

NUMERIČKE SIMULACIJE – MOĆNE ALATKE U OBRAZOVANJU
INŽENJERA PROIZVODNOG MAŠINSTVAMladomir Milutinović¹, Dragiša Vilotić², Plavka Skakun³ Saša Randelović⁴Dejan Movrin⁵ Ljiljana Stefanović⁶ Marko Vilotić⁷^{1,2,3,5,6,7} Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija⁴ Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Niš, Srbija¹mladomil@uns.ac.rs, ²vilotic@uns.ac.rs, ³plavkas@uns.ac.rs, ⁴sassa@masfak.ni.ac.rs, ⁵movrin@uns.ac.rs,⁶ljiljanastefanovic@uns.ac.rs, ⁷markovil@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Sveopšti tehnološki napredak nameće potrebu za novim, modernim i efikasnijim pristupom obrazovanju i obuci sledeće generacije inženjera. U tom smislu može se reći da primena računara i numeričkih simulacija u nastavi predstavlja jedan od ključnih faktora. Primena numeričkih simulacija ne samo da olakšava i ubrzava proces usvajanja znanja, već i doprinosi podizanju nivoa znanja, kompetencija i praktičnih veština studenata neophodnih za inženjersku praksu, odnosno poboljšanju kvaliteta celokupnog nastavnog procesa. U ovom radu razmatranu su uloga, mogućnosti i značaj primene numeričkih simulacija u obrazovno procesu inženjera proizvodnog mašinstva, sa naglaskom na oblast obrade metala deformisanjem.

Ključne reči: Obrazovanje/Numeričke simulacije/Obrada deformisanjem,

NUMERICAL SIMULATIONS – A POWERFUL TOOLS IN EDUCATION OF
MANUFACTURING ENGINEERS

Abstract: Overall technological advancement imposes the need for a new, modern and more efficient approach to the education and training of the next generation of engineers. In this sense, it can be said that the application of computers and numerical simulations in teaching is one of the key factors. The application of numerical simulations not only facilitates and accelerates the learning process, but also enhance the level of knowledge, competences and students' practical skills necessary for engineering practice, improving that way the quality of the entire teaching process. This paper discusses the role, possibilities and importance of the application of numerical simulations in the educational process of manufacturing engineers, with an emphasis on metal forming processes.

Key Words: Education/Numerical simulation/Metal forming

1. UVOD

Obrazovanje kao i svakodnevni život danas su nezamislivi bez računara. Uvođenje računara u obrazovni proces bitno su uticali na metode i tehnike izvođenja nastave, organizaciju nastave, sadržaj kurseva, kao i na sam proces učenja i sticanja znanja. Prema Đorđeviću [1] sveopšta kompjuterizacija i naučno-tehnološki napredak inicirali su prelaz od reproduktivnog ka produktivnom obrazovanju, od statičkog ka dinamičnom, od nepromenljivog ka operativnom. Tradicionalne metode nastave i učenja sve više postaju nezanimljive za studente koji pokazuju ozbiljan otklon prema njima što dovodi do poteškoća pri savladavanju gradiva, pogotovu kada se proces učenja dominantno bazira na čitanju knjiga ili drugih pisanih materijala. U tom smislu, poseban problem predstavlja pronalaženje i selektovanje informacija iz različitih literaturnih izvora, delom zbog neupućenosti ali i činjenice da se radi o vremenski zahtevnoj aktivnosti. Sa druge strane računari poseduju brojne alatke i ogromni potencijal za poboljšanje efikasnosti i kvaliteta obrazovnog sistema. To važi čak i kada je reč o tekstu, još uvek najvažnijem sredstvu za prenos informacija. Naime, na računaru postoji mnogo različitih dodataka i opcija za prikaz tekstualnog materijala kao što su boja, grafika, zvuk, animacija, treća dimenzija, interakcija sa korisnikom itd., koji mogu značajno olakšati i unaprediti proces učenja. Pored toga, računari mogu da čuvaju podatke, obrađuju ih i iznose informacije u kratkom vremenskom periodu. U pogledu izvođenja nastave, između ostalog, omogućavaju brze izmene i ažuriranje nastavnog materijala, njegovu prezentaciju kroz različite multimedijalne sadržaje, kvalitetniju komunikaciju nastavnik-student, redukciju troškova nastave itd.

Obrazovni proces studenata na tehničkim fakultetima danas je u velikoj meri zasnovan na primeni računara i informaciono-komunikacionih tehnologija (IKT). Za sticanje i unapređenje tehničkog znanja studenata, odnosno njihov progres od početnika do stručnjaka/inženjera od posebnog značaja su softveri za vizuelizaciju, modelovanje i analizu proizvoda, procesa i sistema koji se podjednako uspešno koriste kako za potrebe industrijske prakse tako i u naučno-istraživačke svrhe. Reč je o tzv. računarom podržanom inženjeringu (engl. Computer-aided engineering - CAE), tehnici koja se bazira na primeni računara i odgovarajućih simulacionih softvera u rešavanju različitih inženjerskih problema u okviru većine inženjerskih disciplina. Simulacioni softver zasnovan je na procesu modeliranja stvarnog fenomena pomoću skupa matematičkih formula. To je, u suštini, program koji korisniku

omogućava posmatranje i analizu posmatranog fenomena/problema putem simulacije u digitalnom okruženju i bez izvođenja realnog eksperimenta. Stoga, numeričke simulacije na računarima sve više nadopunjuju tradicionalne eksperimentalne procedure u laboratorijima na svim poljima. Ova mogućnost predstavlja veliki benefit za tehničke fakultete naročite one kojima nedostaju odgovarajuće laboratorije ili je laboratorijska oprema tehnološki zastarela. Kompjuterski eksperimenti su veoma bliski realnim, bezbedni su i u potpunosti ponovljivi što omogućava da se izvode na kontrolisan način i usmere na bitne sadržaje problema koji se ispituje, mogu se vremenski kontrolisati (ubrzati ili usporiti) i značajno su jeftiniji od realnih. Simulacioni softveri koriste različite numeričke metode među kojima s posebno izdvaja metoda konačnih elemenata (MKE).

I u domenu proizvodnog mašinstva CAE numeričke simulacije su dobro proveren i ekstremno koristan instrument koji inženjerima/tehnolozima pruža set novih i moćnih alata za pravilno projektovanje tehnoloških postupaka i procesa. Glavna prednost CAE koncepta je fleksibilnost modela i mogućnost izvođenja „šta-ako“ simulacija gde se na virtuelnim modelu mogu proceniti i ispitati različite projektne alternative čime se smanjuju testiranja i izbegavaju skupe greške koje se često dešavaju u okviru tradicionalne „trial-and-error“ procedure projektovanja [2]. Takođe, može se analizirati uticaj pojedinačnih parametara (senzitivna analiza) na kvalitet proizvoda i troškove proizvodnje, predvideti defekti na proizvodu i otkaz opreme, analizirati opterećenje i habanje alata, itd., odnosno izvršiti optimizacija celokupnog proizvodnog procesa.

Iz prethodno iznetog jasno se može zaključiti da su CAE tehnike duboke involvirane u sve oblasti inženjerskog rada i savremene industrijske proizvodnje. Takođe, one nude široke mogućnosti za nadogradnju u pogledu inženjerske edukacije i otvaraju nove perspektive u inženjerskom obrazovnom sistemu. Stoga ih je neophodno prihvatiti kao relevantno nastavno sredstvo/metodu i implementirati u kurikulumu tehničkih fakulteta u cilju uspešnog obrazovanje nove generacije inženjera. Međutim, primena računara i CAE tehnika u edukaciji inženjera osim pozitivnih može imati i negativne konotacije. Pre svega to je opasnost od zanemarivanja tradicionalnih obrazovnih ciljeva koji se odnose sticanje teorijskih znanja i razumevanja suštine tehničkog problema koji rešavaju, na račun ovladavanja praktičnim veštinama rada na računaru i korišćenja softvera. Zbog toga studenti ponekad nisu u stanju da pravilno formulišu problem i kreiraju odgovarajući model razmatranog procesa/problema ili sa druge strane iskazuju poteškoće u razumevanju (pravilnom tumačenju) rezultata numeričkih simulacija. Tu je i problem nekritičkog korišćenja rezultata simulacija usled čega dolazi do krupnih previda i izvođenja pogrešnih zaključaka kao rezultat nepoznavanja problematike, ali i stava da softver ne može pogrešiti. Drugim rečima, rezultate numeričkih simulacija treba koristiti sa oprezom i stalno imati na umu sledeću sentencu: numeričke simulacije čine dobrog inženjera vrhunskim a lošeg opasnim. U vezi ranije iznetog treba dodati da je računar i numeričke simulacije potrebno posmatrati samo kao alate za olakšavanje i unapređenje inženjerskih poslova, a nikako kao krajnji cilj učenja.

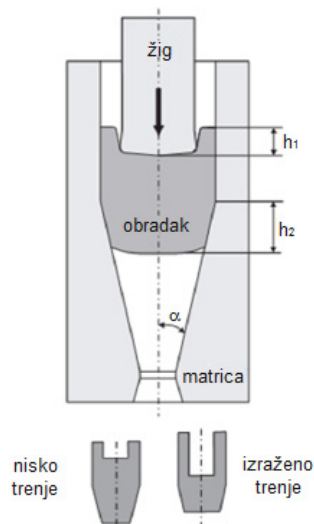
Na smeru za Proizvodno mašinstvo (Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad), u okviru nastavnih aktivnosti vezanih za izučavanje fenomena i projektovanje tehnoloških procesa baziranih na tehnologijama obrade deformisanjem, numeričke simulacije zauzimaju značajno mesto i uspešno se implementiraju skoro dve decenije na sva tri nivoa studija (OAS, MAS i DAS). U nastavku rada kroz primere preuzete iz studentskih diplomskih i master radova biće prezentovane mogućnosti i benefiti primene numeričkih simulacija u procesu obrazovanja studenata/inženjera Proizvodnog mašinstva.

2. PRIMERI PRIMENE NUMERIČKIH SIMULACIJA U NASTAVI I ANALIZI PROCESA DEFORMISANJA

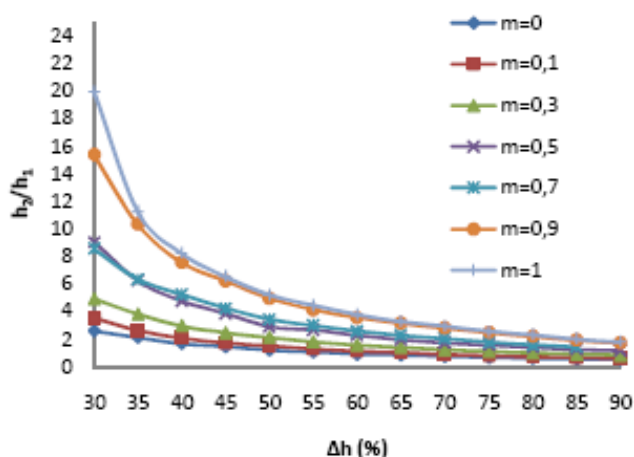
Softveri za simulacije procesa deformisanja metala prešli su dug razvojni put od jednostavnih istraživačkih alata do današnjih složenih softverskih paketa koji omogućavaju projektovanje svih segmenata proizvodnog sistema/procesa. Danas na tržištu postoji veliki broj softvera (opštih i specijalizovanih) koji se koriste za simulacije i analize procesa deformisanja od kojih su najpoznatiji: Abaqus, QForm, DEFORM, Simufact.Forming, Pam-Stamp i AutoForm. Na Departmanu za proizvodno mašinstvo za realizaciju nastavnih i istraživačkih aktivnosti u oblasti obrade deformisanjem na raspolaganju je programski paket Simufact.Forming nemačke kompanije Simufact engineering GMBH. Ovaj program deo je softverskog paketa Simufact (Simulating Manufacturing) koji predstavlja paletu programa razvijenih na modularnom principu namenjenih za simulacije i optimizaciju procesa u okviru tehnologija deformisanja i spajanja, aditivnih tehnologija, metalurške analize materijala uključujući i fazne transformacije. Korisnički interfejs softvera prilagođen je Windows okruženju i krajnje je intuitivan jer način pripreme simulacije podseća na stvarni proces projektovanja što značajno olakšava obuku i sam rad u njemu. Moćan postprocesor za vizuelizaciju rezultata simulacije (vrednosti, slike i animacije), omogućava projektantima i inženjerima potpun uvid u sve aspekte procesa, uključujući:

- sliku tečenje materijala, sa prikazom celog modela i u željenim presecima
- popunjavanje alata i markiranje van-kontaktne zone
- naponske, deformacione, temperaturne i distribucije pritisaka
- habanje alata i procenu kriterijuma loma
- procenu sila na alatima i prikaz naponskog stanja
- prikaz defekata preklopa i zona poremećaja pri podmazivanju (lube-pocket) itd

U diplomskom radu [3] numeričke simulacije su primenjene za analizu trenja u procesima hladnog zapreminskog deformisanja. Konkretni zadatak odnosio se na procenu/određivanje faktora smicanja (m) koji služi kao pokazatelj veličine trenja u procesima deformisanja gde se javljaju veliki kontaktni pritisci. Korišćena je indirektni postupak koji je podrazumevao praćenje geometrije priprema (dimenzije h_1 i h_2 na slici 1) za slučaj kombinovanog istiskivanja (istosmerno/suprotnosmerno) pri različitim kontaktnim uslovima i geometriji alata (ugao α – sl.1). Na osnovu podataka o visinama h_1 i h_2 formirane su tzv. kalibracione krive (sl.3) koje se kasnije koriste za određivanje faktora smicanja. Dobljene kalibracione krive pokazuju dobro slaganje sa rezultatima sličnih istraživanja objavljenim u naučnim časopisima [4].

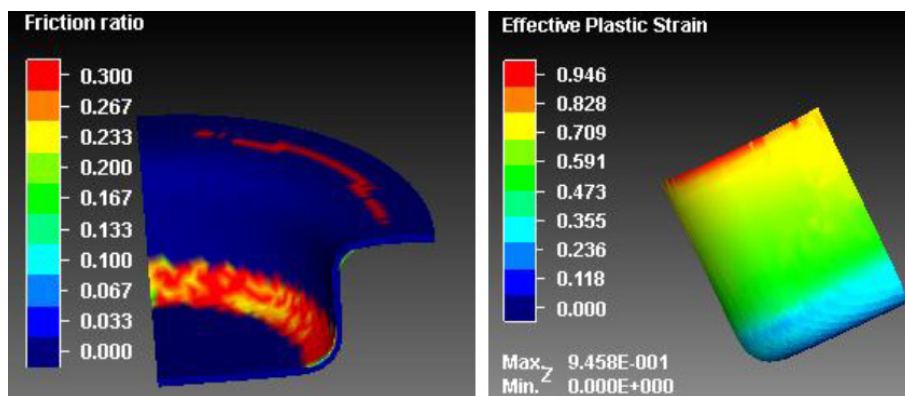


Slika 1. Šema testa



Slika 2. Kalibracione krive u funkciji relativnog hoda žiga (Δh)

Sa druge strane u Master radu [5] softverski paket je korišćen za analizu uticaja kontaktnih uslova na naponsko-deformaciono stanje u obratku (sl.3) i parametre procesa dubokog izvlačenja. Rezultati simulacije su upoređeni sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja takođe realizovanih u okviru ovoga rada. U tom smislu konstatovano je da postaje odgovarajuća (veoma mala) odstupanja u rezultatima koja su pripisana nestacionarnosti uslova podmazivanja što nije bilo moguće obuhvatiti u okviru numeričkog modela.



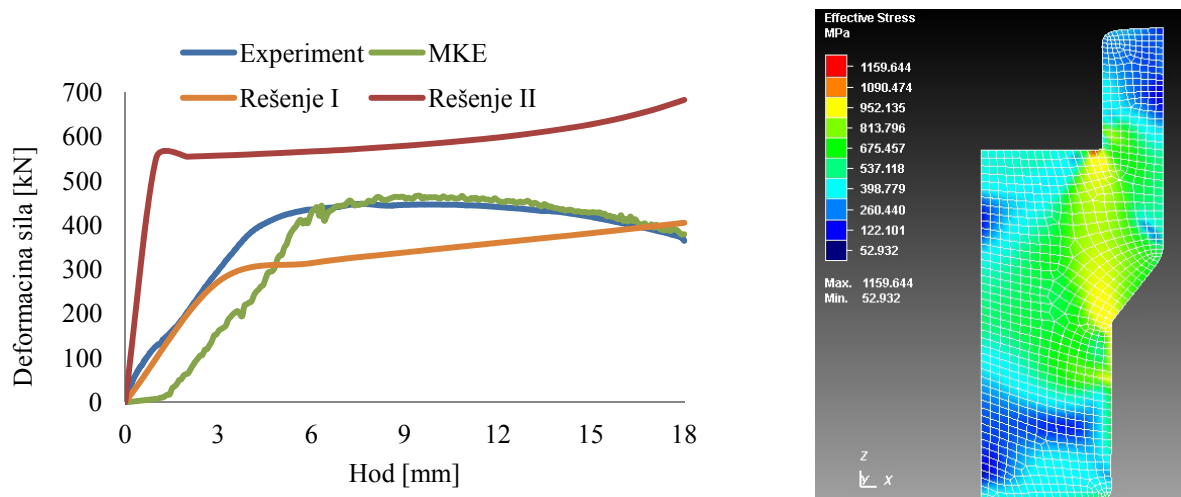
Slika 3. Trenje u procesu i deformaciono stanje u obratku dobijeni numeričkim simulacijom

Zadatak master rada [6] odnosio se na analizu uticaja oblika glave žiga (alata) na tečenje materijala u procesu kombinovanog istiskivanja, kao i proveru (ocenu tačnosti) dva analitičkih izraza za proračun pritiska, odnosno deformacione sile putem numeričkih simulacija i eksperimenta. Izraz 1 nastao je kao rezultat statističke obrade većeg broja eksperimentalnih rezultata pri istraživanju procesa hladnog zapreminskog istiskivanja [7], dok je izraz 2 izveden na bazi deformacione teorije korišćenjem uprošćenog modela dobijenog pomoću metode ravnih preseka. Radi se o poznatim izrazima koji se mogu naći u stručnoj literaturi vezanu za obradu deformisanjem, i sa kojima se studenti upoznaju tom teorijskog dela izučavanja procesa istiskivanja.

$$p_I = \frac{k_o + k_1}{2} \left[\frac{D_o^2}{d^2} \ln(m) + \frac{H}{d} \left(1 + \frac{d_1}{d} \right) \cdot m \right] \left(1 + \frac{2}{3} \mu \frac{d^3 - d_1^3}{d^2 H} \right) \quad (1)$$

$$p_{II} = \frac{k_o + k_1}{2} \cdot \varphi_{FE} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3\varphi_{FE}} \right) + k_o \left(1 + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{d}{H_o - s} \right) + k_l \left[1 + \frac{2(H_o - s)}{D_o - d} \left(0.25 + \frac{\mu}{2} \right) \right] \quad (2)$$

Sa slike 4 se vidi da vrednosti deformacione sile dobijene pomoću oba analitička izraza značajno odstupaju od stvarnih vrednosti. Sa druge strane, kriva dobijena eksperimentalnim putem se ne razlikuje mnogo od krive dobijene simulacijom što ukazuje na ispravnost MKE modela. Na osnovu rezultata istraživanja izveden je zaključak da se oba analitička izraza moraju koristiti sa rezervom, tj. mogu poslužiti samo za orijentacionu procenu pritiska/sile.



Slika 4. Upporedni prikaz deformacione sile i efektivni napon u obratku dobijenog kombinovanim istiskivanjem

3. ZAKLJUČAK

Dosadašnja iskustva u primeni numeričkih simulacija kao aktivnog vida nastavnog procesa na predmetima vezanim za tehnologije obrade defekta deformisanjem su krajnje pozitivna. Sa jedne strane nastava je studentima postala „zanimljiva“, studenti lakše i brže savladavaju gradivo, aktivno se uključuju u nastavni proces, uspostavljen je relaksiraniji odnos nastavnik-student, došlo je do razvoja kritičkog mišljenja kod studenata i sl. Sa druge strane, na bazi povratnih informacija iz industrije, poznavanje CAE softverskih paketa je svršenim studentima/inženjerima olakšalo put do zaposlenja i skratilo period adaptacije tj. uklapanja u tokove kompanija u kojima rade i početka samostalnog izvršavanja složenih inženjerskih zadataka.

4. LITERATURA

- [1] Jovan Đorđević, *Nastava i učenje u savremenoj školi*, Savez pedagoških društava Jugoslavije, Beograd 1997.
- [2] Vesna Mandić, *Fizičko i numeričko modeliranje procesa deformisanjem*, monografija, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2012.
- [3] Radenko Uljarević, *Određivanje faktora smicanja pomoću testa kombinovanog istiskivanja*, Diplomski rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2018
- [4] Chengliang H., Qiang Y., Zhen Z., *A novel method for determining friction in cold forging of complex parts using a steady combined forward and backward extrusion test*, Journal of materials processing technology Vol 249, 57-66, 2017
- [5] Aleksandar Petkovic: *Uticaj kontaktnog trenja na naponsko-deformaciono stanje i parametre procesa pri dubokom izvlačenju*. Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017
- [6] Zoltan Kanjo, *Teoretsko – eksperimentalna istraživanja procesa zapreminskog deformisanja sa dvosmernim tečenjem*, Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2014.
- [7] Golovin V.A., Mitkin A.N., Reznikov A.G.: *Technology of cold forming* (in russian), Mašinostroenie, Moskva, 1970.