

MODELIRANJE POSTUPAKA OBRADE DEFORMISANJEM U FUNKCIJI POBOLJŠANJA KVALITETA METALNIH PROIZVODA NA PRIMJERU IZRADE METALNE BARSKE STOLICE

MODELING OF METAL FORMING PROCESSES AIMED AT IMPROVING PRODUCT QUALITY ON THE EXAMPLE OF MANUFACTURING A METAL BAR STOOL

Ibrahim Plančić, v.prof.dr.sc.
Nedim Saltagić, dipl. ing. maš.
Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici
Zenica

REZIME

Složenost uslova obrade i mnoštvo uticajnih faktora na kvalitet izradaka, čine proces oblikovanja metalnih proizvoda veoma kompleksnim. Tradicionalno se projektovanje tehnologije izrade i konstrukcije alata za oblikovanje metalnih proizvoda oslanja na literaturne preporuke i iskustvo inženjera. Međutim, intenzivan razvoj računarske tehnologije i primjena računara u svim oblastima ljudske djelatnosti omogućava njihovu primjenu i u procesu projektovanja kako proizvoda tako i tehnologije njihove izrade. Stoga su danas sve više u primjeni softveri za modeliranje i simulaciju procesa oblikovanja. Isti omogućavaju identifikaciju važnijih uticajnih parametara na kvalitet oblikovanih proizvoda i izbor njihovih optimalnih vrijednosti bez prethodne izrade alata i njihovih skupih proba, a što konačnici doprinosi poboljšanju njihovog kvaliteta i značajnim finansijskim uštedama. Također, kod tradicionalnog pristupa osnovano postoji rizik neuspješnog oblikovanja materijala i pojave raznih defekata izrađenih dijelova. U radu je predstavljen primjer razrade tehnologije izrade metalne barske stolice prema vlastitom idejnom rješenju. Fokus je stavljen na tehnologiju savijanja cijevi, koja predstavlja ključni segment u konstrukciji ovog proizvoda. Korištenjem CAD/CAE softverskog paketa SolidWorks, izrađeni su 3D modeli, s ciljem analize naprezanja, deformacija i mogućih grešaka kao što su ovalizacija, elastični povrat i stanjivanje zida. Primjena Solidworks programa omogućila je identifikaciju kritičnih tačaka i optimizaciju parametara savijanja radi poboljšanja funkcionalnosti, čvrstoće i estetskog izgleda proizvoda. Ovaj pristup omogućava smanjenje troškova, povećanje tačnosti i bolju kontrolu kvaliteta bez potrebe za višestrukim fizičkim prototipovima.

Ključne riječi: obrada deformisanjem, modeliranje, savijanje cijevi, kvalitet proizvoda

SUMMARY

The complexity of the processing conditions and the multitude of factors influencing the quality of workpieces make the process of forming metal products very complex. Traditionally, the design of the technology for the manufacture and construction of tools for shaping metal products relies on literature recommendations and the experience of engineers. However, the extremely rapid development of computer technology and the application of computers in all areas of human activity enables their application in the process of designing both products and the technology of their manufacture. Therefore, software for modeling and simulation of the molding process is increasingly in use today. They enable the identification of important influencing parameters on the quality of shaped products

and the selection of their optimal values without prior production of tools and their expensive tests, which ultimately contributes to significant financial savings. Also, with the traditional approach, there is a well-founded risk of unsuccessful material shaping and the occurrence of various defects in the manufactured parts. This paper presents an example of developing a manufacturing technology for a metal bar stool based on original conceptual design. The focus is placed on tube bending technology, which plays a crucial role in the structural design of the product. By using the CAD/CAE software SolidWorks, 3D models were created to analyze stress, deformation, and potential defects such as ovalization, springback, and wall thinning. Results of using Solidworks allowed the identification of critical points and optimization of bending parameters to enhance the functionality, strength, and visual appearance of the product. This approach enables cost reduction, increased production accuracy, and better quality control without the need for multiple physical prototypes.

Keywords: metal forming process, modeling, tube bending, product quality

1. UVODNI DIO

Oblikovanje metalnih proizvoda postupcima obrade deformisanjem predstavlja jedan od ključnih segmenata proizvodnog procesa u metaloprerađivačkoj industriji. Ovaj vid obrade se koristi za oblikovanje metalnih izradaka primjenom mašina za deformisanje koje ostvaruju potrebne deformacione sile za trajnu promjenu oblika bez narušavanja integriteta materijala. Postupcima obrade deformisanjem se najčešće vrši promjena oblika, dimenzija, mehaničkih i drugih osobina početnog materijala ili sirovine s ciljem oblikovanja poluproizvoda ili finalnog proizvoda. Pri tome se kod propisivanja postupaka oblikovanja teži ostvarivanju maksimalnog učinka i ciljanog kvaliteta izratka uz minimalne gubitke, minimalna ulaganja i normalan ljudski rad. Kako bi se ispunili navedeni ciljevi danas se za projektovanje, odnosno konstruisanje mašinskih dijelova i sklopova, kao i za projektovanje i planiranje postupaka oblikovanja koriste odgovarajuće računarske programske aplikacije čijom primjenom se dobijaju *digitalni modeli* dijelova i sklopova ili *digitalni modeli* postupaka oblikovanja. Zahvaljujući brzom razvoju kompjuterske tehnike razvijeno je dosta komercijalnih programskih paketa za modeliranje i rješavanje problema u postupcima obrade deformisanjem. Modeliranje postupaka oblikovanja, pored optimiziranja procesa bez prethodne izrade alata i njihovih proba najčešće podrazumijeva i softversku provjeru mogućnosti izrade dijelova prema projektovanoj tehnologiji izbjegavajući skupe probe i nepotrebne troškove izrade prototipova. Modeliranje postupaka oblikovanja plastičnim deformisanjem pomoću računarskih aplikacija se može, prema načinu analize i simulacije, razvrstati u dve grupe [1]:

- modeliranje postupaka obrade plastičnim deformisanjem koji ne zahtijevaju numeričku analizu i simulaciju samog procesa deformisanja i
- modeliranje postupaka obrade plastičnim deformisanjem koji zahtijevaju numeričku analizu i simulaciju samog procesa deformisanja.

Modeliranje prve grupe postupaka oblikovanja je moguće naći u uobičajenim *CAPP/CAM* aplikacijama koje su obično neposredno povezane sa posebnim *CAD* modulima (*Sheetmetal part design*) kojima se modelira geometrija dijelova koji se dobijaju na ovaj način, poput operacija probijanja i prosijecanja, savijanja i spajanja limova. U drugu grupu postupaka spadaju duboko izvlačenje, kovanje i istiskivanje. Kod ovih postupaka, za ispravno modeliranje operacija najvažnije je obaviti valjanu numeričku analizu i simulaciju samog procesa deformisanja jer se radi o procesima kod kojih nije izvjesno kakav će biti rezultat oblikovanja. Numerička analiza i simulacija deformisanja materijala treba da pruži što realniji prikaz promjene stanja unutrašnje strukture materijala obratka tokom procesa deformisanja, stepena deformacije i napona. Iz tog razloga, modeliranje ovih operacija se odvija uz pomoć posebne vrste softvera baziranih na numeričkoj analizi plastičnog deformisanja uglavnom primjenom metode konačnih elemenata, a izlaz iz ovakvih modela postupaka oblikovanja je odgovarajuća konstrukcija i oblik alata, redosljed faza oblikovanja i karakteristike deformacione sile u tim

fazama. Dakle, modeliranje postupaka obrade deformisanjem igra presudnu ulogu u dizajnu i optimizaciji postupaka oblikovanja, posebno kada se teži visokokvalitetnim i estetski privlačnim proizvodima. Takav proizvod je i metalna barska stolica koja je predmet ovoga rada. Inače, metalni proizvodi, posebno u oblasti namještaja, zahtijevaju visoku preciznost, estetsku vrijednost i mehaničku pouzdanost. Izrada metalne barske stolice, prema vlastitom idejnom rješenju uključuje primjenu tehnologije obrade deformisanjem i zavarivanja, pri čemu je savijanje cijevi dominantna tehnologija i jedna od zahtjevnijih, a time i kritičnijih faza oblikovanja. Neadekvatna kontrola ovog procesa može dovesti do oštećenja poput nabora, spljoštenja i nepreciznosti u dimenzijama, a time i direktno uzrokovati loš kvalitet proizvoda.

2. SPECIFIČNOSTI RAZVOJA I IZRADE METALNE BARSKE STOLICE

Metalna barska stolica zahtijeva visoku stabilnost, otpornost na opterećenje i estetski dizajn. Tipični dizajn barske stolice uključuje nosivi dio konstrukcije izrađen od čeličnih cijevi, naslona, oslonca za noge i sjedišta koje može biti metalno ili drveno. Nakon istraživanja, analize tržišta i funkcionalnih elemenata barske stolice uključujući ergonomske zahtjeve i trajnost, potpuna inspiracija za usvojeni dizajn idejnog rješenja metalne barske stolice koja je predmet ovog rada, prema slici 1. je pronađena u kombinaciji industrijskog i modernog stila. U idejnom rješenju dizajna barske stolice primjetan je kontrast između drveta kao toplog prirodnog materijala i hladnih metalnih elemenata sa spojem estetike i tehničke preciznosti. Usvojenim jednostavnim, ali elegantnim dizajnom, barska stolica se oslanja na savremene trendove u industrijskom i minimalističkom stilu. Njena konstrukcija od metalnih cijevi naglašava čvrstoću i dugotrajnost, dok su drveni elementi sjedišta i naslona prilagođeni za udobnost i vizuelnu toplinu. Karakteristično je da je idejno rješenje u potpunosti prilagođeno mogućnostima jednostavnog oblikovanja u vlastitom proizvodnom pogonu. Proces savijanja cijevi, kao ključna faza izrade, maksimalno je iskorišten zahvaljujući postojećoj opremi, dok su svi spojevi i završni detalji dizajnirani tako da osiguraju jednostavnost proizvodnje i ekonomičnost. Konačni proizvod odiše originalnošću, održava visok standard kvaliteta i estetski je privlačan, što ga čini idealnim za široku primjenu na tržištu.

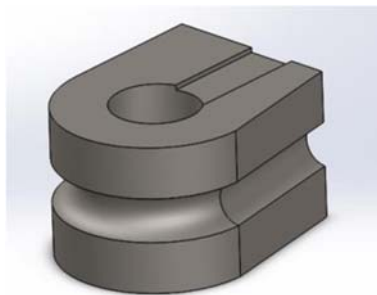


Slika 1. Idejno rješenje barske stolice [2]

3. MODELIRANJE U FUNKCIJI EFIKASNOG SAVIJANJA CIJEVI

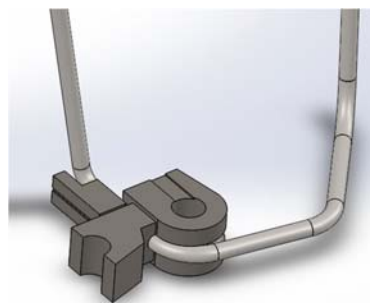
Ključna faza u razvoju idejnog rješenja, a posebno u izradi predmetne barske stolice je savijanje metalnih cijevi. Nepravilno savijanje može dovesti do smanjenja čvrstoće, pojave pukotina ili loše estetike proizvoda. Stoga se kroz postupak modeliranja uz primjenu Solidworks programa mogu precizno definisati geometrija i radijusi savijanja, simulirati opterećenja i osigurati da svi elementi zadovolje projektne zahtjeve prije same proizvodnje. Inače, modeliranjem procesa savijanja pomoću softverskih alata može se simulirati uticaj radijusa savijanja na naprezanje materijala, izbor optimalnog alata i parametara savijanja poput brzine i sile savijanja, pojava elastičnog ispravljanja, odnosno povrata savijenog dijela, te raspodjela napona i deformacija u kritičnim zonama. Postupkom modeliranja mogu se odabrati idealni uslovi koji minimiziraju greške i produžavaju životni vijek proizvoda. Kao primjer može da posluži podešavanje radijusa savijanja u skladu sa debljinom zida cijevi čime se značajno smanjuje rizik od pucanja. SolidWorks pruža realne uvide u ponašanje materijala tokom

procesa i mogućnost optimizacije oblika bez fizičkih proba [3]. Na taj način se kroz proces modeliranja u postupku savijanja doprinosi optimizaciji i poboljšanju kvaliteta proizvoda kroz preciznu kontrolu dimenzija i tolerancija, smanjenje otpada i grešaka u proizvodnji, povećanje ponovljivosti i konzistentnosti kvaliteta finalnog proizvoda, integraciju ergonomskih zahtjeva i estetskih kriterija u ranoj fazi dizajna. Na primjeru oblikovanja metalne barske stolice, također se mogu analizirati sile koje djeluju prilikom sjedenja i statike korisnika, čime se optimizira



Slika 2. Nepomični segment alata za savijanje cijevi [2]

konstrukcija za povećanu stabilnost i sigurnost. U fazi izrade samog inicijalnog 3D modela, bitno je napraviti tzv. kostur model koji služi kao vodilja za dalji razvoj cijelog procesa. Nakon toga, važno je provjeriti ekonomsku izvodljivost takve konstrukcije i u skladu s tim, vršiti korekcije na modelu, u smislu promjene radijusa savijanja, ugla savijanja, mjesta spajanja segmenata, načina spajanja pojedinih segmenata korištenjem vijaka, postupaka zavarivanja i sl. Radijus savijanja je jako važan parametar pri postupku savijanja, tako da je potrebno posvetiti posebnu pažnju jer od radijusa zavisi i tehnološka izvodljivost, ekonomska isplativost i teško je pratiti preliminarni dizajn ukoliko dođe do drastične promjene radijusa savijanja. Solidworks pruža na jednostavan način, uvid u različite varijante svih parametara relevantnih pri izradi barske stolice. Nakon usvajanja 3D modela i procjene da je to najpovoljniji dizajn, pristupa se fazi izrade radnih elemenata alata. Radni elementi alata koji se koriste pri savijanju metalne barske stolice su najčešće: nepomični, odnosno fiksni segment alata, vodilica cijevi, držač i trn. Nepomični segment alata, slika 2., određuje radijus savijanja i direktno preuzima sile koje nastaju tokom procesa. Isti mora imati unutrašnji radijus jednak željenom radijusu savijanja R , s tolerancijom za elastičnost materijala. Žlijeb u alatu treba da odgovara spoljnjem prečniku D cijevi sa dodatkom tolerancije $0,5-1\text{ mm}$, što omogućava lako kretanje cijevi tokom savijanja. Kreiranjem 3D modela alata može se dobiti sveobuhvatna slika o cijelom postupku savijanja određenih segmenata, kako je prikazano na slici 3., a samom analizom i simulacijom u Solidworks-u može se provjeriti da li dolazi do grešaka i neželjenih efekata pri savijanju. Uvođenjem svih 3D modela alata u jedan sklop sa segmentom nosive konstrukcije provjerava se da li je savijanje zadovoljavajuće.



Slika 3. Analiza kreiranih 3D modela prije izrade

3. PROJEKTOVANJE TEHNOLOGIJE OBLIKOVANJA

Kombinirajući klasični postupak projektovanja tehnologije oblikovanja i proces modeliranja pojedinih faza oblikovanja, te radnih elemenata alata primjenom softverske aplikacije Solidworks izvršena je razrada postupka izrade kompletnog proizvoda metalne barske stolice uključujući savijanje cijevi i njihovo zavarivanje u jednu funkcionalnu metalnu cjelinu, te spajanje drvenih elemenata naslona i sjedišta. Na osnovu crteža radnog predmeta koji je nastao kao rezultat prethodnog modeliranja definisan je redosljed faza oblikovanja metalne konstrukcije koje uključuju: određivanje razvijene dužine savijenih cijevi, odnosno njihovog početnog oblika i dužine, provjeru graničnih vrijednosti radijusa savijanja, određivanje faktora elastičnog ispravljanja, dimenzionisanje radnih elemenata alata i zazora, te propisivanje tehnologije i redoslijeda zavarivanja pojedinih komponenti.

Na osnovu poznatih obrazaca i literaturnih preporuka određena je razvijena dužina cijevi sabiranjem dužina ravnih nedeformisanih dijelova i proračunom savijenih dijelova kao dužina lukova neutralne ose, koji su rednim brojevima na modeliranim segmentima naznačeni na slici 4, po izrazu:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i + \frac{\pi}{180} \cdot \sum_{i=1}^k [\varphi_i \cdot (r_{ui} + \xi \cdot s)] \quad \dots(1)$$

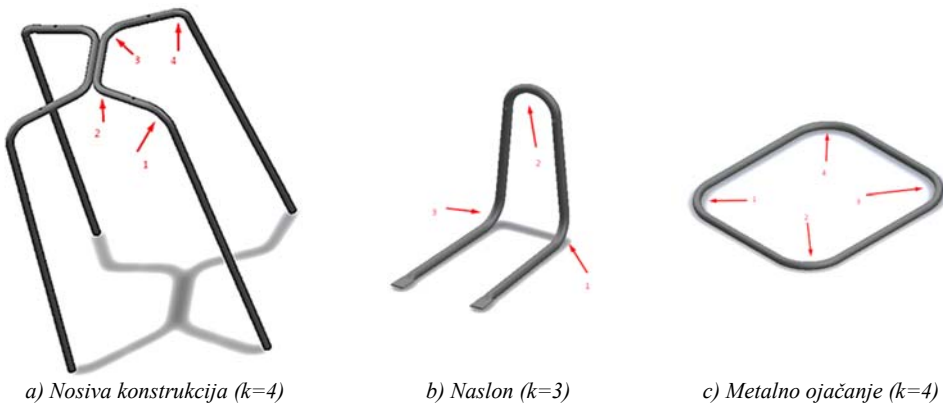
gdje je:

φ_i [°] - ugao savijenih zona,
 l_i [mm] - dužine ravnih dijelova,
 r_{ui} [mm] - unutrašnji radijusi savijanja,
 ξ - faktor pomjeranja neutralne linije,
 s [mm] - debljina materijala,
 n - ukupan broj nesavijenih dijelova,
 k - ukupan broj zona savijanja, slika 4.

Tabela 1. Proračunate razvijene dužine cijevi [mm]

Naziv segmenta barske stolice	Razvijena dužina
Lijevi i desni-nosiva konstrukcija	1781
Naslon	1179,2
Metalno ojačanje ili ukruta	1446,8

U tabeli 1. su date proračunate vrijednosti razvijениh dužina cijevi za oblikovanje metalnog okvira barske stolice.



Slika 4. Broj zona savijanja po pojedinim segmentima konstrukcije metalnog okvira barske stolice

Na isti način su za svaki segment konstrukcije provjerene vrijednosti minimalnih i maksimalnih graničnih radijusa savijanja zaključujući da se zadane vrijednosti radijusa savijanja $r=40$ mm na radnom predmetu nalaze između graničnih vrijednosti $r_{min}=5,4$ mm i $r_{max}=797,5$ mm, odnosno:

$$r_{min} = c \cdot s = 5,4 \text{ mm} < r = 40 \text{ mm} < r_{max} = \frac{s \cdot E}{2 \cdot \sigma_v} = 797,5 \text{ mm} \quad \dots(1)$$

gdje su:

c - faktor materijala.

s [mm] - debljina lima,

E [N/mm²] - modul elastičnosti,

σ_v [N/mm²] - granica tečenja.

Nakon detaljnog proračuna i definisanja ostalih elemenata tehnološkog postupka oblikovanja uključujući elastični povrat materijala, potrebne sile oblikovanja, ovalnosti i zadebljanja stijenki, te konstrukcije i izbora radnih elementa alata za savijanje na bazi provedenog modeliranja, izvršeno je efikasno savijanje cijevi, a njihovim spajanjem zavarivanjem i formiranjem cjelovitog metalnog okvira predmetne barske stolice koja je zadovoljila postavljene tehničko-tehnološke zahtjeve u pogledu njenog kvaliteta. Na slici 5. prikazan je detalj savijanja jednog segmenta cijevi i izgled oblikovanog metalnog kostura barske stolice.



Slika 5. Savijanje cijevi (lijevo) i finalni izgled metalnog dijela barske stolice (desno)

Modeliranje u postupcima obrade deformisanjem predstavlja efikasan alat za analizu uticajnih parametara i poboljšanje kvaliteta metalnih proizvoda [4]. Kroz simulaciju realnih uslova proizvodnje, mogu se pravovremeno uočiti i eliminisati potencijalni problemi. U slučaju izrade metalne barske stolice, modeliranje procesa savijanja cijevi omogućava viši stepen preciznosti, bolju estetsku obradu i veću sigurnost krajnjeg proizvoda. Primjena savremenih softverskih alata poput SolidWorksa omogućava poboljšanje tehničkih karakteristika proizvoda i značajno unapređenje projektne efikasnosti. Mogućnost trodimenzionalnog prikaza, simulacije opterećenja i kolizije pri savijanju, izrade kompletne dokumentacije prije fizičke izrade značajno smanjuje troškove i vrijeme proizvodnje, te doprinosi povećanju konkurentnosti i kvaliteta krajnjih proizvoda u metaloprerađivačkoj industriji.

4. ZAKLJUČAK

Modeliranje u postupcima obrade deformisanjem predstavlja efikasan alat za analizu uticajnih parametara i poboljšanje kvaliteta metalnih proizvoda [4]. Kroz simulaciju realnih uslova proizvodnje, mogu se pravovremeno uočiti i eliminisati potencijalni problemi. U slučaju izrade metalne barske stolice, modeliranje procesa savijanja cijevi omogućava viši stepen preciznosti, bolju estetsku obradu i veću sigurnost krajnjeg proizvoda. Primjena savremenih softverskih alata poput SolidWorksa omogućava poboljšanje tehničkih karakteristika proizvoda i značajno unapređenje projektne efikasnosti. Mogućnost trodimenzionalnog prikaza, simulacije opterećenja i kolizije pri savijanju, izrade kompletne dokumentacije prije fizičke izrade značajno smanjuje troškove i vrijeme proizvodnje, te doprinosi povećanju konkurentnosti i kvaliteta krajnjih proizvoda u metaloprerađivačkoj industriji.

5. REFERENCE

- [1] Stojković, M. i dr.: Modeliranje tehnoloških operacija numerički upravljanih mašina pomoću računara, Mašinski fakultet u Nišu, Niš 2023.
- [2] Saltagić, N.: Projektovanje tehnologije oblikovanja metalne barske stolice prema vlastitom idejnom rješenju, diplomski rad, Mašinski fakultet u Zenici, Zenica, 2024.
- [3] Plančić, I.; Ćurić, A.; Brkić-Omić, A.: Analysis of formability in bending using Solidworks software, 15th Scientific/Research Symposium with International Participation, "Metallic and nonmetallic materials", Zenica, B&H, 24th-25th April 2025.
- [4] Plančić, I.; Džulić, E., Analiza uticajnih parametara na kvalitet oblikovanih proizvoda postupkom dubokog izvlačenja, 12. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "Quality 2021", Zbornik radova, 107-112, Neum, BiH, 17. – 19. juni 2021.