



Technologies of Plastic Deformation and I4.0 as a Precondition for Industrial Development

Tehnologije plastičnog deformisanja i I4.0 kao preduslov industrijskog razvoja

S. Randelović^{*1}, A. Zorić², N. Kostić¹, S. Mladenović¹, M. Trajković Milenković²

¹ University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, Niš, Serbia

² University of Niš, Faculty of Civil Engineering, Niš, Serbia

Abstract: *The industrial development of a company is based on the scientific achievements of both its own researchers and the application of the latest global results in the chosen field with rich inherited experience. The combination of these three elements today represents a prerequisite for the generation of top industrial products. Technologies of plastic deformation and elements of I4.0 represent compatible industrial areas where new technological solutions of mass production find their way to users very quickly. We have the opportunity to evaluate finished products precisely by the application and implementation of those new solutions both in the field of technology design and in the field of tool construction, application of new numerically controlled machines, and all in the context of I4.0.*

Keywords: *I4.0, deep drawing, FEM, CAD, CAPP.*

Apstrakt: *Industrijski razvoj jednog društva zasniva se na naučnim dostignućima kako sopstvenih istraživača tako i primeni najnovijih globalnih rezultata u izabranoj oblasti uz bogato nasleđeno iskustvo. Spoj ova tri elementa danas predstavlja preduslov za generisanje vrhunskih industrijskih proizvoda. Tehnologije plastičnog deformisanja i elementi I4.0 upravo predstavljaju kompatibilne industrijske oblasti gde nova tehnološka rešenja masovne proizvodnje nalaze vrlo brzo put do korisnika. U prilici smo da gotove proizvode ocenjujemo upravo po primeni i implementaciji tih novih rešenja kako u oblasti projektovanja tehnologija, tako i u oblasti konstrukcije alata, primene novih numerički upravljanih mašina a sve u kontekstu I4.0.*

Ključne reči: *I4.0, duboko izvlačenje, FEM, CAD, CAPP*

1 UVOD

Današnji industrijski razvoj predstavlja izazov koji se ogleda u vrhunskoj kombinaciji različitih tehnologija i njihovih rezultata sa ciljem ostvarivanja prednosti na globalnom tržištu. Finalni proizvodi kao rezultat njihovog razvoja, predstavljaju pravo malo savršenstvo gde se vidi naporan i posvećen rad uz bogatu tradiciju i prikupljeno iskustvo. Iako takvi rezultati ne dolaze iznenada, primena novih tehnologija pruža šansu i konkurentima koji brzo uče da nađu svoje mesto na tržištu gde je kupac u fokusu. Gotovo da nije moguće danas napraviti bilo kakav iskorak bez primene informacionih tehnologija, istraživanja novih materijala, primene

nekonvencionalnih tehnologija, primene robota, optimizacionih matematičkih modela, veštačke inteligencije, a sve u cilju da se napravi komparativna prednost nad glavnim konkurentima. Iako su ovde u fokusu dobro poznate industrijske tehnologije za koje se vezuje odrednica klasična, obična, staro-dobro i sl, stvari su otišle mnogo dalje. U osnovi svega su nova znanja ali koja sada mnogo brže nalaze primenu, generišući rezultate koji su plod timskog rada i sveobuhvatnog pristupa. U fokusu ovog rada je tehnologija dubokog izvlačenja nerotacionih elemenata koja sve više nalazi primenu kod vrlo zahtevnih gotovih proizvoda auto industrije (*Slika 1*).

Jedno od ključnih pitanja koje se postavlja je

*sassa@masfak.ni.ac.rs

veličina zaostalih napona nakon plastičnog deformisanja. Iako se zaostali naponi unutar deformabilnog kontinuuma uspešno mogu ukloniti procesom žarenja ide se ka tome da njihove vrednosti budu što niže u samom procesu dubokog izvlačenja [1]. Oni imaju veliki uticaj na oblik i dimenzije gotovog dela, izdržljivost, žilavost, statičku i dinamičku čvrstoću, period do zamora, otpornost na pucanje i prostiranje loma, magnetičnost i sl. Činjenica da zaostali naponi u limu nakon plastične deformacije uvek postoje i da mogu dovesti do neželjenih efekata upravo se radi se na njihovoj predikciji putem savremenih FEM softvera i izabranih modela optimizacije.



Slika 1 - Vitalni elemenat šasije savremene auto industrije

Kuriyama i koautori su razvili poseban FEM softver za određivanje zaostalih napona po deformabilnoj zapremini izvučenog elementa u obliku limenke [2]. Oni su dobili potpuno različitu raspodelu zaostalih napona s obzirom na međusobni položaj matrice i izvlakača. Incandela i koautori u svom radu predstavili su eksplicitni algoritam za kvazi statički model preko konačnih elemenata za određivanje zaostalih napona i deformacija [3]. Padmanabhan i koautori napravili su numerički FEM model koji su namenili za analizu procesa izvlačenja boca za tečni naftni gas [4]. Oni su razmatrali promenljivu silu držanja i uslove trenja na kontaktu u specifičnim tačkama izvučenog dela tokom procesa.

Geometrijska i dimenziona tačnost gotovog dela je od presudne važnosti za dalji tok proizvodnje. Pourkamali i koautori razmatrali su debljinu zida izvučenog elementa po visini, deformacionu silu i zaostale napone pri višeoperacijskom izvlačenju kako na FEM modelu tako i na samom izvučenom element [5]. Korišćenjem FEM simulacije Singh i koautori [6] su ispitali kvalitet i zaostale napone u procesu

izvlačenja sa stanjenjem s obzirom na raspored debljina po obimu zida izvučenog elementa. Đorđević i koautori [7] prepoznaju složenost procesa izvlačenja kod kompleksnih delova od legure aluminijuma, kako na pravolinijskim tako i na zaobljenim ivicama pravougaonog elementa u uglovima gde upravo dolazi do pravog procesa dubokog izvlačenja. Oni razvijaju fizički tribološki model klizanja između ravnih ploča pod promenljivim pritiskom u posebno projektovanom eksperimentalnom alatu koji se upravlja računom analizirajući više uticajnih faktora. Izmenom maziva na kontaktnim površinama oni prate uticaj na veličinu sile izvlačenja lima. U svom radu Padmanabhan i koautori [8] razmatrali su zaostale napone usled neujednačene deformacije kod predhodno krojenih i zavarenih limova od različitih čelika s obzirom na efekat elastičnog ispravljanja kod procesa dubokog izvlačenja.

Hassan i koautori napravili su predikciju elastičnog ispravljanja [9] za dvofazne čelične limove boljih mehaničkih karakteristika (HSS i AHSS) DP600 (0.122%C, 1.460%Mn, 0.055%Si) i DP1000 (0.14%C, 1.4%Mn, 0.03%Ni, 0.053%Si) i hladno valjani lim DC04 (0.08%C, 0.4%Mn, 0.08%Si) koji se koriste u automobilskoj industriji za poboljšanje performansi pri sudarima. Oni su predložili smanjenje efekta elastičnog ispravljanja sa promenljivom silom držanja lima. Sherbiny i koautori [10] su napravili poseban softverski podprogram u poznatom i proverenom softveru ABAQUS za metodu konačnih elemenata koji prati geometrijske i fizičke parametre na raspored zadebljanja i stanjenja kod izvučenog elementa, efekat stanjenja i maksimalne zaostale napone kod anizotropnih materijala pri uprošćenim graničnim uslovima. Rossini i koautori [11] su posebnu pažnju posvetili merenju zaostalih napona preko mernih traka na samom zidu izvučenog elementa naglašavajući fizička ograničenja destruktivnih, poludestruktivnih i ne destruktivnih metoda. Shuhui do detalja daje prikaz osnovnih principa dubokog izvlačenja [12], objašnjenje fundamentalnih parametara i naprednih tehnologija u ovoj oblasti. Daje objašnjenje pojedinačnih parametara, grešaka i defekata koji

mogu da se jave i procenu deformabilnosti. U radu su dati i specijalni postupci dubokog izvlačenja kao što su hidroforming, oblikovanje gumom i drugim aktivnim medijumima kako na temperaturi okoline tako i na povišenim temperaturama.

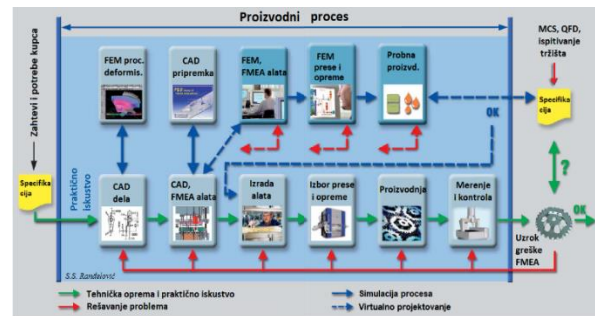
Lingbeek i koautori su pokazali FEM simulacioni model procesa dubokog izvlačenja [13] gde se vide potpuno drugačiji rezultati ukoliko se modeli izvlakača i matrice izaberu kao kruto odnosno deformabilno telo iako se radi o relativno malim deformacionim silama duboko izvučenog kompleksnog osnosimetričnog prizmatičnog elementa. Ken-ichi i koatori [14] su izveli test izvlačenja cilindričnih elemenata od superplastičnih materijala, debljine 1mm, sproveden na povišenoj temperaturi kako bi se povećao odnos izvlačenja, tačnost i kvalitet gotovog dela a u zavisnosti od brzine deformacije. Uticaj sile držanja lima i njen efekat kao i brzine deformisanja, odnosno brzine kretanja izvlakača, na pojavu nabora na vencu elementa razmatrani su teoretski ali i eksperimentalno. Istovremeno variranje sile držanja lima ima veliki uticaj na izvodljivost procesa i ravnomernu debljinu zida izvučenog elementa dok povećana brzina izvlačenja ima uticaj na ukupno trajanje procesa odnosno njegovo skraćenje.

U radu se daju smernice i modeli za savremene procese dubokog izvlačenja koji mogu da generišu tehnološka rešenja i kod najzahtevnijih prostornih površina lima a koje vrlo često mogu da se nađu kod industrijskih proizvoda. Takve tehnologije zahtevaju odlično poznavanje karaktersitika samog materijala, geometrijsko modeliranje i simulaciju same plastične deformacije, konstruktivno rešenje alata i projektovanje procesa u postojećim industrijskim uslovima.

2 PROIZVODNI PROCESI DANAS

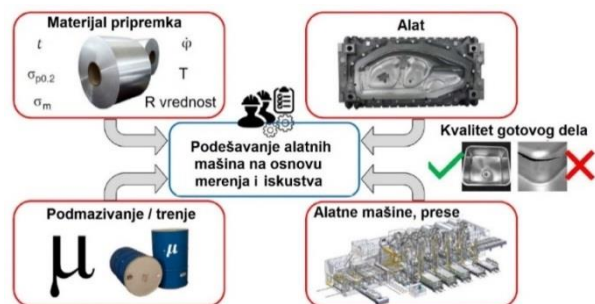
Nezaobilazne informacione tehnologije, koje danas dotiču svaki segment društva, postale su nezamenljiv činilac industrijske i tehnološke realnosti. Ne samo da su primenljive i prisutne u rešavanju mnogih problema već se govori o brzini ali i tačnosti dobijenih rezultata. Ukoliko se posmatra proizvodni proces kao jedna organizaciona celina kompanije, mogu da se

prepoznaju različite aktivnosti projektovanja, konstruisanja, provere, analize a koje su podržane računarskom opremom (Slika 2).



Slika 2 - Savremen proizvodni proces

Dobar primer implementacije industrije 4.0 su tehnologije prerade lima plastičnim deformisanjem gde je znatno povećana produktivnost i kvalitet proizvoda prema zahtevima kupca. To je slikovito prikazano na Slici 3 koja naglašava ulogu definisanog kvaliteta, tačnosti i karakteristika materijala, uslova trenja primenom odgovarajućeg maziva, konstruktivnog rešenja i parametara alata ali i proizvodnih i dinamičkih karakteristika pojedinačnih presa i grupnih linija za presovanje. Naglašena uloga trenja u ovakvim procesima neophodna je zbog velikih kontaktnih napona u alatima koji direktno utiču na zaostale napone u limu i njegovu krajnju plastičnu deformaciju. Upravo na tim kontaktim površinama treba obezbediti neprekidan sloj ulja kako bi postojalo permanentno klizanje dodirnih površina alata i materijala lima. Sve to objedinjuje stalno prikupljanje podataka i merenje uz dugogodišnje, bogato iskustvo koje ostaje neizbežan činilac i odlučujući faktor u generisanju novog proizvoda [3, 8].



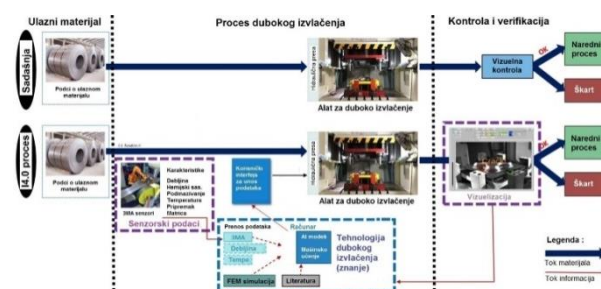
Slika 3 - Ključni činilci tehnologija plastičnog deformisanja

Postavlja se pitanje šta će imati dominantnu ulogu u narednom periodu, iskustvo ili akvizicija,

merenje i prikupljanje podataka na osnovu kojih se generiše nova tehnologija? Činjenica je da smo svedoci pojave novih materijala koji neminovno donose nove tehnologije sa novim alatima i mašinama u procesima koji na izlazu generišu novi proizvod. Zapravo, to su stari proizvodi ali sa potpuno novim karakteristikama koje kupac upravo želi da vidi. U takvoj situaciji nekada dragoceno iskustvo više nema dominantnu ulogu, čak šta više ono i ne postoji kao komponenta ljudskog razmišljanja, jer se problemi rešavaju mnogo brže i sveobuhvatnije uz pomoć računara i veštačke inteligencije. To znači da je projektant izgubio trku sa računarom i prepustio tu ulogu softveru koji objedinjuje kako nova znanja, iskustvo ali i trenutno prikupljene parametre kako bi se našlo optimalno rešenje. Naravno da je čovek iznad svega ali softver je postao toliko moćan da donosi trenutna rešenja, optimizovana po svim kriterijumima. Sve ove promenljive parametre i veličine najčešće je teško izmeriti za vreme trajanja samog procesa. Jedino u slučaju kada one imaju značajano loš uticaj na kvalitet dela i povećanje škartu operater mora da pristupi dodatnom podešavanju ključnih parametara (korekcija alata, brzina deformisanja, deformaciona sila, hod, vrsta i količina maziva, temperatura i sl.). Po pravilu to je moguće kod jednostavnijih tehnoloških rešenja i manjeg broja procesnih parametara. Sa povećanjem kompleksnosti proizvoda i višeg tehnološkog nivoa, pri uskim vremenskim rokovima, to nije moguće uraditi uz zadovoljavajuću efikasnost i zadati nivo kvaliteta.

Krajnji cilj industrije 4.0 kod ovakvih tehnologija je autonomni proces oblikovanja materijala (Slika 4) koji je već dobro poznat u nekim drugim delatnostima, poput automobila kome vozač i nije baš više neophodan. Proizvodni proces velikoserijske prerade lima započinje nabavkom materijala najčešće u koturovima (ili tablama) gde se na samom ulazu proverava njegov kvalitet (Slika 4). Implementacijom I4.0 menja se tok čitavog proizvodnog procesa u koji je sada prisutno mnogo više senzora i kontinuiranog monitoringa gde se direktno prate određeni kritični parametri. Preuzeti digitalni signal analizira se implementiranim algoritmom

mašinskog učenja da bi se formirao model digitalnog blizanca ili algoritam za inteligentnu kontrolu kao što su transport dela, podešavanje prese, praćenje kvaliteta i sl. Kao i kod gore pomenutog automobila, proizvodni proces plastičnog deformisanja se sam prilagođava novonastalim uslovima. Kada implementirani algoritam veštačke inteligencije bude obučen na velikom broju ulazno izlaznih podataka (obučavanje veštačkih neuronskih mreža) sam proces plastičnog deformisanja postaje autonoman i prilagodljiv novonastalim uslovima (Slika 4). Ovakvi procesi mogu se naći upravo u automobilskoj industriji, gde se radi o velikim serijama, sa različitim materijalima, kvaliteta i karakteristika, i gde se vrše neprekidna i brza prilagođavanja novonastalim uslovima na globalnom tržištu [4, 9].



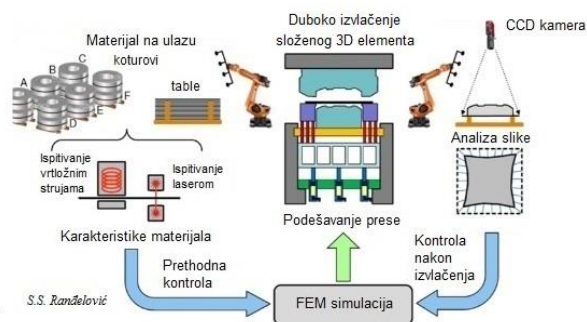
Slika 4 - Sadašnja i buduća industrijska prerada lima po modelu I4.0

3 DUBOKO IZVLAČENJE NESIMETRIČNIH ELEMENATA U ALATU SA SEN-ZORIMA

Navedena tehnička oprema i pomenuti senzori se mogu primeniti za kontinualno prikupljanje podatka o materijalu (granica plastičnog tečenja, zatezna čvrstoća, ravnomerno izduženje i izduženje do kidanja, veličina zrnaste strukture itd.) i određivanje njihovih optimalnih vrednosti za FEM simulaciju procesa dubokog izvlačenja (Slika 5).

Naravno da to nije dovoljno u nekim specifičnim procesima (npr. duboko izvlačenje nerotacionih elemenata) ali uz neposredno dobijene podatke kamerom sa gotovog dela to će upotpuniti FEM analizu i tačnost dobijenih rezultata [10, 14]. Njihovim variranjem i promenama u opsegu realnih vrednosti, generisanim FEM modelom i proverom na

simulacionom modelu procesa (Structural Simulation software, SIMULIA) moguće je naći optimalno rešenje za date realne uslove proizvodnje u kojima se proces dubokog izvlačenja realizuje. Iako ovakvi softverski paketi omogućavaju potpuno virtualno projektovanje tehnologije dubokog izvlačenja, bez realnih parametara, definisanjem njihovih opsega realnih fizičkih granica samo doprinosi generisanju optimalnijeg rešenja za elemente kompleksne geometrije.



Slika 5 - Proces dubokog izvlačenja po modelu I4.0

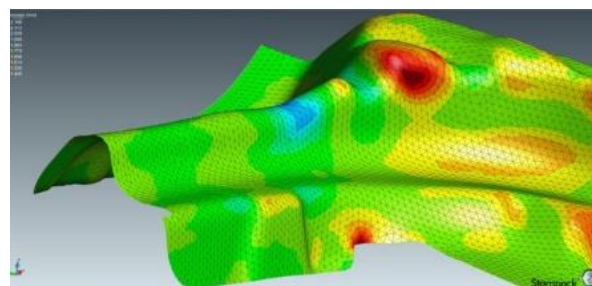
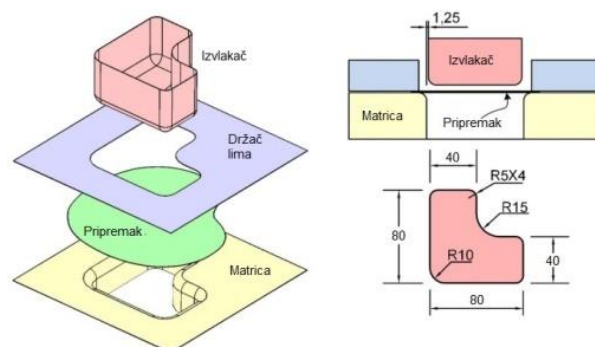
Jedan viši nivo ispitivanja ulaznog materijala za procese oblikovanja lima jeste uspostavljanje korelacije između mehaničkih i magnetnih svojstava dobijenih bez razaranja. Studije pokazuju dobru korelaciju između merenja (3MA senzora – mikromagnetna, multiparameterska, mikrostrukturna naponska analiza) i mehaničkog ispitivanja zatezanjem uz neophodnu prethodnu kalibraciju za svaki ulazni materijal. Postavljanjem senzora neposredno iznad ili ispod lima, moguće je kontinualno prikupljanje podataka pre samog procesa plastične deformacije. Ukoliko dobijeni rezultati posluže kao osnova za mašinsko učenje onda je moguće određivanje najboljih parametara za proces dubokog izvlačenja u datim uslovima (Slika 6).



Slika 6 - Postupak kalibracije za 3MA sensor

Predmet mnogih istraživanja je upravo praćenje plastičnog tečenja materijala nesimetričnih elemenata tokom procesa dubokog izvlačenja složenih priprema (Slika 7) [7, 11].

Naponsko deformacioni uslovi deformisanja se potpuno razlikuju na pravim delovima i na uglovima gde se zahtevaju isti ili promenljivi radijusi različitih veličina.

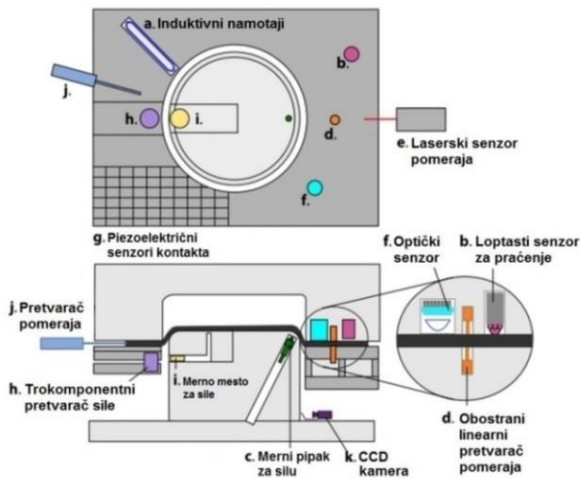


Slika 7 - Geometrijski model procesa izvlačenja i primer složenog nesimetričnog elementa

Dobijeno polje deformacija u tri normalna pravca, na vencu direktno uslovljava greške prilikom izvlačenja. Merenje deformacija i sila po celom obimu nije jednostavno pa se iz tih razloga biraju karakteristična mesta gde se očekuju neravnomernosti u procesu plastičnog deformisanja. Na tim mestima se postavljaju različiti senzori koji u svakom trenutku prate izabranu karakterističnu veličinu procesa deformisanja. Ovakvih primera pametnih alata sve je više jer su geometrije gotovih elemenata sve složenije i zahtevnije (Slika 7) [5, 12].

Primena različitih senzora i pretvarača ilustrovana je na geometrijskom modelu procesa dubokog izvlačenja osnosimetričnog elementa (zbog jednostavnosti prikaza) na Slici 8. Implementacijom induktivnih namotaja *a* unutar matrice, na čelični pripremak se dejstvuje promenljivim poljem magnetne indukcije koja uslovljava različitu brzinu priprema po obimu nepravilne konture prilikom dubokog izvlačenja. Pojava i najmanjih neravnina u vidu nabora biće praćena senzorom sa sfernim kontaktom *b*,

optičkim senzorom *f* i obostranim linearnim pretvaračem pomeraja *d*.



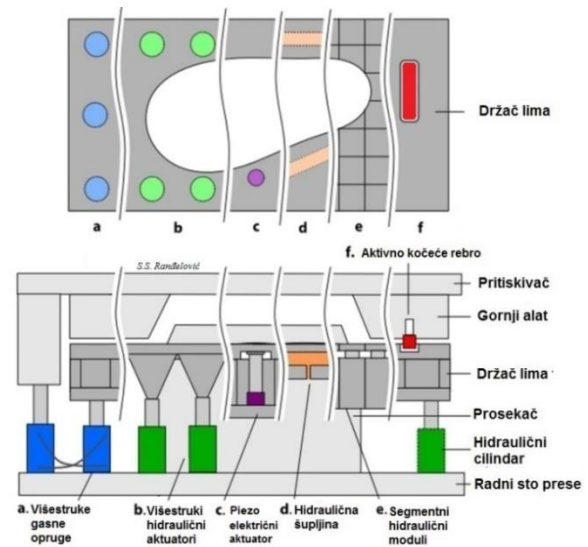
Slika 8 - Senzori i pretvarači za praćenje složenijih procesa dubokog izvlačenja [15]

Kada do izražaja dolazi potpuna nesimetričnost gotovog elementa, gde pripremak prati njegov oblik brzina izvlačenja po obimu ne može da ima istu vrednost jer je potrebno da za istu brzinu deformisanja gornjeg dela alata, pripremak bude delimično parcijalno usporen. Na nekim mestima to se evidentira pretvaračem pomeraja *j* i laserskim senzorom pomeraja *e* kako bi se dobio oblik koji se traži (Slika 8).

Primena ovakvih senzora ima dosta ograničenja koja se tiču njihovih veličina, neprekidnog kontakta usled vibracija i promenljive temperature alata. Takođe pojava nabora, razaranja i pukotina u materijalu priprema može da remeti kontinuitet merenja. Merenje deformacione sile moguće je preko trokomponentnog pretvarača *h*, mernog pipka *c* i umetanja dodatnih senzora za silu na mestu *i* kako bi proces bio u potpunosti kontrolisan (Slika 8). Za kontinualno praćenje procesa koristi se pokretna CCD kamera koja može da zabeleži i najmanje vizuelne promene na površini lima. Najčešće ona nije integrisana u sam alat tako da može biti dodata po potrebi, kao prateća oprema kojom se generišu uzastopni snimci, u kritičnim trenucima, tokom jedne tehnološke operacije izvlačenja.

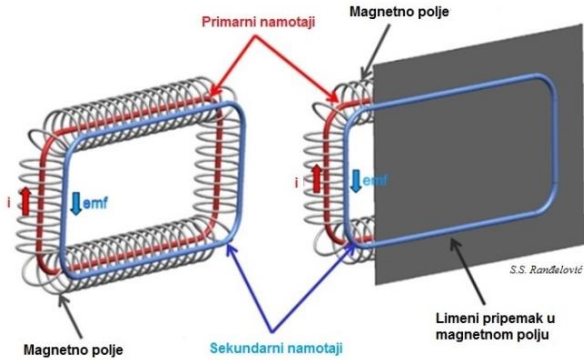
Parcijalno promenljivo dejstvo na površinu priprema (Slika 9) obezbeđuje se gasnim oprugama *a* višestrukim hidrauličnim aktuatorima

b i piezoelektričnim aktuatorima *c*. Hidraulični kanali i šupljine *d* omogućavaju nanošenje sloja ulja za podmazivanje na kritičnim mestima. Segmentni hidraulični moduli *e* omogućavaju dobijanje složenih 3D površina izvučenog dela. Aktivno kočeće rebro *f* (kojih može biti više po obimu nepravilne konture) omogućava promenljivu silu držanja lima čijim spuštanjem rastu normalni naponi u kritičnom radialnom pravcu [13].



Slika 9 - Primena aktuatora za kontrolu procesa dubokog izvlačenja nesimetričnih elemenata [16]

Induktivni senzor unutar alata, svuda po obimu (Slika 10), koji koristi magnetnu indukciju za praćenje kvaliteta izvučenog dela tokom procesa plastičnog deformisanja može u potpunosti da prati složenu konturu dela. To je bezkontaktni senzor, najčešće prekriven epoksidnom smolom kako bi se osigurao od dodira i habanja u samom procesu. Oni su jednostavni za upotrebu i imaju nisku cenu tako da mogu biti implementirani u alatima za duboko izvlačenje sa složenom konturom. Moraju se kalibrisati za svaki materijal i greške merenja se povećavaju ukoliko se javljaju vrlo mali nabori u toku procesa dubokog izvlačenja. Pripremak se postavlja između primarnih i sekundarnih namotaja elektromagneta i tokom procesa izvlačenja prati se i upravlja svakom neočekivanom promenom u geometriji priprema snažnim magnetnim poljem.

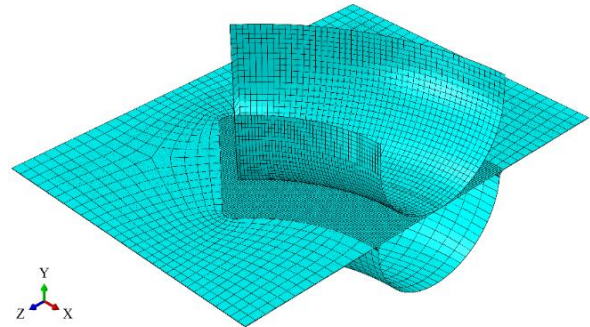
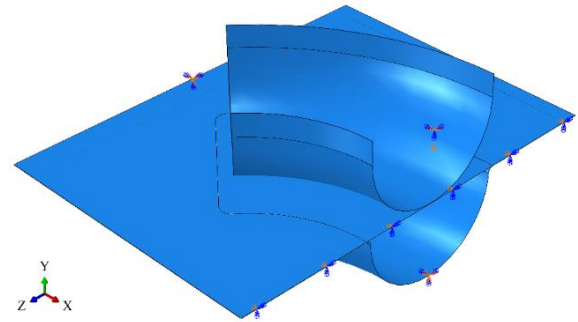


Slika 10 - Praćenje kvaliteta izvučenog elementa u magnetnom polju po celom obimu

4 FEM ANALIZA PROCESA IZVLAČENJA SLOŽENOG ELEMENTA

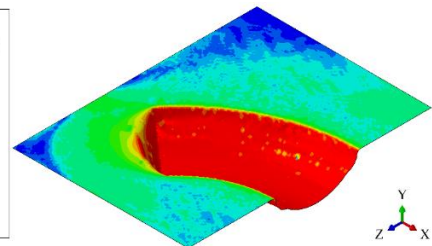
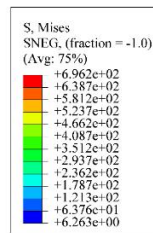
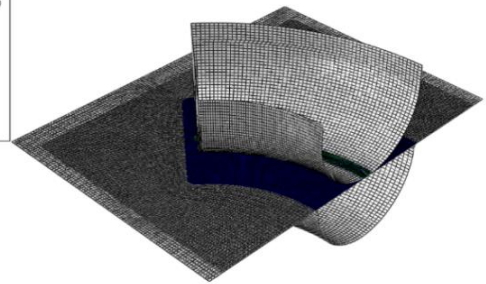
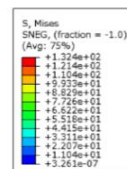
U generisanom 3D modelu alata, za simulaciju procesa metodom konačnih elemenata alati se obično predstavljaju kao kruta tela kako bi se njihov kontakt sa deformabilnim materijalom lakše i brže modelirao, odnosno proračunao napon po deformabilnoj strukturi i na kontaktnim površinama. Zbog nepotpunih i pogrešnih pretpostavki za vrednosti kritičnih parametara kod proračuna napona u strukturi materijala i kontaktnih pritisaka sam model procesa dubokog izvlačenja ima manje ili veće netačnosti i odstupanja koja se njegovim prilagođavanjem kroz više iteracija eliminišu. Kao primer navedenih činjenica izabran je složeniji element od lima debljine 0.15mm koji se ugrađuje kao deo izloacije izduvnog sistema automobila (Slika 11).

Zbog složenosti modela i brzine dobijanja rezultata analizira se polovina zadatog modela ali i kako bi se pratio tok dubokog izvlačenja na središnjem preseku i u kritičnim uglovima. Materijal deformabilnog priprema je čelik ($\rho = 7850\text{kg/m}^3$, $E = 210\text{GPa}$, $\nu = 0.3$, $\sigma_v = 285\text{N/mm}^2$), pravougaonog oblika veličine $550 \times 300\text{mm}$, modeliran je kvadratnim lineranim šel elementima S4, sa četiri čvora (21875 elemenata sa pripadajućih 22176 čvorova ABAQUS) [22]. Početna veličina stranice konačnog elementa je 2mm. Kruti pritiskivač alata, koji ima samo kretanje po y-osi, je modeliran linearnim kvadratnim elementima R3D4, 3127 elemenata sa 3217 pripadajućih čvorova (Slika 11).



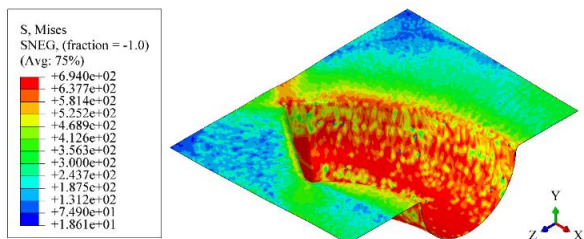
Slika 11 - Granični uslovi i generisana mreža konačnih elemenata

Neophodni kruti držač lima za ovakve tehnologije modeliran je takođe kvadratnim elementom R3D4 (858 elemenata sa 949 čvorova). Ravan držač lima i kruti donji deo alata nemaju nikakvo kretanje tokom analize (Slika 12). Uslovi trenja na kontaktu priprema i donjeg dela alata definisani su koeficijentom trenja 0.05 dok na kontaktu sa izvlačaćem koeficijent trenja je 0.12.



Slika 12 - Naponi plastičnog tečenja na početku i polovini hoda pritiskivača

U svakom slučaju rezultati FEM simulacionog modela (Slika 13) u mnogome zavise od izabranog tipa konačnog elementa za pripremak i numeričkih aproksimacija koje se koriste za modeliranje samog njegovog kontakta sa alatom. Sve to treba pažljivo izabrati ukoliko se želi tačniji simulacioni model.



Slika 13 - Naponi plastičnog tečenja na kraju hoda pritiskivača

Prethodno dobijene eksperimentalne vrednosti parametara predstavljaju osnovu za bolji FEM simulacioni model složenog nerotacionog elementa. Njihovim variranjem i promenama u opsegu realnih vrednosti, generisanim FEM modelom (SIMULIA) moguće je naći optimalno rešenje za date realne uslove proizvodnje u kojima se proces dubokog izvlačenja realizuje. Iako ovakvi softverski paketi omogućavaju potpuno virtualno projektovanje tehnologije dubokog izvlačenja, bez realnih parametara, definisanjem njihovih opsega fizičkih granica samo doprinosi generisanju optimalnog rešenja.

Prikazani pristup rešavanju problema koji se javljaju kod projektovanja tehnologija dubokog izvlačenja nerotacionih elemenata daje smernice kako spojiti teoretske, eksperimentalne i numeričke rezultate FEM analize u optimizacioni model kod jednog realnog industrijskog proizvoda. Analizom uticajnih parametara na eksperimentalnim modelima i generisanjem FEM numeričke simulacije izabranog proizvoda došlo se do tri parametra koji su ključni elementi regresione jednačine izabranog optimizacionog modela. To su kontrola sile držača lima, prelazni radijus na matrici i koeficijent kontaktnog trenja između lima i delova alata. Konstruktivno rešenje alata za izabrani proizvod, njegove korekcije i prilagođavanje trenutnim uslovima u proizvodnji samo su primer kako se može doći do rešenja i kod vrlo složenih proizvoda. Na Slici 14 su

prikazane ključne površine alata i gotov deo nakon procesa dubokog izvlačenja.



Slika 14 - Ključne površine alata i gotov deo

5 ZAKLJUČAK

Prikazana tehnologija dubokog izvlačenja nepravilnih elemenata i njen gotov proizvod za auto industriju samo je dobar primer šta se danas postavlja kao imperativ za vrhunске industrijske proizvode. Takva sofisticirana tehnička rešenja otvaraju put novim vrhunskim proizvodima koje tržište traži. Period do pojave novog proizvoda je sveden na minimum zahvaljujući softverskim alatima i tačnim mernim uređajima u vrlo uskim granicama sa preciznim podešavanjem.

LITERATURA

- [1] Kardan, M., Parvizi, A., Askari A., (2018): Influence of process parameters on residual stresses in deep-drawing process with FEM and experimental evaluations, *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. and Eng.*, Vol. 40 (3), 157, pp. 245-257.
- [2] Kuriyama, S., Yoshida, Y., Takahashi, T., Kumagaya, S., Aoki, T., Miyauchi, K., (2003): Development of simulation code for calculating residual stress distribution in D-I cans produced by both-sided ironing process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 140, pp. 13-18.
- [3] Incandela, O., Tabourot, L., Porret, P., Balland, P., Arrieux R., Ducher F., (2004): Modelling and analysis of a deep-drawing operation: key factors for successful comparisons between experimental and simulated results, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 155-156: pp. 1105-1110.
- [4] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Alves, J.L., Menezes, L.F., (2008): Numerical simulation and analysis on the deep drawing of LPG bottles, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 200, pp. 416-423.
- [5] Pourkamali, A. A., Shahabizadeh, M., Babaei, B., (2012): Finite element simulation of multi-stage deep drawing processes & comparison with experimental results, *World. Acad. Sci. Eng. Technol.*, Vol. 6, pp. 1-21

- [6] Singh, S. K., Kumar, V., Reddy, P. P., Gupta, A. K., (2014): Finite element simulation of ironing process under warm conditions, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 3(1), pp. 71–78.
- [7] Đorđević, M. T., Aleksandrović, S., Sedmak, A., Nikolić, R., (2016): Flat Die Sliding Model with Variable Contact Pressure in Deep Drawing Process, *8th Inter. Conf. of TEAM Society*, Trnava, Slovakia, pp. 255-258.
- [8] Padmanabhan, R., Oliveira, M.C., Laurent, H., Alves, J.L., Menezes, L.F., (2009): Study on springback in deep drawn tailor welded blanks, *Int. J. Mater. Form.*, 2: pp. 829–832.
- [9] Hassan, H., Maqbool, F., Guner, A., Hartmaier, A., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A.E., (2016): Springback prediction and reduction in deep drawing under influence of unloading modulus degradation, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 9., pp.619–633.
- [10] Sherbiny, M.E., Zein, H., Abd-Rabou, M., Shazly, M.E., (2014): Thinning and residual stresses of sheet metal in the deep drawing process, *Mater. Des.*, Vol. 55, pp. 869–879.
- [11] Rossini, N., Dassisti, M., Benyounis, K., Olabi, A., (2012): Methods of measuring residual stresses in components, *Mater. Des.*, Vol. 35, pp. 572–588.
- [12] Shuhui, Li, (2022): Sheet metal Deep Drawing for Making Metallic Parts and Structures, *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, Vol. 4, pp.182-196.
- [13] Lingbeek, R.A., Meinders, T., Rietman, A., (2008): Tool and Blank Interaction in The Cross-Die Forming Process, *Int. J. of Mater. Form., Symposium MS03, Sheet metal forming*, vol. 1, pp. 161 -164.
- [14] Ken-ichi, M., Kentaro, S., Akinori, S., (2021): Effects of Variable Punch Speed and Blank Holder Force in Warm Superplastic Deep Drawing Process, *Metals*, 11(3), 493;
- [15] Volk, W., Groche, P., Brosius, A., Ghiotti, A., Kinsey, L.B., Liewald, M., Madej, L., Min, J., Yanagimoto, J., (2019): Models and modelling for process limits in metal forming, *CIRP Annals*, vol. 68, Issue 2, pp. 775-798.
- [16] Allwood, J.M., Duncan, S.R., Cao, J., Groche, P., Hirt, G., Kinsey, L.B., Kuboki, T., Liewald, M., Sterzing, A., Tekkaya, A.E., (2016): Closed -loop control of product properties in metal forming, *CIRP Annals*, vol 65, Issue 2, pp. 573-596.