

**ANALIZA ZAJEDNIČKIH UTICAJNIH PARAMETARA NA  
POSTUPKE OBRADNE SLOBODNIM KOVANJEM I REZANJEM S  
CILJEM DOBIJANJA FINALNIH PROIZVODA VISOKOG  
KVALITETA**

**ANALYSIS OF THE COMMON INFLUENCE OF FREE FORGING AND  
MACHINING PARAMETERS ON STEEL PRODUCTS QUALITY**

**Sabahudin Ekinović, Ibrahim Plančić, Edin Begović, Dino Ključanin**  
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici  
Zenica

**Omer Beganović**  
Institut "Kemal Kapetanović"  
Univerziteta u Zenici

**REZIME**

*Postupak oblikovanja metalnih pripremaka u finalne proizvode se uglavnom zasniva na izvođenju većeg broja proizvodnih operacija, odnosno tehnoloških postupaka obrade. Pri tome se za dobijanje finalnih izradaka najčešće vrši kombinacija postupaka primarnog oblikovanja, odnosno deformisanja i finalne obrade postupcima rezanja. Prethodnom obradom valjanjem, vučenjem ili kovanjem se utiče na mehaničke osobine metalnih proizvoda, a kasnijom finalnom obradom skidanjem strugotine se ispunjavaju zahtjevi u pogledu njihovog oblika, tačnosti i kvaliteta površine. Zajedničko sagledavanje uticajnih parametara na izlazne karakteristike proizvoda, te uspostavljanje njihove funkcionalne zavisnosti od velikog je značaja u savremenoj industrijskoj proizvodnji. U radu su identificirani najznačajniji i analizirani zajednički uticajni parametri obrade metalnih izradaka iz čelika 41Cr4 kroz postupke slobodnog kovanja i rezanja. Primjenom metodologije planiranog eksperimenta uspostavljena je njihova funkcionalna zavisnost s ciljem optimizacije procesa, odnosno dobijanja finalnog proizvoda željenih kvalitativnih karakteristika izraženih kroz njegove mehaničke osobine, tačnost dimenzija i hrapavost obrađene površine.*

**Ključne riječi:** slobodno kovanje, obrada rezanjem, proizvod, kvalitet

**ABSTRACT**

*Metal parts production is based on sequential utilization of different technologies (casting, forging, deep drawing, machining, surface treatment etc.). The most common approach is based on pre-forming or forming technologies followed up by conventional machining. Product mechanical properties are controlled or improved through the forming technologies. The final product shape is obtained by machining. Usually, those two processes were analyzed separately as well as their influence on the product quality. Common influence of the aforementioned technologies on final product quality characteristics plays significant role in modern production. This paper describes experimental procedure utilized for creating the model which will comprehend main aspects of the both technologies – forming and machining, in order to obtain the controllable mechanical properties and "smooth"*

*machining conditions necessary to reach high final product quality. Material used in experimental investigation was 41Cr4 steel.*

**Key words:** free forging, machining, product, quality

## **1. UVODNI DIO**

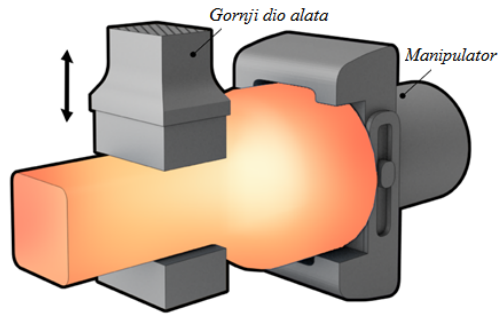
Izrada i oblikovanje proizvoda u metalnoj industriji se obično vrši većim brojem proizvodnih operacija, a najčešće i u okviru različitih postupaka obrade koji se temelje na njihovom specifičnom načinu izvođenja, odnosno određenoj tehnologiji obrade. S tim u vezi, prilikom izvođenja proizvodnih procesa u oblasti prerade metala jasno se izdvajaju primarni postupci oblikovanja bazirani najčešće na postupcima deformisanja kojima se tehnologijom kovanja, valjanja i vučenja dobijaju poluproizvodi u vidu blumova, slabova, gredica, ploča, profila, cijevi, žice, limova, folija i drugih vrsta priprema koji se uglavnom odlikuju jako jednostavnim oblicima, lošijim kvalitetom obrađene površine i grubljim tolerancijama izrade. Naknadno se ovako oblikovani metalni poluproizvodi postupcima sekundarne prerade, koji su najčešće bazirani na postupcima skidanja čestica materijala, oblikuju u finalne proizvode složenijih geometrijskih formi, preciznijih dimenzija, užih tolerancija izrade i znatno bolje kvaliteta obrađene površine [4]. Stoga je jako zanimljivo sagledati uticaj prethodne obrade postupcima deformisanja kojima se dobijaju dobre mehaničke osobine priprema na finalni kvalitet izradaka čiji se završni oblik i dimenzije najčešće ostvaruju postupcima obrade skidanjem čestica materijala, odnosno rezanja. Kao reprezentativni postupci obrade za potrebe predmetnih istraživanja u okviru ovog rada izabran je postupak slobodnog kovanja u toplom stanju kao primarno oblikovanje za dobijanje odgovarajućih mehaničkih osobina i postupak struganja kao sekundarna, odnosno finalna tehnologija obrade za dobijanje izradaka definisanog oblika, dimenzija i kvaliteta obrađene površine. Cilj provedenih istraživanja za potrebe ovog rada je da se izvrši analiza uticaja kombinovanog načina proizvodnje na kvalitativne karakteristike krajnjeg proizvoda. Predmetnom analizom ustvari treba da se provjeri mogućnost uspostavljanja funkcionalne veze između elemenata režima obrade slobodnim kovanjem i parametara obrade struganjem, kao veoma značajnih i aktuelnih tipova obrada u brojnim industrijskim procesima današnjice, te njihov međusobni uticaj na finalni kvalitet izradaka izražen mehaničkim karakteristikama, kvalitetom obrađene površine i silom rezanja. Uspostavljanjem funkcionalne zavisnosti omogućava se optimizacija procesa, odnosno njegova potpuna kontrola s ciljem dobijanja željenih kvalitativnih karakteristika finalnog proizvoda.

## **2. SPECIFIČNOSTI I IDENTIFIKACIJA NAJZNAČAJNIJIH UTICAJNIH PARAMETARA PREDMETNIH POSTUPAKA OBRADE**

Slobodno kovanje je najstariji i najjednostavniji način oblikovanja koji se odvija pomoću univerzalnih alata čija je osnovna karakteristika da ne moraju imati oblik koji odgovara obliku obratka. Oblikovanje priprema se vrši uz upotrebu većeg broja udaraca između ravnih površina na kovačkim čekićima ili na presama, kako je prikazano na slici 1. Za sitnije dijelove, može da se izvodi i ručno. Pri tome je širenje i izduživanje materijala u svim horizontalnim pravcima slobodno između radnih površina alata. Pripremi za slobodno kovanje velikih masa su odlivci velikih čeličnih blokova, odnosno ingoti ili čelični valjani poluproizvodi kružnog ili kvadratnog poprečnog presjeka u slučaju izrade otkovaka manjih dimenzija i male mase. Ako je komad koji se kuje manjih dimenzija, njegovo pridržavanje i manipulisanje izvodi radnik pomoću odgovarajućeg ručnog alata dok se kod većih komada pridržavanje i manipulacija izvodi pomoću specijalnih pokretnih uređaja, odnosno kovačkih manipulatora.

Slobodnim kovanjem se dobija širok dijapazon različitih oblika izradaka, ali se rijetko dobijaju finalni proizvodi. Razlog je u tome što su izradne tolerancije otkovaka jako široke, te je

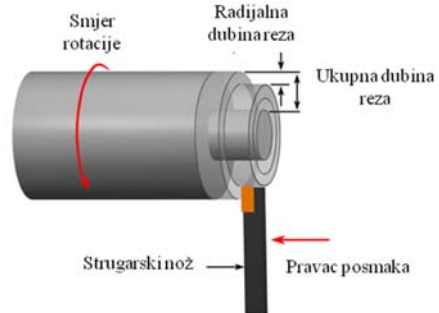
preciznost izrade dijelova relativno mala, a uz to je i kvalitet površine jako loš. Potreban kvalitet i ekonomičnost otkovka prilikom slobodnog kovanja osiguravaju se pravilnim izborom i odabirom dva osnovna kovačka parametra, a to su: temperatura kovanja i stepen prokivanja, odnosno stepen deformacije. Svaki od navedenih parametara je jako važan za uspješnost slobodnog kovanja i prilikom njihovog određivanja neophodno je pridržavati se preporuka u vezi sa izborom. S tim u vezi, u literaturi su za različite materijale dati temperaturni intervali kovanja čije se nepridržavanje redovno plaća defektima otkovaka. Stepen prokivanja kod slobodnog kovanja je svojevrsni sinonim za stepen deformacije, a karakteriše procenat smanjenja materijala deformisanjem, na račun povećanja njegove dužine. Predstavlja odnos površina poprečnog presjeka kod izduživanja ili visina otkovka za slučaj sabijanja prije i nakon deformisanja. Stepen prokivanja služi za procjenu relativnog poboljšanja mehaničkih osobina prilikom slobodnog kovanja. Tehnološki proces slobodnog kovanja uključuje kombiniranje većeg broja osnovnih i pomoćnih operacija slobodnog kovanja poput sabijanja, izduživanja, probijanja, savijanja, rezanja, uvijanja i zavarivanja za dobijanje otkovka.



Slika 1. Šema postupka slobodnog kovanja

Kod izrade metalnih proizvoda uobičajeno je da se nakon obrade deformisanjem vrši finalna obrada struganjem. Struganje predstavlja obradu odvajanjem čestica materijala koja se vrši na strugu, a kod koje glavno rotaciono kretanje vrši obradak, kako je šematski prikazano na slici 2. Pomoćno kretanje je pravolinijsko i izvodi ga alat. Mašinska obrada struganjem koristi se za izvođenje različitih operacija skidanjem strugotine, pri čemu je osnovna podjela izvršena prema pravcu izvođenja pomoćnog kretanja na uzdužno i poprečno struganje. Obrada struganjem predstavlja jako zastupljenu obradu koja se može primjeniti u procesu proizvodnje različitih vrsta proizvoda.

U toku same obrade potrebno je obezbijediti određenu silu koja će savladati otpor materijala razdvajanju čestica. Pri obradi struganjem, alat tj. rezna ivica najčešće izvodi rezanje pod određenim uglom u odnosu na normalu, a rijeđe pod pravim uglom. S obzirom na ovu činjenicu, sila potrebna za savladavanje ovog otpora je trokomponentna i sastoji se od glavne tj. tangencijalne sile rezanja koja ima pravac brzine rezanja, radijalne sile upravne na osu obrađivanog komada i aksijalne sile pomoćnog kretanja[5]. Na veličinu sile rezanja utiču različiti parametri koji se mogu odnositi na sami obradak ili proces rezanja poput hemijskog sastava materijala, elemenata režima obrade i geometrije reznog alata.



Slika 2. Šema postupka struganja [1]

Sam proces obrade struganjem definisan je pomoću tri osnovna elementa režima obrade. Ovi elementi imaju uticaj na mnoge činioce ovog procesa kao što su postojanost alata, karakteristika strugotine, vrijeme obrade, sile rezanja i integritet obrađene površine. Osnovni elementi režima obrade pri struganju su: brzina rezanja, posmak, dubina rezanja.

Ovi parametri imaju uticaj na veličinu sile koja se mora primjeniti kako bi se savladao otpor odvajanju čestica. Izrazito povećanje sile rezanja ima negativan uticaj na rezni alat i konstruktivne dijelove alatne mašine na kojoj se obrada izvodi, a korištenje većih sila pri obradi iziskuje upotrebu elektromotora većih snaga što se treba uzeti u obzir pri razmatranju ekonomskih aspekata proizvodnog procesa. Integritet obrađene površine posmatran pogotovo kroz topografiju date površine karakteristika je kojoj se posvećuje velika pažnja pri obradi materijala skidanjem strugotine. Za topografiju obrađene površine vezuje se elementarni parametar, a to je hrapavost površine. Odabir određenog postupka obrade, a s obzirom na tehnološka ograničenja će definisati moguću klasu hrapavosti obrađivane površine. Poboljšanje kvaliteta obrađene površine u pogledu hrapavosti ima veliku ulogu kod dijelova koji u toku rada dolaze u neposredni dodir. Takođe, hrapavost površine utiče na izdržljivost mašinskih dijelova u toku rada. Bolja hrapavost direktno je proporcionalna sa dinamičkom izdržljivošću radnih dijelova [3]. Osim ovoga, bolja hrapavost smanjuje sklonost dijelova ka koroziji, te omogućava manje trenje i trošenje pri kontaktu odnosno pruža bolje uslove rada sa tribološkog aspekta.

### 3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Prethodna obrada deformisanjem utiče na mehaničke karakteristike metalnih proizvoda koji se kasnije podvrgavaju finalnoj obradi skidanjem strugotine. Zajedničko sagledavanje njihovih karakteristika i uspostavljanje funkcionalne zavisnosti odgovarajućih parametara od velikog je značaja u proizvodnim procesima. Shodno tome za uspostavljanje njihove funkcionalne veze izvršena je izrada priprema tehnološkom metodom slobodnog kovanja, a naknadno je postupkom struganja obavljena njihova finalna obrada. Izrada uzoraka za potrebe istraživanja je izvršena prethodnim oblikovanjem postupkom slobodnog kovanja, kako je prikazano na slici 3. Za slobodno kovanje uzoraka korištena je jednocilindarska hidraulične presa Pitzman & Pfeifer oznake PO 200/4 snage 44 kW uz primjenu odgovarajućeg kovačkog alata, pomoćnih mjernih alata i pribora poput preciznih graničnika i mjerila za kontrolu u procesu proizvodnje. Zagrijavanje materijala na temperaturu obrade je vršeno u peći za termičku obradu radne snage 21 kW oznake KPSŽ-45 proizvođača Cer-Čačak. Predmetna istraživanja su realizirana na Institutu "Kemal Kapetanović" u Zenici koji posjeduje navedenu opremu za izradu otkovaka. Pored ove opreme za potrebe istraživanja angažirana je i dodatna istraživačka infrastruktura Instituta koja je neophodna za ispitivanje mehaničkih osobina dobijenih otkovaka poput kidalice od 200 i 500 kN i metalografsku analizu putem optičkog mikroskopa, a s ciljem praćenja njihovih kvalitativnih karakteristika kao osnove i ulaznih parametara za naknadnu finalnu obradu rezanjem za dobijanje metalnih proizvoda projektovanog nivoa kvaliteta. Nakon niza preliminarnih istraživanja parametara slobodnog kovanja sa aspekta dobijanja izradaka sa što povoljnijim svojstvom obradljivosti za naknadu obradu rezanjem ustanovljeno je da se slobodnim kovanjem na temperaturi 670 °C i sa odgovarajućim vrijednostima stepena deformacije postiže optimalno povećanje čvrstoćnih osobina. Stoga je završno toplo kovanje vršeno na temperaturi 670 °C sa stepenima deformacije od 12, 23 i 34 % nakon čega je mjerena tvrdoća i praćena njena ujednačenost po površini i poprečnom presjeku izratka. Ustanovljeno je optimalno deformaciono ojačavanje kroz povećanje tvrdoće materijala u intervalu od 200 do



Slika 3. Slobodno kovanje uzoraka [1]

220 HB što obezbijuje dobru obradljivost rezanjem bez naknadnih termičkih tretmana. Naknadna obrada istraživačkih uzoraka je izvršena postupkom obrade rezanjem, kako je prikazano na slici 4. Za obradu uzoraka struganjem korišten je univerzalni strug Potisje ADA – PA 501 snage 11 kW. Tom prilikom korišten je nosač alata Iscar oznake PCLNR 3232P-12 u kombinaciji sa specijalizovanim izmjenjivim CVD reznim alatom namijenjenim za obradu kovanih dijelova proizvođača Korloy oznake NC3215-MP. Brzina rezanja je imala vrijednost 70 m/min u svim eksperimentalnim tačkama. Krajnji prečnici uzoraka za obradu su: 45 mm, 41 mm i 37 mm dužine 200 mm prema navedenim stepenima deformisanja, respektivno. Prikupljanje podataka o sili rezanja je vršeno piezoelektričnim dinamometrom Kistler 9441B u kombinaciji sa mjernim pojačivačem Kistler 5070, dok je mjerenje hrapavosti površine izvršeno beskontaktnom metodom primjenom optičkog 3D mikroskopa Marsurf TS 50. Za provođenje istraživanja u oblasti obrade rezanjem korišteni su resursi Laboratorije za obradu rezanjem i alatne mašine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Zenici. Mehaničke karakteristike predmetnih uzoraka u pojedinim fazama realizacije istraživanja su određene uređajima za mjerenje tvrdoće materijala, mehanička ispitivanja materijala i metalografiju u sastavu laboratorija Instituta "Kemal Kapetanović" Univerziteta u Zenici.



Slika 4. Priprema uzoraka struganjem [1]

Tabela 1. Eksperimentalna postavka parametara predmetnih obrada

Nivo:	Stepen deformacije [%]	Posmak [mm/o]	Dubina [mm]	Brzina [m/min]
Donji	12	0.044	0.5	40
Srednji	23	0.124	1	130
Gornji	34	0.196	1.5	85

Korištenjem metodologije planiranog eksperimenta, uspostavljena je eksperimentalna postavka na bazi Box-Behnkenovog plana eksperimenta. U sklopu plana eksperimenta definisano je 15 eksperimentalnih tačaka uz odgovarajuće postavke odabranih parametara i uspostavu jedinstvenog nomenklaturnog sistema označavanja ispitnih površina i uzoraka za svaku eksperimentalnu tačku. Sprovedeno je ukupno četiri eksperimenta pri čemu su za obje vrste obrade odabrane vrijednosti uticajnih faktora definisane na tri nivoa, a što je i predstavljeno u tabeli 1.

Tabela 2. Matrica plana eksperimenta [1]

StdOrder	RunOrder	$\phi$ [%]	a [mm]	s [mm/o]	Ra [ $\mu$ m]
4	1	+1	+1	0	3.3
1	2	-1	-1	0	5.0
14	3	0	0	0	3.4
6	4	+1	0	-1	4.3
5	5	-1	0	-1	6.5
7	6	-1	0	+1	3.0
8	7	+1	0	+1	3.6
12	8	0	+1	+1	3.1
2	9	+1	-1	0	3.8
11	10	0	-1	+1	4.1
13	11	0	0	0	3.0
9	12	0	-1	-1	5.7
10	13	0	+1	-1	4.2
15	14	0	0	0	3.7
3	15	-1	+1	0	3.1

Za svaki eksperiment je definisana matrica plana eksperimenta, redosljed izvođenja i rezultati mjerenja, kao što je prikazano u tabeli 2. za primjer matrice izvođenja prvog eksperimenta. Na taj način je uspostavljena funkcionalna zavisnost ključnih parametara obrade deformisanjem i obrade rezanjem, te njihov međusobni uticaj na finalni kvalitet izradaka izražen mehaničkim karakteristikama, kvalitetom obrađene površine i silom rezanja.

#### 4. ANALIZA REZULTATA

Korištenje navedenih planova eksperimenta omogućilo je da se sa najmanjim brojem eksperimentalnih tačaka proces karakteriše u nelinearnom domenu. Na osnovu rezultata sprovedene analize varijanse, određene su karakteristične modelske veličine u matematičkom modelu. Signifikantni parametri su stepen deformisanja, brzina, posmak i dubina rezanja. Također, uticaj interakcija je prisutan i to interakcije prvog reda između brzine i posmaka, te stepena deformisanja i posmaka, kao i kvadrata posmaka rezanja.

Na pragu značajnosti  $\alpha=0.05$ , na osnovu izvršenih analiza i određenih vrijednosti standardne greške, te zadovoljavajućih vrijednosti koeficijenata determinacije, uspostavljeni su matematički modeli prikazani izrazima 1. i 2 [2].

$$F = 59397.059 \varphi^{0.1270} v^{-0.688-0.2485 \cdot \ln s} s^{1.843} \dots\dots\dots(1)$$

$$Ra = 10.916 - 0.1321\varphi - 1.225a - 57.9s + 113.3s^2 + 0.841\varphi \cdot s \dots\dots\dots(2)$$

Nakon upoređivanja ekperimentalno dobijenih vrijednosti i vrijednosti dobijenih matematičkim modeliranjem procesa, dobijeno je veoma dobro podudaranje rezultata, te su predstavljeni modeli usvojeni kao adekvatni u pogledu kriterija obradljivosti-sile rezanja i hrapavosti obrađene površine.

#### 5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Cjelovitim sagledavanjem procesa i njegovih sekvencijalnih tehnologija obrade, te pravilnim izborom parametara režima, moguće je uticati na kvalitativne karakteristike proizvoda. U toku naknadne obrade skidanjem strugotine identifikovan je uticaj prethodne obrade deformisanjem materijala u toplom stanju postupkom slobodnog kovanja na izradak, posmatran kroz silu rezanja i kvalitet obrađene površine. Izvršenim analizama uspješno su uspostavljeni adekvatni predviđajući matematički modeli sa visokim vrijednostima stepena determinacije na pragu značajnosti  $\alpha=0.05$  koji dobro opisuju posmatrani proces. Metodom prikazanom u radu su u funkcionalnu vezu dovedeni parametri obrade slobodnim kovanjem i parametri obrade struganjem sa jedne strane, te sile rezanja i hrapavost materijala kao pokazatelji obradljivosti materijala, odnosno bitne karakteristike kvaliteta proizvoda sa druge strane.

#### ZAHVALA

Autori rada se zahvaljuju Federalnom ministarstvu obrazovanja i nauke Bosne i Hercegovine za finansijsku podršku projektu: "Modeliranje zajedničkog uticaja parametara procesa obrade deformisanjem i rezanjem s ciljem podizanja proizvodnje na viši tehnološki nivo" prema konkursu za sufinansiranje NI i IR projekata iz 2019. godine, a u okviru koga je nastao i ovaj rad.

#### 6. REFERENCE

- [1] D. Ključanin, Istraživanje zajedničkog uticaja parametara obrade deformisanjem i rezanjem na pokazatelje obradljivosti čeličnih materijala – Magistarski rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici, 2019.
- [2] Plančić Ibrahim, Begović Edin, Ključanin Dino, Beganović Omer, Istraživanje kvaliteta funkcionalnih površina beskontaktnom metodom pri struganju toplo kovanog čelika 41Cr4, 11. Naučno-stručni skup sa međunarodnim učešćem "Quality 2019", 203-208, Neum, B&H, 14. - 16 jun 2019.
- [3] A. T. Abbas, M. Alata, A. E. Ragab, M. M. E. Rayes and E. A. E. Danaf, "Prediction Model of Cutting Parameters for Turning High Strength Steel Grade-H: Comparative Study of Regression Model versus ANFIS," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2017, 2017.
- [4] V. V. Silberschmidt, S. M. A. Mahdy, M. A. Gouda, A. Naseer, A. Maurotto and A. Roy, "Surface-roughness improvement in ultrasonically assisted turning," in *2nd CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI): Procedia CIRP 13*, Nottingham, 2014.
- [5] S. Pauliuk, T. Wang and D. B. Müller, "Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 71, pp. 22-30, 2013.