali, računari, komunikacije i sl.). Pri tome je razvoj novih tehnologija direktno u funkciji tzv. materijala za lake konstrukcije (npr. obrada aluminijuma i lasersko zavarivanje). U okviru ovog rada, posebna pažnja obratice se upravo obradivosti materijala za karoserije automobila, koja i determiniše odgovarajuću TPO.

Obradivost predstavlja sposobnost lima da bez razaranja podnese deformisanje uz istovremeno postizanje zadate geometrije u okviru propisanih tolerancija oblika i dimenzija za odgovarajući kvalitet površina i sl. Stepenn uticaja faktora obradivosti varira od slucaja do slucaja, tako da se ne može izvršiti opšta generalizacija, odnosno, preporučuje se analiza svakog konkretnog slucaja sa definisanjem prioritarnih faktora i odredivanjem stepena uticaja.

Odredivanje obradivosti karoserijskih limova je veoma kompleksan proces zbog postojanja složenih uslova obrade i velikog broja parametara obradivosti relevantnih za postupak. To komplikuje njihovo ispitivanje kao i interpretaciju dobijenih rezultata. Obradivost karoserijskih limova se može posmatrati kroz tri svojstva: otpornost prema razaranju, sposobnost zadržavanja oblika i sposobnost prilagodavanja obliku alata. Ova tri segmenta zajedno čine obradivost u širem smislu. Često se otpornost prema razaranju razmatra kao obradivost u najužem smislu.

Pri projektovanju tehnologije procesa obrade limova dubokim izvlačenjem, od suštinskog značaja je i poznavanje granicne deformabilnosti, koja se može definisati kao sposobnost za ostvarivanje maksimalnih deformacija u zadatim uslovima obrade (naponsko-deformaciona shema, brzina, temperatura, tribološki uslovi i sl.). Na taj način, granicna deformabilnost je jedan od ograničavajućih faktora pri definisanju obradivosti, koja uključuje i složene kriterijume za nastanak pojava nestabilnosti (nabori, lokalizacija-stanjenje, defleksija), razaranja i td., sl. 26 [23].



Slika 26: Osnovni kriterijumi dostizanja granicne deformabilnosti

Smanjenje potrošnje goriva i umanjenje emisije izduvnih gasova za sve svetske proizvođače automobila, predstavlja jedan od najvažnijih razvojnih zadataka. Integrišući najnovija dostignuća u oblasti nauke i tehnike, posebni rezultati u ovoj oblasti ostvareni su u konstrukciji motora i izradi lakih karoserija automobila. Razvoj i korišćenje novih materijala za automobilsku industriju, posebno karoserije automobila, usklađen je sa opštim društvenim zahtevima, štednjom ekonomskih resursa, očuvanjem energije i ekologijom, bezbednošću putnika i sl. U tom smislu, poslednjih godina sve više se koriste materijali za izradu karoserija umanjene težine, kao što su: limovi od celika povišene čvrstoće (CPC), Al-limovi, titan i njegove legure, sendvič limovi, kompoziti itd.

U savremenoj automobilskoj industriji u izradi karoserija, globalno su fokusirani sledeći ciljevi [24]:

- 1- uvođenje aluminijumskih limova,
- 2- porast korišćenja limova od celika povišene čvrstoće,
- 3- porast korišćenja limova sa prevlakama cinka,
- 4- smanjenje broja delova (otpresaka) po automobilu,

- 5- smanjenje broja alata po otpresku,
- 6- porast korišćenja "Tailor" limova,
- 7- potreba za proizvodnjom bez otpadaka (zero defect quality),
- 8- potreba za proizvodnjom spoljašnjih otpresaka sa površinom visokog kvaliteta, bez naknadne dorade,
- 9- smanjenje cene koštanja.

U ukupnoj masi automobila u proseku 32% odnosi se na karoseriju. Jasno je da smanjenje mase karoserije znacajno doprinosi umanjenu ukupne mase automobila. U principu, smanjenje mase karoserije može se ostvariti promenom koncepcije strukture karoserije i zamenom klasicnih materijala lakšim, pri cemu se izbor materijala karoserije vrši na osnovu više kriterijuma [25].

3.1.1. Deformaciona analiza i granicna deformabilnost

Kod izvlacenja delova složene geometrije (na pr. elementi karoserije automobila), postoje teškoce u formulis anju kriterijuma za optimalno iskorišćavanje svojstava plasticnosti materijala koji se oblikuje. Stepem deformacija kod takvih komada razlicit je u pojedinim tackama. U zavisnosti od spoljašnjih uticaja, lokacija zone nestabilnog deformisanja može se pomerati. Korišćenjem eksperimentalnih postupaka na bazi mernih mreža, ili numerickih metoda i simulacija, moguće je odrediti ostvareni stepen deformacije na jednom mestu, u široj zoni ili po citavoj površini komada. Dobijeni rezultati predstavljaju osnovu za tzv. lokalnu ili inegralnu deformacionu analizu. Uvid u ostvarenu raspodelu deformacija kompletnog dela, odnosno složenog proizvoda, omogućava znatno složenije analize.

Uporedivanjem vrednosti ostvarenih deformacija sa onima iz dijagrama granicne deformabilnosti (DGD), može se doneti zakljucak o stepenu kritičnosti izvucenog dela. Pri tome, s obzirom na statisticki karakter pojave nestabilnosti, kriva granicne defomabilnosti odražava određeni nivo verovatnoce razaranja. Za kontrolu procesa dubokog izvlacenja u praksi se koriste statisticke metode, koje omogućavaju ocenu stabilnosti i tehnoloških mogućnosti procesa, kao i efikasnost preduzetih mera. Identifikacijom i izdvajanjem kritičnih parametara obezbeduje se mogućnost za efikasnu analizu i uspešno upravljanje procesom obrade. Pri tome se široko koriste DGD, kao i sve kvalitetnije numericke kompjuterske simulacije.

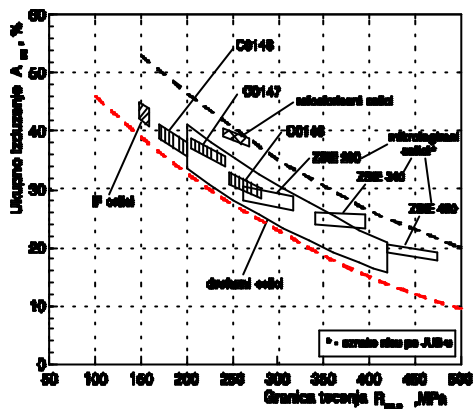
Razvojem racunarske i video tehnike stvoreni su uslovi za visokoautomatizovani rad u oblasti merenja i obrade podataka dobijenih uz pomoc mernih mreža. U tom smislu, komercijalizovani su sistemi koji ocitavaju dimenzije deformisanih elemenata merne mreže na izvucenim delovima i preko odgovarajuceg softvera, daju prikaze deformacionih polja, vrše unošenja u DGD, prate istoriju deformisanja i određuju rezervu plasticnosti (na pr. sistem ASAME firme CamSys) [26]. Usavršavanjem nacina nanošenja mernih mreža i korišćenjem opisanih sistema, postiže se brz i efikasan laboratorijski i rad u proizvodnim uslovima, sa nizom prednosti u odnosu na uobicajeni rad sa grafometrijskim metodama.

3.1.2. Obradivost limova od celika povecane cvrstoce

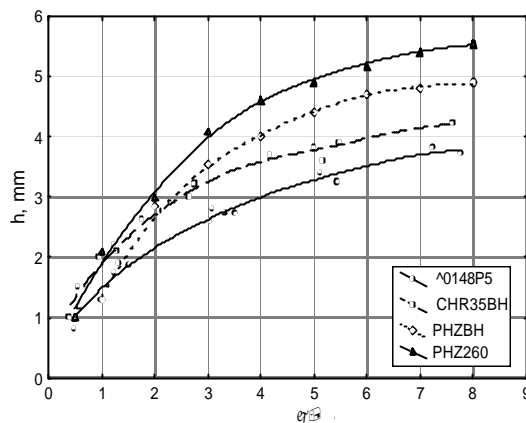
Osnovne vrste ovih celika su: konvencionalni mikrolegirani, refosforisani i dvofazni. U osnovnoj primeni dugi niz godina koriste se u brodogranji, vagonskoj i gradevinskoj industriji. Omogućavaju izgradnju konstrukcija povecane cvrstoce, uz smanjenje osnovne mase. Limovi od CPC, namenjeni izradi karoserija automobila, koriste se od sredine sedamdesetih godina prošlog veka, kada su ekološki zahtevi i ušteta energija postali dominantni u politici razvoja automobilske industrije. Ovakvi materijali omogućavaju izradu karoserija automobila povišene krutosti i manje težine, uz zadovoljavanje zahteva sigurnosti (staticka i dinamicka krutost, apsorpcija energije pri sudaru, oscilatorna udobnost i sl.). Limovi od CPC olakšavaju karoseriju i istovremeno apsorbuju više energije pri sudaru, pri cemu je kljuc uspešne primene selekcija vrste materijala i mesta primene na karoseriji (mogućnost upravljanja energijom sudara).

Na sl. 27. pokazani su razliciti materijali od celika, namenjeni izradi elemenata karoserije automobila [25]. Očigledno je da plasticniji materijali imaju nižu granicu tecenja i lakše se oblikuju (standardni materijal je C0148P5).

S obzirom na izražena svojstva cvrstoce, u odnosu na standardne celike, pri oblikovanju limova od CPC, dominantna su svojstva defleksije, odnosno sposobnost zadržavanja oblika i prilagodljivosti obliku alata. Stepem defleksije se može izraziti na razlicite nacine; preko visine nabora, odnosno zadatih i ostvarenih mera i uglova na otpresku, promene specificnih geometrijskih parametara sa hodom izvlakaca i sl. Na sl.28. pokazani su eksperimentalni rezultati ispitivanja pri ispitivanju defleksije, prema tzv. Yoshida-testu. Ispitivani su domaci i uvozni materijali, u okviru širih istraživanja mogućnosti primene limova od CPC (PH-refosforisani lim, BH-lim sa Bake-hardening efektom, proizvođač SARTID A.D.; CHR- proizvođač KAWASAKI Co.).



Slika 27: Materijali za karoserije automobila



Slika 28: Pokazatelj defleksije limova od CPC

Generalno posmatrano, pri korišćenju limova od CPC, mogu se razlikovati dva slučaja: mogućnost primene LPC u okviru postojeće tehnologije i projektovanje nove tehnologije, koja u osnovi pretpostavlja specifičnu obradivost ovakvih materijala. U suštini, defleksija se može umanjiti ostvarivanjem dodatnog zatezanja u kritičnim zonama, izmenom pravca tecenja metala, optimizacijom oblika i velicine razvijenog stanja, primenom zateznih rebara, izmenom geometrije izvlakaca i šeme podmazivanja i sl. [27].

3.1.3. Obradivost limova od Al-legura

Korišćenje Al-legura omogućava smanjenje težine uz zadovoljavanje zahteva za krutošću karoserije, čime se smanjuje potrošnja goriva i otvara prostor za dodatnu ugradnju elemenata aktivne bezbednosti. Međutim, zbog umanjene obradivosti u odnosu na niskougljenicne celicne limove, zamena i uvođenje Al-legura zahteva i niz tehnoloških usklađivanja u postojećem proizvodnom procesu, odnosno realizaciju potpuno novih elemenata obradnog sistema [28].

Primena aluminijuma za izradu pojedinih delova karoserije automobila započela je korišćenjem legura Al-Mg-Zn osamdesetih godina (poklopac motora, vrata, blatobrani i sl. - delovi koji se indirektno vezuju za karoseriju). U početku korišćenja Al-legura u ove svrhe, vršena je prosta zamena celicnih limova sa aluminijumskim, pri istim debljinama. Na ovaj način, ostvareno je smanjenje težine za 66%, ali uz smanjenu krutost i određene funkcionalne slabosti. Lokalna ojačanja mogu da reše neke od ovih problema, ali koncepcija u osnovi odgovara onoj pri korišćenju celicnih limova. Rešenje predstavlja nova koncepcija, gde je citava karoserija urađena od aluminijuma. Kod nje se koriste limovi od Al-legura i delovi od Al dobijeni istiskivanjem i livenjem. Ispitivanja su pokazala da se zamenom lokalnog ojačanja profilom kvadratnog preseka od celika istim od Al, ostvaruje umanjenoje mase za 50%, uz nepromenjenu funkcionalnost [29].

Na svetskom tržištu već postoje automobili čija je celokupna karoserija izrađena od Al-legura (Audi A8, Audi A2, Mazda AZZ550, Porsche EXP). Prognoze za period 1998.-2008. [25], u Evropi predviđaju porast procenta učešća Al-legura sa 6 na 12%, odnosno sa 70 na 120 kg ukupno ili sa 5 na 30 kg po karoseriji. Za Japan prognoze su drugacije i predviđaju učešće Al-legura do 15% kod automobila srednje i niže klase, i do 25% kod automobila visokih performansi.

Za delove karoserije uglavnom se koriste tri grupe Al-legura: Al-Cu (serija 2000), Al-Mg (serija 5000) i Al-Mg-Si (serija 6000). Mala težina, otpornost na koroziju i mogućnost reciklaže su najvažnije osobine koje Al-legure čine pogodnim za korišćenje u automobilskoj industriji. Jedna od specifičnosti Al-legura je u tome, da se mogu dobiti u velikom broju stanja, s obzirom na ostvareni stepen deformacije ili termičku obradu u toku valjanja.

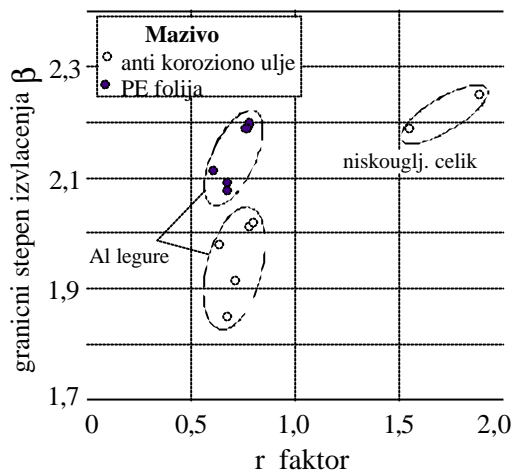
Osnovne karakteristike Al-legura su [30]:

- granica tecenja i zatezna cvrstoca su niži u odnosu na celik,
- modul elasticnosti ima tri puta manju vrednost u odnosu na celik,
- izduženje, narocito lokalno, je malo,
- koeficijent normalne anizotropije je mali (ispod 1),
- relativno mala tvrdoca sa površinom koja se lako oštećuje.

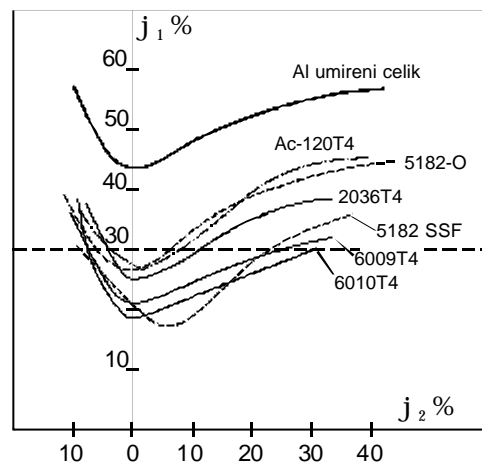
Kod nekih Al-legura dolazi pri deformisanju do pojave Liders-ovih linija, tzv. tipa A i B, koje bitno uticu na kvalitet površine oblikovanih delova, odnosno estetski izgled spoljašnjih elemenata karoserije. Ovakvi materijali se mogu koristiti isključivo za izradu unutrašnjih delova karoserije. S obzirom na mali modul elasticnosti, poseban problem predstavlja zadržavanje oblika pri dubokom izvlačenju, te je neophodno precizno odrediti uglove povratnosti.

Očigledno je da Al-legure imaju umanjenu obradivost u odnosu na celik, sl.29. i sl. 30. [30]. Pri izučavanju obradivosti ovih materijala u potpunosti se može koristiti metodologija razvijena za slučaj korišćenja celicnih

limovaa (mehanicke karakteristike, testovi čistog dubokog izvlačenja, razvlačenja, dijagrami granicne deformabilnosti, testovi defleksije i sl.). Tribološki uslovi imaju izuzetan znacaj pri obradi Al-legura dubokim izvlačenjem, pre svega zbog male tvrdoce i intenzivnog vezivanja Al za celik. Za definisanje optimalnih kontaktnih uslova, posebno vrste i zone nanošenja maziva, koriste se poznati tribo-testovi: klizanje trake od lima između ravnih kontaktnih površina, preko zateznog rebra, kao i složeniji modeli (duboko izvlačenje, r azvlačenje).



Slika 29: Pokazatelji obradivosti Al- legura



Slika 30: Dijagrami granicne deformabilnosti

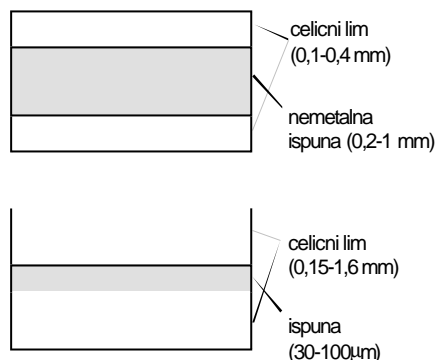
3.1.4. Obradivost celicno-plasticnih laminatnih limova

Celicno-plasticni laminatni limovi predstavljaju kompozitne materijale novije generacije sa vrlo specificnim karakteristikama obradivosti. U zavisnosti od debljine plasticne ispune, mogu se podeliti u dve osnovne grupe - one za smanjenje težine (laki sendvici) i one za prigušenje vibracija, sl.31. [28].

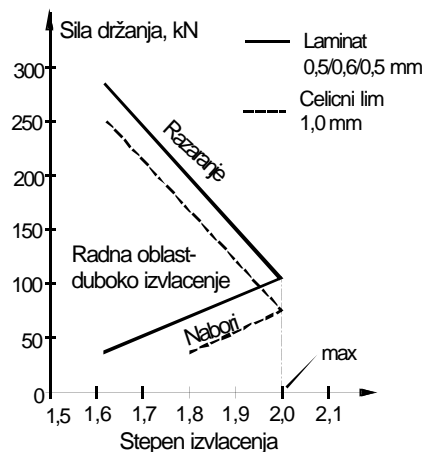
Laki senvic-limovi imaju deblji sloj ispune od limova za prigušenje vibracija, i mogu doprineti smanjenju težine konstrukcije do 30%. Između limova se nalazi termo-elasticna ispuna, sa dobrim karakteristikama prigušenja. Ispuna sadrži metalne ili grafitne ukljucke, kojima se poboljšava zavarljivost. U eksploataciji, pri relativnom mikropomeranju jednog u odnosu na drugi lim, dolazi do visko-elasticnog deformisanja unutar ispune i do redukcije vibracione energije u sistemu koji se prigušuje. Za ispunu se najčešće koristi polipropilen, najlon ili polietilen.

Osnovne mehanicke krakteristike, kao i parametri obradivosti, odgovaraju karakteristikama elemenata kompozita. Pri dubokom izvlačenju se narušavaju standardni uslovi na obodu, u zoni držaca, te je znatno povećana sklonost ka stvaranju nabora. Ovo dovodi do smanjenja obradivosti i nižeg granicnog stepena izvlačenja. Takode, uvecana je sklonost ka defleksiji, koja zavisi od adhezione veze ispune i osnovnog materijala. Netacnosti pri oblikovanju se mogu smanjiti pravilnim izborom vrsta i debljina osnovnih materijala i ispune. Prema sl.32. pri istim odnosima izvlačenja, neophodno je uvecati silu na držacu. Krive granicne deformabilnosti za sendvic -materijale se nalaze u podrucju koje važi za celicne limove. Bolja svojstva se odnose na oblast dvostranog zatezanja, a lošija u oblasti negativne druge glavne deformacije [31].

Mnogi delovi karoserija automobila se mogu raditi od laminata, u uslovima koji važe za standardni celicni lim. Pojava defleksije, glavni ogranicavajući faktor pri oblikovanju, nije suštinski znacajna kod unutrašnjih delova karoserije, ili. npr. kod kartera motora. Kod spoljašnjih delova, poseban problem u vezi defleksije, može nastati pri pecenju boje i pojavi temperaturnih deformacija.



Slika 31: Struktura laminatnih limova



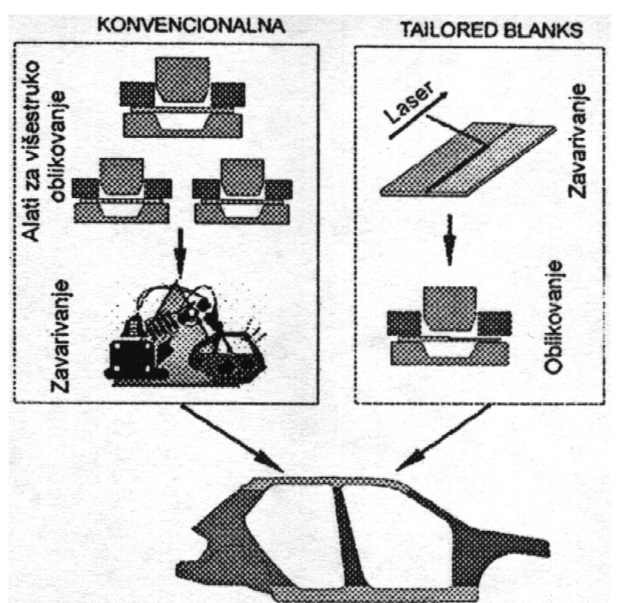
Slika 32: Radno područje pri dubokom izvlačenju

3.1.5. Obradivost prethodno iskrojenih (Tailor) limova

Razvojem kompjuterske tehnologije i pratećih nekonvencionalnih postupaka obrade, kao što je lasersko zavarivanje, oblikovanje uz pomoć tehnosti-hidroforminga, dobijanje površina materijala valjanjem sa programiranom hrapavošću i sl., stvaraju se uslovi za suštinsku promenu tehnoloških koncepcija u oblasti dubokog izvlačenja. Klasičan pristup u izradi karoserija-tackastim zavarivanjem većeg broja otpresaka zamjenjuje se izvlačenjem iz jedinstvenog razvijenog stanja, koje cine elementi od različitih materijala, različite debljine i mehanickih karakteristika spojeni laserskim zavarivanjem (tzv. TAILOR limovi). Na ovaj način se smanjuje broj alata za obradu prosecanjem i dubokim izvlačenjem, ali znatno komplikuje jedinstveni alat. Takođe, uslozavaju se pokazatelji obradivosti iz sledećih razloga:

- menjaju se svojstva u okolini vara, s obzirom da je njegova tvrdoća i do tri puta veća u odnosu na osnovni materijal;
- pri obradi lima različite debljina, tribološki uslovi u zoni držaca su od posebnog značaja;
- položaj zone vara mora biti pravilno odabran, s obzirom na glavne pravce tečenja metala i sl.

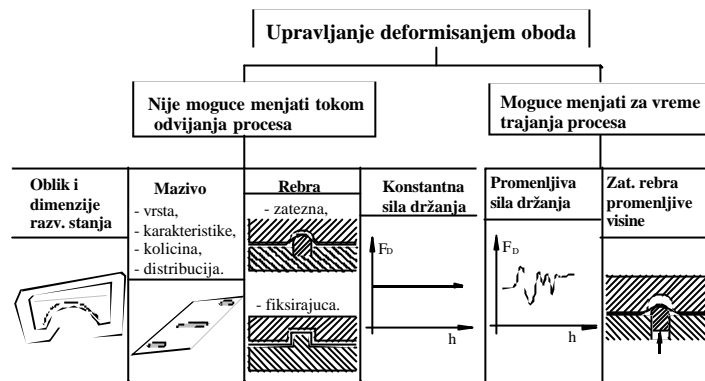
Zbog izuzetnih zahteva prema obradnom sistemu, ovi materijali se redovno obrađuju na mašinama kod kojih se može programski upravljati silom držanja. Na sl. 33. dato je upoređenje klasične tehnologije (izvlačenje više delova u različitim alatima) i napredne tehnologije sa Tailor-limovima (izvlačenje u jednom alatima) [32].



Slika 33: Upoređenje klasične i napredne tehnologije

3.2. Novi pristupi u oblasti upravljanja procesom dubokog izvlacenja

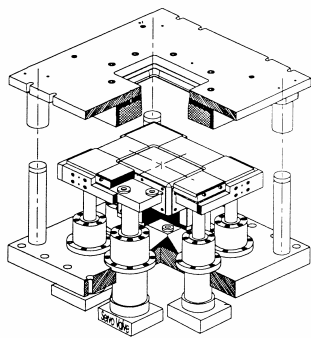
Duboko izvlacenje je najvažnija tehnologija u okviru plasticnog oblikovanja lima. Njen razvoj ide u pravcu potpunije kontrole procesa, odnosno upravljanja najvažnijim parametrima, sve u cilju smanjenja procenta delova sa defektima i poboljšanja kvaliteta. Važno mesto u ovom trenutku razvoja sistema upravljanja zauzima plasticno deformisanje oboda, pre svega zbog mogucnosti spoljašnjeg uticaja na proces. Sl. 34. [33] ilustrativno prikazuje na koje je ciniocce i parametre procesa moguće uticati tokom samog njegovog odvijanja, što cini osnovu upravljanja. Jasno se zapaža da vrlo bitnu ulogu ima sila držanja koju je moguće na razne nacine varirati tokom procesa. To prouzrokuje promenu triboloških uslova na obodu, a time i znacajan uticaj na proces i njegove rezultate. Artikulacija ovih uticaja je centralni zadatak razvoja u ovoj oblasti.



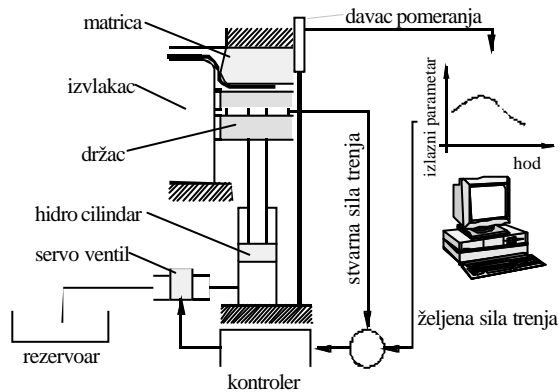
Slika 34: Nacini za upravljanje oblikovanjem oboda

Jedan od nacina korišćenja sile držanja kao upravljajuće velicine je tzv „multi point” sistem. Na više „tacaka” raspoređenih po površini držaca deluje se silom odgovarajućih hidro cilindara. Svaki od njih može imati drugaciju zavisnost sile držanja od hoda izvlakaca tokom procesa. Takođe, moguće je sinhronizovano uskladivati grupe pojedinih cilindara.

Više mogućnosti pruža segmentno izvođenje držaca (sl. 35, [33]). Segmenti se formiraju prema osobenostima pojedinih zona oboda (narocito kod delova prizmaticnog i složenog oblika). Svaki segment ima sopstveno, nezavisno upravljanje.

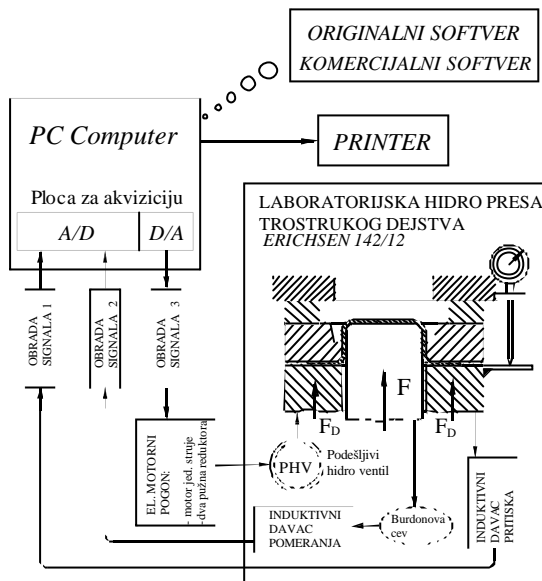


Slika 35: Segmentno izvođenje držaca

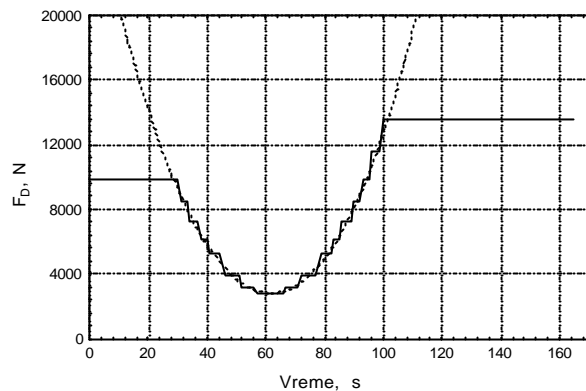


Slika 36: Shema upravljackog uređaja

U okviru razmatranja različitih sistema upravljanja važno mesto zauzima realizacija tzv. „closed loop” sistema. Rec je o pokušaju da se iskoristi sila držanja kao upravljajuća velicina koja utice na odabranu upravljajuću velicinu (recimo sila trenja na obodu, visina nabora itd.). Željeni zakon promene upravljane velicine se prethodno zadaje. Sistem automatizovano povratnom spregom reaguje na svako odstupanje od zadatog zakona (sl. 36. [33]). Konacni cilj bi bio realizovanje takvog upravljackog sistema koji bi autonomno bio u stanju da reaguje na sve promene tokom procesa i privede ga uspešno kraju. Iako su postignuti pozitivni rezultati ipak je potrebno prethodno (empirijski, na osnovu simulacije, eksperimenta itd.) definisati potrebne zakonitosti promene upravljanih velicina. Daleko je jednostavnije ostvariti tzv. „open loop” sisteme gde se prethodno definiše zakonitost upravljajuće velicine.



Slika 37: Shema eksperimentalnog sistema za upravljanje silom držanja



Slika 38: Primer optimirane zavisnosti sile držanja

Na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu razvijen je kompjuterski merno-upravljacki laboratorijski sistem za izucavanje uticaja promenljive sile držanja (sl. 37 [33]). Njegova glavna osobina je mogucnost zadavanja proizvoljne zavisnosti sile držanja od hoda tokom procesa („open loop”) i ostvarivanje regulacije sile izvlacenja (upravljana velicina) promenom sile držanja (upravljajuca velicina) cime se dobija varijanta „closed loop” sistema. Kontinualno se meri sila držanja i sila izvlacenja odgovarajucim davacima uz mogucnost mehanickog identifikovanja nabora na obodu. Opsežno istraživanje [33] je pokazalo znacajne efekte optimiziranih zavisnosti promenljive sile držanja, sl. 38, cak i na malim geometrijama cilindricnog i prizmaticnog kvadratnog komada od niskougljenicnog (sa i bez prevlaka na površini) i aluminijumskog lima.

3.3. Kompjuterska simulacija procesa plasticnog oblikovanja limova

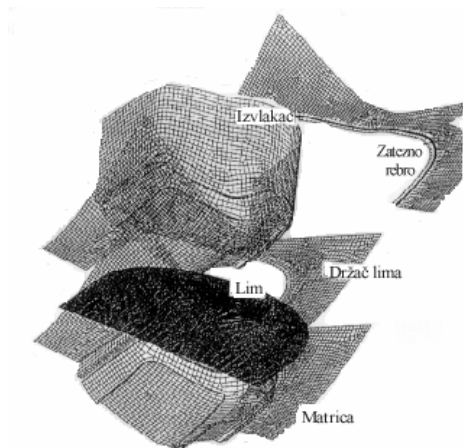
Osnovna ideja u ovoj oblasti je da se primenom matematicke teorije plasticnosti, numerickih metoda (najčešće MKE) i snažnih kompjutera dobije virtuelni prikaz (simulacija) citavog procesa oblikovanja. To pruža mogucnost korekcija, t.j. optimizacije, pre realizacije realnog procesa. Takođe, moguće je smanjiti, a ponekad i izbesci skupe eksperimentalne probe.

Tokom zadnje decenije usavršeno je nekoliko velikih programskih paketa za simulaciju plasticnog oblikovanja lima, od kojih treba pomenuti: PAM STAMP, LS-DYNA3D, OPTRIS, AUTO FORM i MTLFRM. Hardversko okruženje pružaju razlicite platforme (Unix i Linux radne stanice i Windows PC). Proces realizacije simulacije ide po sledecem redosledu [34]:

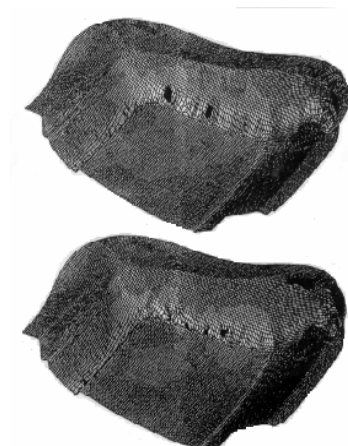
- 1) definisanje geometrije alata (izvlakac, matrica, držac) i razvijenog stanja (sl. 39 [35]),
- 2) definisanje mreže konacnih elemenata (sl. 40 [35]),
- 3) unos karakteristika materijala (kriva tecenja, r i n faktor, kriva granicne deformabilnosti, uticaj anizotropije u ravni lima, modul elasticnosti, Poisson-ov koeficijent itd.),
- 4) određivanje kinematike procesa i granicnih uslova na kontaktnim površinama,
- 5) definisanje tehnološkog postupka (broj i redosled operacija),
- 6) postprocesiranje rezultata (vizuelni prikaz geometrije, sl. 40, distribucije napona i deformacija, sl. 41 [36], parametara procesa, površinskih defekata, sl. 42 [35] itd.).

Najosetljivije i kritično mesto kod bilo kog softverskog paketa za simulaciju je mogucnost predikcije pojedinih defekata (nabori, stanjenje i lom, površinski defekti, devijacije oblika posle povlacenja elasticnih deformacija). Nijedan od aktuelnih softverskih paketa, i pored manje ili više, spektakularnih rezultata ne može u potpunosti da predvidi sve pomenute defekte.

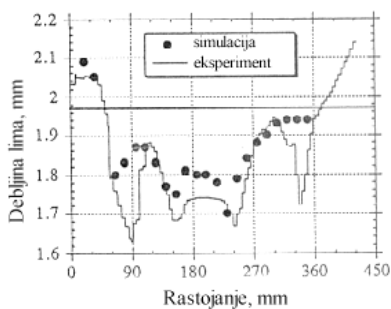
U cilju vrednovanja i unapredenja postojećih softverskih rešenja pokrenut je veliki medunarodni projekat 3DS (Digital Die Design Systems) [37], ciji rezultati treba da budu pouzdani eksperimentalni podaci uz minimalno rasipanje rezultata. Oformice se opsežna baza podataka univerzalnog internacionalnog znacaja, koji ce pomoci da nove verzije softverskih paketa budu u stanju da pouzdano definišu geometriju delova od lima tokom procesa i geometriju alata sa parametrima procesa da bi se u realnom izvođenju tacno ostvario željeni oblik. Preduslov za to su jasne definicije svih mogućih defekata i parametara koji ih određuju.



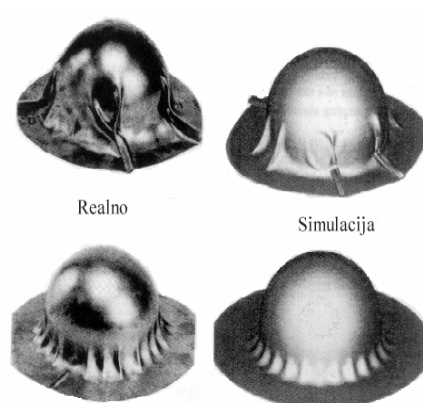
Slika 39: Geometrija elemenata alata i razvijenog stanja



Slika 40: Geometrija izvucenog komada alata sa sl. 38



Slika 41: Promena debljine lima po jednom preseku komada



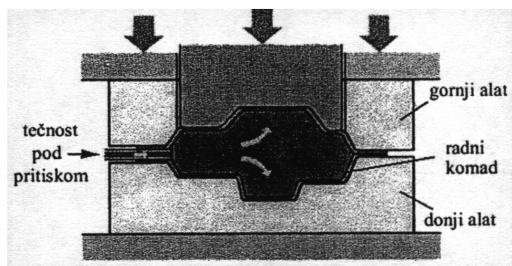
Slika 42: Poređenje izgleda komada (stvarno i simulacija)

3.4. Oblikovanje pod dejstvom fluida (Hidroforming)

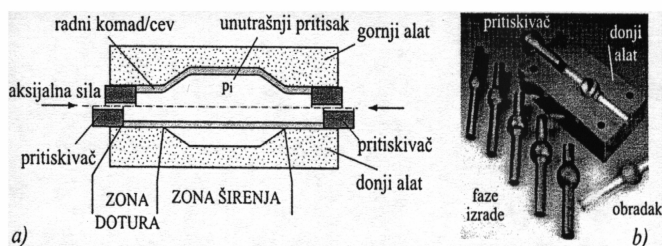
Ovakvi postupci, koje prema uobicajenim podelama nazivamo nekonvencionalnim, omogucavaju izradu delova od limova i cevi složene konfiguracije, koji se drugacijim postupcima mogu ili ne mogu uopšte dobiti. Veoma su pogodni za obradu teškodeformabilnoih materijala, kao što su celici povecane cvrstoce, nerdajuci celici, legure aluminiujuma i sl.

Najcešće primenjivani su tzv.postupci II klase oblikovanja- kada ulogu prenosa deformacione sile preuzima nestišljiv fluid [38]. Osnovne prednosti ovakvog oblikovanja su: smanjenje broja operacija, jednostavnija konstrukcija alata, povecanje fleksibilnosti alata i sl. Postoje suštinske razlike u hidrooblikovanju limova, cevi i ekstruzije. Kod oblikovanja limova dubokim izvlacenjem veoma je važno upravljati procesom tecenja, odnosno deformisanjem lima u otvoru matrice. Klasicno izvlacenje na mašinama jednostrukog ili dvostrukog dejstva realizuje se sa cvrstim držacem.

Kod realizacije hidromehanickog dubokog izvlacenja, umesto cvrste matrice uvodi se hidraulicni jastuk. Takođe, kod delova povišene cvrstoce i tacnosti, primenjuje se tzv. izvlacenje sa predoblikovanjem. U ovom slucaju se u prvoj fazi vrši slobodno oblikovanje pod dejstvom fluida u prostoru ispod izvlakaca, a zatim upumpavanjem tecnosti sa donje strane vrši završno oblikovanje oko cela izvlakaca koje igra ulogu matrice [39]. Slican postupak se primenjuje i kod superplasticnog oblikovanja limova, pri cemu je lim na obodu cvrsto fiksiran i nema uvlačenja u otvor matrice. Na ovaj nacin se pored gacanja predoblikovanjem, dodatno podiže cvrstoca izvucenog komada. Zanimljivo rešenje istovremenog izvlacenja dva komada od lima je pokazano na sl.43.(IFU Štuttgart).



Slika 43: Jednovremeno hidro-oblikovanje dva komada [39]



Slika 44: Hidrodeformisanje cevi [16]

Na sl.44. pokazana je idejna šema hidrodeformisanja cevi u dvodelnom alatu. Pod dejstvom pritiskivaca i unutrašnjeg pritiska koji se ostvaruje u radnom fluidu, realizuje se kombinovano opterećenje, koje omogućava postizanje visokih stepena deformacije na komadu. Slican je postupak dobijanja T-racve iz cevi [16].

3.5. Korišćenje lasera u TPO

Primena tzv. industrijskih lakih lasera u beskontaktnom savijanju ima posebnu primenu kod finih savijanja pri mikro oblikovanju. Prvi patent iz ove oblasti je objavljen u Japanu 1979 godine, za savijanje opruga elektro-relea. Osnovni postupci koji se mogu realizovati uz pomoc lasera su: lasersko oblikovanje, rezanje, spajanje, nanošenje prevlaka, izmena mehanickih karakteristika, sinterovanje laserskim zrakom. Moguce su samo male promene primenom svake radijacije (prolaza), ukoliko se ne radi konvencionalnim alatima. Moguca je primena kod savijanja složenih profila u automobilskoj industriji, posebno kod mikro-kalibracije komplikovanih relejnih uređaja. Laserska tehnologija zbog cene, ne može da zameni klasicne postupke oblikovanja. Npr. laserom je moguće oblikovati kašiku, ali to sa ekonomskog aspekta nema nikakvog opravdanja [40].

Znacajna je mogucnost primene lasera kod oblikovanja celika povecane cvrstoce. Npr., kod lakih konstrukcija od ovih celika i umanjena debljine sa 1,5 mm na 0,8 mm, zbog povecane cvrstoce umanjena je obradivost, te je posebno izražena elasticna povratnost. Delovanjem lasera u zoni savijanja (klasicno savijanje i savijanje na valjcima) lokalno se omekšava materijal, smanjuje se granica tecenja, te se znatno uvecava ugao savijanja. Znaci, ne samo da se smanjuje sila savijanja, vec se popravlja i obradivost. Uvecanje ugla savijanja zavisi od materijala, orijentacije pravca savijanja u odnosu na pravac valjanja, geometriju alata, i parametre lasera (snaga), kao i broj ciklusa- tretmana (zagrevanja). Npr. ako se broj zagrevanja poveca sa 48 na 100, granicni ugao savijanja se povecava sa 95 na 129 stepeni [41].

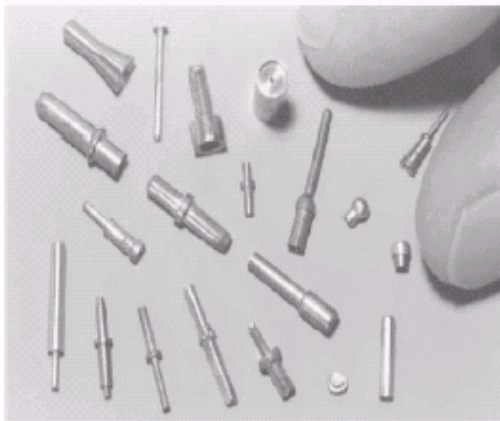
Korišćenjem lasera u materijalu se stvaraju termicki naponi, pri cemu je neophodno smišljeno upravljanje sa zaostalim deformacijama. Vrlo je efikasna je kombinacija rezanja i oblikovanja laserom u jednoj poziciji alata. Laser se može koristiti i u oblasti dubokog izvlacenja za postizanje veceg stepena izvlacenja uz pomoc lokalnih termickih tretmana. Naime, korišćenjem lasera, moguće je u pojedinim zonama komada koji se izvlaci postici ojacanja strukture cime se uvecava sposobnost za prenošenje vecih defomacionih sila. Prema [41], za leguru alumijuma AA 6016T4 posle ojacanja se podiže granicni stepen izvlacenja sa 2,1 n 2,6. (menjaju se mehanicke osobine materijala pri lokalnom termickom tretmanu). Posle određenog vremena, efekti veštackog starenja nestaju kod nekih legura alumijuma. Lasersko unošenje toplote zavisi od materijala, debljine lima, vrste materijala, snage lasera, precnika fokusa i brzine procesa.

3.6. Mikrooblikovanje

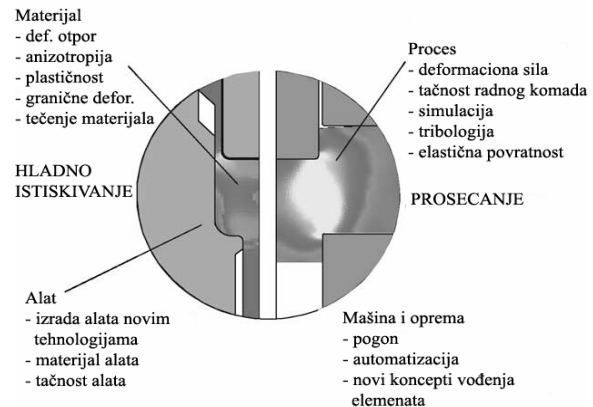
Proizvodnja mikro delova postaje sve prisutnija zbog trenda smanjivanja dimenzija proizvoda. Zahtevi za smanjivanjem dimenzija dolaze ne samo od potrošaca koji žele manje elektronske uređaje sa povecanim brojem funkcija vec su to potrebe pojedinih oblasti kao što su racunari, mobilni telefoni, medicinski uređaji itd. Ovi proizvodi pored ostalog sadrže i određene mehanicke delove kao što su: rucice, konektorski pinovi, sitni zavrtnjevi, kontaktne opruge itd. Na slici 45. prikazani su neki mikro delovi dobijeni istiskivanjem.

Pod mikro oblikovanjem podrazumeva se izrada delova cije su dimenzije reda velicine mikrometra [42]. Klasicni postupci obrade se mogu koristiti i kod mikrodelova ali se pri tome javljaju mnogi problemi zbog malih vrednosti dimenzija. Mikro oblikovanje se može uslovno podeliti na tri oblasti primene: zapreminsko oblikovanje, oblikovanje lima i oblikovanje profila.

Slicno makro obradnom sistemu, i u ovom slucaju imamo cetiri glavne komponente procesa oblikovanja, sl.46.



Slika 45: Primeri mikro-delova



Slika 46: Elementi sistema mikro oblikovanja [42].

Pored problema koji postoje i kod postupaka obrade rezanjem kao što su: geometrija alata, habanje, termicka obrada materijala, javljaju se određene poteškoce pri plasticnom oblikovanju kao posledica smanjenih dimenzija delova. Deformacioni otpor, anizotropija, plasticnost i granicne deformacije zavise od reda velicine dimenzija i to se mora uzeti u obzir pri analizi procesa [43]. Takode parametri procesa kao što su: deformaciona sila, elastična povratnost, trenje, zavise od velicine dimenzija.

Osnovni problem vezan za alat predstavlja njegova izrada, jer je veoma složeno napraviti alat malih dimenzija. Da bi se to rešilo uvode se i nove tehnologije izrade (npr. snop elektronskih zraka i litografski postupak). Pored toga javljaju se problemi vezani za mašine i pratecu opremu. Neodgovarajuće vrednosti zazora između alata mogu rezultirati dobijanjem potpuno neodgovarajucih komada. Vadenje delova je otežano zato što su površine veoma male a težina delova manja u odnosu na adhezivne sile. Razvoj adekvatne merne tehnologije za delove i alat takode predstavlja problem. Izrada delova zahteva radni prostor sa strogo definisanim karakteristikama (tzv. *clean room*) cime se proces dodatno poskupljuje.

Istraživanja su pokazala da pri oblikovanju mikro delova neki parametri ostaju isti i pored smanjivanja dimenzija. Mikrostruktura materijala je nezavisna od velicine dimenzija. Takode i topografija površine ostaje nepromenjena. Usled smanjivanja dimenzija odnos između dimenzija delova i parametara mikrostrukture ili topografije površine se menja. To dovodi do tzv. efekta velicine, koji znacajno utice na ponašanje materijala i proces trenja.

Istraživanja mikro oblikovanja i efekata minijaturizacije se vrše uobicajenim testovima koji su se dosada koristili pri cemu se vodi racuna o poštovanju geometrijske slicnosti. To znaci da se dimenzije komada i alata određuju preko faktora geometrijske slicnosti λ . Ogranicavajući vreme odvijanja procesa na vrednost 1 i brzina deformisanja se izražava preko faktora λ .

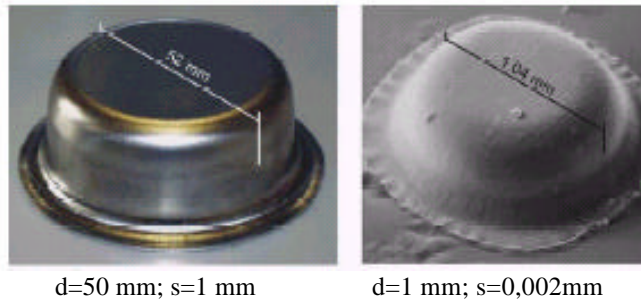
Eksperimenti su pokazali da pri minijaturizaciji dolazi do pada deformacionog otpora. Kod testa zatezanja pri smanjivanju debljine lima sa 2 mm na 0,17 mm ostvaren je pad deformacionog otpora od 30%. Testovi su izvršeni pri istoj velicini zrna što ukazuje da je smanjenje otpora nastalo usled minijaturizacije i nije posledica razlicite strukture materijala. Smanjenje deformacionog otpora se objašnjava pomocu tzv. modela površinskih slojeva koji se zasniva na cinjenici da se materijal u oblasti mikro dimenzija ne može posmatrati kao homogeni kontinuum. Presudan kriterijum je odnos velicine zrna prema dimenzijama komada. Kod mikro delova udeo površinskih zrna je veoma veliki u poređenju sa zapreminskim [44].

Kod testa zatezanja limova dolazi do još jedne pojave koja je posledica efekta velicine. Koeficijent normalne anizotropije opada sa smanjivanjem dimenzija. To znaci da se obradivost pogoršava sa smanjivanjem dimenzija jer dolazi do intenzivnijeg stanjivanja što predstavlja posebno negativnu pojavu pri dubokom izvlacanju. Takode pri minijaturizaciji se smanjuje ravnomerno izduženje.

Tribološke karakteristike mikrodelova u velikom stepenu zavise od površinskih interakcija te je neophodno ove odnose razmatrati u okviru tzv. mikro-tribologije, odnosno mora se koristiti specijalna oprema - atomski mikroskopi i specijalni mikro tribometri [45].

Vecina obavljenih istraživanja je izvršena za postupke savijanja i prosecanja. Mikro duboko izvlacenje je bilo predmet manjeg broja istraživanja zbog kompleksnijeg uticaja anizotropije i trenja na sam proces. Oblikovanje mikro delova odvija se na isti nacin kao i dobijanje delova uobicajenih dimenzija. Istraživanja u radu [46] vršena su sa celicnim limom debljine 0,1 mm i pokazala su da postoji uticaj debljine lima na stepen izvlacanja. Posmatrajuci porast relativnog precnika (definiše se kao odnos precnika izvlakaca sa debljinom lima) došlo se do cinjenice da dolazi do opadanja stepena izvlacanja sa njegovim povecanjem. Za vrednosti relativnog precnika ispod 10 uoceno je da savijanje predstavlja dominantan mehanizam deformisanja s obzirom da je uticaj sile držanja minimalan. Na sl.47. pokazani su primeri makro i mikro izvucenih delova [46].

S obzirom na pogoršavanje karakteristika materijala i smanjenje obradivosti pri smanjenju dimenzija, delovanjem lasera u zoni oboda komada, gde se i ostvaruju najveći stepeni deformacija, moguće je poboljšati uslovi tecenja materijala i postići veće stepene izvlacenja [47].



Slika 47: Makro i mikro deo dobijeni izvlacenjem

4. ZAKLJUCAK

Obrada metala plasticnim oblikovanjem je jedan od najznacajnih postupaka prerade metala u industriji razvijenih zemalja. Savremene sisteme TPO karakteriše sinergijski efekat između komponenata i elemenata sistema. Izvršni deo obradnog sistema u neposrednoj vezi je sa ostalim elementima sistema: znanjima iz fundamentalnog dela teorije plasticnosti uključujući analizu procesa i projektovanje (numericko-fizicko modeliranje), tehnologijom materijala, tribologijom, tehnologijom alata, mašinom i sistemom automatizacije procesa, poslovnom politikom preduzeća. Ovako definisana struktura problema podrazumeva integrisanost pomenutih modula u ekonomskom okruženju kao dinamičkom sistemu, koji se neprekidno razvija, u skladu sa tržištem, uzimajući u obzir troškove energije, poboljšanje kvaliteta, produktivnost i fleksibilnost, posedujući osobine napredne ekonomije.

Moderan razvoj TPO karakteriše stalno usavršavanje postojećih postupaka, alata i mašina, i razvoj novih materijala, generišući i integrišući nove postupke i tehnologije, na bazi ključnih fundamentalnih istraživanja. Buduća istraživanja se neminovno moraju ostvarivati kao multidisciplinarna, kroz saradnju eksperata iz različitih oblasti: metalurgije, tribologije, plasto-mehanike, konstrukcije alata, materijala, fizike, kompjuterskih nauka, termodinamike i sl., imajući za cilj nova i viša dostignuća u ovoj oblasti.

LITERATURA

- [1] K.Lange, Modern metal forming technology for industrial production, Journal of Materials Processing Technology, 71 (1997), 2-13.
- [2] K.Matsuno, Recent research and development in metal forming in Japan, Journal of Materials Processing Technology, 66 (1997), 1-3.
- [3] M.Plancak, Brza izrada protipova, modela i alata, Monografija, FTN, Novi Sad, 2004.
- [4] D.Y.Yang, D.G.Ahn, C.H.Lee, C.H.Park, T.J.Kim, Integration of CAD/CAM/CAE/FP for the development of metal forming processes, Jour. of Materials Processing Technology 125-126 (2002), pp. 26-34.
- [5] V.Mandic, M.Stefanovic, Review and characteristics of some materials used in physical modeling of the bulk metal forming processes, Journal for Technology of Plasticity, vol.24, No.1-2, Novi Sad 1999, str.15-32.
- [6] V. Mandic, Fizicko modeliranje i numericka simulacija kao osnova novog koncepta projektovanja alata za toplu zapreminsku obradu, Doktorska disertacija, decembar 2002, Mašinski fakultet u Kragujevcu.
- [7] V. Mandic, M. Stefanovic, Elimination of Flow Defects in the Forward Extrusion Process by Changing Friction Conditions, BALKANTRIB 05 - 5th International Conference of Tribology, Kragujevac, 2005.
- [8] V. Mandic, M. Živkovic, S. Vulovic, T. Marinkovic, FEM Analysis for the Extrusion Process of Tubes using Porthole Dies, Journal for Technology of Plasticity, Novi Sad, 2004, vol.29, No ½, pp. 35-43.
- [9] B. Mišić, V. Mandic, S. Rajić, Primjena CAMPform 2D softverskog paketa u analizi zapreminskog deformisanja cijevnih izradaka, 1. ? ?dunarodno savjetovanje – Informatika u proizvodnom i poslovnom menadžmentu, Doboj 2004, str. 118-126.
- [10] M. Plancak, D.Vilotić, M. Stefanovic, M. Milutinovic, V. Mandic, Cold Indenting -UBET Analysis, FE Simulation and Experimental Verification, Journal Steel Grips 2, 2004, The 10th International Conference Metal Forming 2004, Krakow, 2004.

- [11] V. Mandić, D. Vilotić, M. Plancak, M. Stefanović, Hladno višefazno zapreminsko oblikovanje osnosimetričnih obradaka – FEM simulacija i eksperimentalna verifikacija, Zbornik sa XXXI Jupiter konferencije (27. symposium NU-ROBOTI-FTS), Zlatibor 2005.
- [12] M.Meidert, M.Hansel, Net shape cold forging to close tolerances under QS 9000 aspects, Journal of Materials Processing Technology 98 (2000)150-154.
- [13] R.Balendra, Nett-shape forming:state-of-the-art, Journal of Materials Processing Technology 115(2001)172-179.
- [14] V.Vujović, Deformabilnost, Monografija, FTN Novi Sad, 1992.
- [15] V.Marinković, Deformaciono ojačanje materijala u procesima obrade deformisanjem u hladnom i toplom stanju, Mašinski fakultet u Nišu, 1995.
- [16] M.Plancak, D.Vilotić, Tehnologija plasticnog deformisanja, FTN, Novi Sad, 2003.
- [17] M.Šljivić, M.Stanojević, Osnove proizvodnih tehnologija, Mašinski fakultet u Banja Luci, 2003.
- [18] K.D.Bouzakis, G.Maliaris, A.Tsoknidas, FEM Simulation of Induction Heating of Aluminium Specimens for Thixoforming Processes, 1st International Conference on Manufacturing Engineering, Halkidiki, 2002, Proceedings, pp.617-623.
- [19] www.shef.ac.uk
- [20] P.Popović, Mašine za obradu deformisanjem, I deo, Mašinski fakultet u Nišu, 1991.
- [21] LX.Long, S.Nahavandi, On-line tool condition monitoring and control system in forging processes, Journal of Mater. Proc. Techn.,125-126 (2002) 464-470.
- [22] www.thefabricator.com
- [23] Devedžić B. Kriterijumi dostizanja granicne obradivosti metala plasticnim deformisanjem, Tehnika, Mašinstvo, 34, 1985, 9, 1333-1344.
- [24] Technology for Sheet Metal Stamping, www.forming.com
- [25] Nonomura K., Tamada K., Ohno N. Stamping Engineering for Body Weight Reduction, IBEC '97, Body Assembly & Manufacturing, 17-25.
- [26] ASAME-Automated Strain Analysis and Measurements Environment, CamSys., Inc., 1994.
- [27] Stefanović M., Aleksandrović S., Milovanović M., Jevtić R. High Strength Steel for Automotive Panels and their Formability, Metall. and New Mater. Res., 1998., VI, 4, 29-42.
- [28] Hayashi H., Nakagawa T. Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels, Journal of Mater. Process. Techn., 46, 1994, 455-487.
- [29] Ultralight Steel Autobody, www.ULSABfinalmedia.htm
- [30] Stefanović M., Aleksandrović S., Romhanji E., Milovanović M. Al-Alloys Sheet Metals - Advanced Materials for Application in Car Bodies, J. for Techn. of Plasticity, Vol. 26(2001), 1, 21-32.
- [31] Finckenstein E., Drewes J., Deep Drawing Simulation of Vibration Damping Steel Sheets, 19th IDDRG Biennial Congress, Eger, 2000., Proceed., 215-230.
- [32] Ž.Babić, M.Šljivić, Nove tehnologije u izradi karoserije automobila, VII Medunarodna konferencija DEMI 2005, Banjaluka, Zbornik radova, str. 183-190.
- [33] Aleksandrović S. Duboko izvlačenje tankih limova pri nemonotonom deformisanju sa promenljivim tribološkim uslovima, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2000.
- [34] Gantar G. Racunalske simulacije procesov preoblikovanje pločevine, Tecos Novice, 1998, IV, 4, 1-4.
- [35] Lefebvre D., Haug E., Hatt F. Industrial application of computer simulation in stamping, Journ. of Mat. Proc. Techn., 46 (1994): 351-389.
- [36] El Mouatassim M. et al. The simulation of multi-operation deep-drawing process at RENAULT with PAM STAMP, J. Mater. Process. Technol., 45, 1994., 317- 322.
- [37] Makinouchi A., Teodosiu C. Numerical methods for prediction and evaluation of geometrical defects in sheet metal forming, Computational Fluid and Solid Mechanics, 2001, pp. 21-25.
- [38] B.Rančić, Oblikovanje delova od lima nestišljivim fluidom, Monografija, Mašinski fakultet u Nišu, 2005 (u štampi)
- [39] K.Siegert, M.Haussermann, B.Losch, R.Rieger, Recent developments in hydroforming technology, Journal of Mater. Process. Technology, 98 (2000)251-258.
- [40] M.Geiger, Laser Forming – The Forming of Metal Using a Laser Beam, 1st International Conference on Manufacturing Engineering, Halkidiki, 2002, Proceedings, pp.9-24.
- [41] M.Merklein, M.Geiger, New materials and production technologies for innovative lightweight constructions, Journal of Materials Processing Technology, 125-126 (2002), 532-536.
- [42] U.Engel, R. Eckstein: Microforming-from basic research to its realization, Journal of Materials Processing Technology, 125-126, 2002, 34-44.
- [43] M.Samardžić, M.Stefanović, S.Aleksandrović, T.Vujinović, Uvod u tribološka istraživanja pri oblikovanju mikrodela izvlačenjem, 9. Konferencija YUTRIB 2005, Kragujevac, Zbornik radova, 840-845.
- [44] F. Vollersten, Z. Hu, H. Schulze Niehoff, C. Theiler: State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing, Journal of Materials Processing Technology 151, 2004, 70-79.

- [45] Z. Rymuza K. Kato: Micro tribology, editorial, *Wear*, 254, 2003, 931.
- [46] Y. Saotome, K. Yasuda, H. Kaga: Microdeep drawability of thin sheet steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 2001, 641-647.
- [47] X. Peng, Y. Qin, R. Balendra: Analysis of laser-heating methods for micro-parts stamping application, *Journal of Materials Processing Technology*, 150, 2004, 84-91.