

## SPECIFIČNOSTI I UTICAJNI PARAMETRI NA KVALITET IZRAĐAKA PRI INKREMENTALNOM OBLIKOVANJU LIMA PRIMJENOM ROBOTA

### CHARACTERISTICS AND INFLUENTIAL PARAMETERS ON THE QUALITY OF PRODUCTS MADE BY ROBOFORMING TECHNOLOGY

Ibrahim Plančić, Malik Čabaravdić, Edin Begović  
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici

#### REZIME

*Inkrementalno oblikovanje ili deformisanje sa parcijalnim zahvatom alata je jedan od najstarijih vidova oblikovanja metala pri kojem se finalni izradak oblikuje sukcesivnim, odnosno parcijalnim djelovanjem alata na obradak. Međutim, intenzivnija primjena inkrementalnih postupaka oblikovanja u industrijskoj praksi započinje tek u prvoj polovini XXI vijeka kada dolazi do ubrzanog razvoja novih postupaka inkrementalnog deformisanja. Posebno je to izraženo u oblasti oblikovanja lima. S tim u vezi, danas se inkrementalno oblikovanje lima definiše kao savremeni postupak obrade deformisanjem kojim se pružaju nove i znatno bolje mogućnosti preoblikovanja tankostijenih limova u finalne proizvode. Osnovne specifičnosti ovog postupka oblikovanja se odnose na znatno duže trajanje procesa i manje potrebne sile deformisanja, te se ono koristi uglavnom za proizvodnju dijelova u manjim serijama ili prototipova kompleksnijih geometrijskih formi i većih gabarita. Postupak inkrementalnog oblikovanja pokazuje veliku fleksibilnost, ne zahtijeva skupe alate i može se izvoditi na različitim mašinama uključujući posebne mašine za inkrementalno oblikovanje, CNC glodalice, a u novije vrijeme i sve učestaliju primjenu industrijskih robota. U radu su predstavljene osnovne specifičnosti postupka inkrementalnog oblikovanja koji se izvodi primjenom industrijskih robota sa identifikacijom uticajnih parametara na kvalitet oblikovanih dijelova, a na bazi provedenih istraživanja na Katedri za proizvodne sisteme (LPS) Ruhr univerziteta u Bochumu. Istraživanja su bazirana na optimiranju sile deformisanja i dobijanju tačnije geometrije finalnih proizvoda. Iskustva i rezultati provedenih istraživanja predstavljaju osnovu za definisanje preporuka efikasnije implementacije predmetnog postupka u industrijskoj praksi i laboratorijama visokoškolskih institucija.*

**Ključne riječi:** Inkrementalno oblikovanje lima, roboforming, kvalitet proizvoda

#### SUMMARY

*Incremental sheet metal forming with partial engagement of the tool is one of the oldest forms of metal shaping in which the final workpiece is shaped by the successive, or partial, action of the tool on the workpiece. However, the more intensive application of incremental forming procedures in industrial practice began in the first half of the 21st century with development of new incremental deformation procedures. This is especially pronounced in the field of sheet metal forming. In this regard, today incremental sheet metal forming is defined as a modern deformation processing procedure that provides new and significantly better possibilities for transforming thin-walled sheets into final products. The basic specifics of this forming procedure relate to a significantly longer duration of the process and less required deformation force, and it is used mainly for the production of parts in smaller series or prototypes of more complex geometric shapes and larger dimensions. The incremental forming process shows great flexibility, does not require expensive tools, and can be performed on a variety of machines*

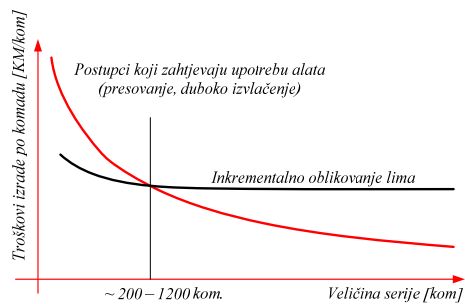
including special incremental forming machines, CNC milling machines, and more recently, the increasingly common use of industrial robots. The paper presents the basic specifics of the incremental forming procedure, which is performed using industrial robots, with the identification of parameters influencing the quality of formed parts, based on research conducted at the Department of Production Systems (LPS) of the Ruhr University in Bochum. The research is based on optimizing the deformation force and obtaining a more accurate geometry of the final products. Experiences and results of conducted research represent the basis for defining recommendations for more efficient implementation of the subject procedure in industrial practice and laboratories of higher education institutions.

**Keywords:** Inkremental sheet metal forming, roboforming, product quality

## 1. UVODNI DIO

Pod pojmom kvaliteta proizvoda u metalnoj industriji podrazumijevaju se cjelokupna svojstva koja određuju sposobnost proizvoda da zadovolji određene zahtjeve i potrebe potrošača. Predmetna svojstva se najčešće izražavaju putem tehničke dokumentacije, specifikacija ili normiranim karakteristikama propisanim internim, nacionalnim ili međunarodnim standardima. Kvalitet metalnih proizvoda iz lima se najčešće obezbijeduje preradom lima u hladnom stanju adekvatnom tehnološkom varijantom oblikovanja uz primjenu odgovarajućih sredstava za podmazivanje. Usljed efekta ojačavanja materijala hladno oblikovani dijelovi se odlikuju znatno boljim mehaničkim osobinama, visokom tačnošću, ponovljivošću oblika i kvalitetom površine. Za dobijanje metalnih proizvoda najvišeg nivoa kvaliteta jako je važno izvršiti izbor optimalne tehnološke varijante oblikovanja. Sve izraženiji zahtjevi za složenim geometrijskim oblicima manje mase i veće nosivosti radnih predmeta uzrokuju da je njihova stvarna proizvodnja klasičnim tehnologijama oblikovanja veoma komplikovana i skupa. Primjenom FEM analize i optimizacije dijelova pomoću računara oblici radnih predmeta su postali još složeniji, a uprkos činjenici da primjena savremenih računara i softverskih aplikacija

u velikoj mjeri olakšava modeliranje ovakvih oblika u fazi projektovanja i razrade tehnologije oblikovanja, njihova izrada, posebno u slučaju manjeg broja radnih predmeta kada nije isplativa konstrukcija i primjena skupih alata, postaje sve složenija i komplikovanija. Stoga je adekvatan odgovor na ove zahtjeve primjena i razvoj postupaka inkrementalnog oblikovanja koji se danas sve više istražuju i koriste za izradu manjeg broja dijelova ili prototipova metalnih proizvoda složenije konfiguracije. Ova metoda oblikovanja u takvim slučajevima omogućava efikasnije oblikovanje i značajno smanjenje troškova, odnosno ekonomsku isplativost za izradu manjih serija radnih predmeta, kako je prikazano na slici 1. Inkrementalno oblikovanje lima je sve više razlog interesovanja naučno-istraživačkih institucija zbog značajnog potencijala i primjenljivosti u različitim oblastima. Posebno treba naglasiti obećavajuće rezultate u proizvodnji medicinskih implantata primjenom asimetričnog inkrementalnog oblikovanja. S obzirom da se postupci inkrementalnog oblikovanja limova odlikuju izazitom fleksibilnošću, primjenom univerzalnih i jednostavnih alata, te različitim mašina za oblikovanje praktično se kao adekvatan odgovor na konkurentske izazove u nekoliko posljednjih desetljeća u kontinuitetu razvijaju novi pristupi i metode inkrementalnog oblikovanja lima. Osvrt na ključne specifičnosti i najznačajnije varijante inkrementalnog oblikovanja lima predstavljen je u nastavku.



Slika 1. Komparacija troškova oblikovanja u zavisnosti od vrste postupka i veličine serije

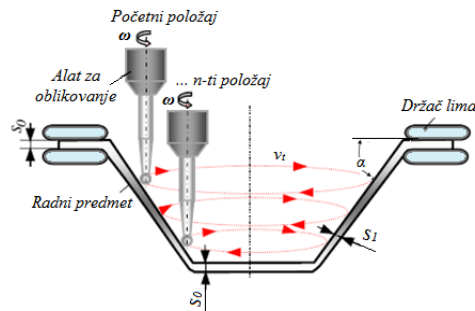
## 2. INKREMENTALNO OBLIKOVANJE LIMA

S obzirom da su se postupci oblikovanja lima počeli razvijati tek krajem 19. vijeka što je znatno kasnije od zapreminskog deformisanja to je i inkrementalno oblikovanje tankih limova tehnologija koja se javlja tek početkom prošlog vijeka. Njen daljnji razvoj omogućen je prije svega razvojem i korištenjem računarski kontrolisanih obradnih mašina, odnosno CNC mašina, a potom i robota za izradu složenijih i mnogostruko kvalitetnijih proizvoda u malim serijama i za potrebe brze izrade prototipova.

Danas, tehnologija inkrementalnog oblikovanja zajedno sa rotacionim izvlačenjem predstavlja reprezentativnu varijantu oblikovanja lima sa parcijalnim zahvatom alata što omogućava primjenu jednostavnijih i jeftinijih alata univerzalnog karaktera u odnosu na klasične postupke oblikovanja lima. Njihova univerzalnost se ogleda u mogućnostima izrade različitih oblika, formi i dimenzija radnih predmeta iz lima za razliku od klasičnih tehnoloških varijanti oblikovanja za koje je najčešće svaki alat specijalan jer su njegovi radni elementi prilagođeni konkretnom obliku i dimenzijama izradaka za svaku fazu oblikovanja. Pored toga, sam postupak oblikovanja se može brzo korigovati jednostavnim unosom računarskih naredbi bez potrebe prepravki ili dorade alata i pribora kako bi se postigao gotov proizvod. Oblikovanje dijelova od lima postupkom inkrementalnog, odnosno parcijalnog oblikovanja izvodi se visokom koncentracijom pritiska u jednoj tački obrtnim djelovanjem jednostavnog alata na lim koji se kreće određenom putanjom, a koji malim pomacima kontinuirano ostvaruje niske vrijednosti deformacije i parcijalno oblikovanje. Tako se materijal višestruko deformiše do formiranja konačnog oblika, kako je prikazano na slici 2. Kod ovakvog vida oblikovanja tečenje materijala je ograničeno na vrlo usku oblast trenutnog kontakta alata i obratka koja je višestruko manja nego kod konvencionalnih postupaka deformisanja, odnosno postupaka oblikovanja sa kompletnim zahvatom alata.

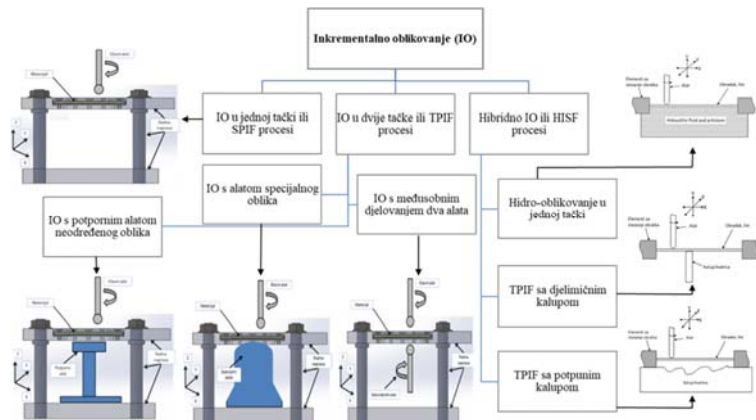
Tokom procesa inkrementalnog deformisanja lima, obradak se čvrsto pridržava steznim prstenom odnosno držačem lima, dok se određeno područje lima oblikuje koristeći alat za deformisanje pojedinačnih tačaka na obratku. Postupak je vrlo jednostavan, a na ovaj način mogu se dobiti vrlo složene konfiguracije obratka koje bi bilo vrlo teško ili čak nemoguće proizvesti klasičnim postupcima oblikovanja. To je omogućeno kretanjem alata po tačno zahtijevanoj putanji koje se ostvaruje CNC upravljanjem. Po svojoj koncepciji, inkrementalno deformisanje lima ima sličnosti sa rotacionim izvlačenjem. Međutim, bitnu razliku predstavlja činjenica da se rotacionim izvlačenjem mogu oblikovati samo aksijalno simetrični dijelovi, dok su mogućnosti obrade lima inkrementalnim deformisanjem mnogo veće jer omogućava izradu raznih kutijastih oblika i nesimetričnih dijelova. Iako se postupak primjenjuje za oblikovanje tankih limova, debljine od 0,4 mm do 3,0 mm razvijeno je više varijanti njegove primjene koje se generalno, a s obzirom na način oblikovanja mogu klasificirati na:

- Inkrementalno oblikovanje u jednoj tački ili Single Point Incremental Forming (SPIF),
- Inkrementalno oblikovanje u dvije tačke ili Two Point Incremental Forming (TPIF) i
- Kombinovano, odnosno hibridno inkrementalno oblikovanje (HISF).



Slika 2. Postupak inkrementalnog oblikovanja lima u jednoj tački

Detaljnija podjela postupaka inkrementalnog oblikovanja (IO) sa grafičkim prikazom načina izvođenja svakog od njih predstavljena je na slici 3. Uočava se da se inkrementalno oblikovanje u dvije tačke može izvoditi sa potpunim alatom neodređenog oblika, potpunim alatom specijalnog oblika i međusobnim djelovanjem dva alata.



Slika 3. Klasifikacija postupaka inkrementalnog oblikovanja [3]

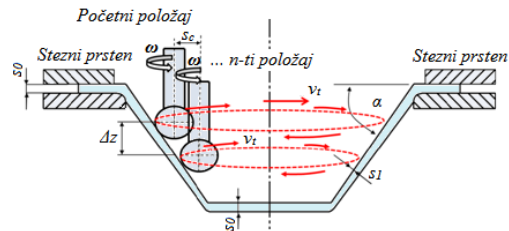
Sa aspekta primjene robota posebno do izražaja dolazi inkrementalno oblikovanje s međusobnim djelovanjem dva alata, a koje je karakteristično za izradu složenijih oblika i nesimetričnih dijelova. Inkrementalno oblikovanje omogućava veći stepen deformacije, te mogućnost oblikovanja materijala manje deformabilnosti i veće čvrstoće. U odnosu na druge postupke oblikovanja lima poput dubokog izvlačenja, rotacionog oblikovanja, presovanja, hidro deformisanja i sl. primjetna je dobra podudarnost tehničko tehnoloških karakteristika inkrementalno oblikovanih limenih predmeta. Ovo se može uočiti na slici 4. na kojoj je zelenom bojom naznačeno područje karakterističnih komparativnih elemenata izrađenih dijelova inkrementalnom tehnologijom lima. Zahvaljujući svemu ovome izuzetno je širok spektar proizvoda koje je moguće sa adekvatnim kvalitetom i preciznošću ostvariti tehnologijom inkrementalnog oblikovanja limova uz relativno male proizvodne resurse.

Karakteristike izradaka	Područje karakteristika	
	Min.	Max.
Maksimalne dimenzije	20 mm	5 m
Tolerancije izrade	0,5 mm	5 mm
Minimalni radijus	1 mm	50 mm
Kvalitet površine	'Dobar'	'Odličan'
Ugao nagiba	0°	90°
Debljina lima	0,4 mm	3 mm

Slika 4. Komparativne karakteristike izradaka inkrementalnog oblikovanja u odnosu na druge postupke oblikovanja limova [6]

**2.1. Potrebni resursi i identifikacija uticajnih parametara za inkrementalno oblikovanje**  
 Neophodni elementi za primjenu tehnologije inkrementalnog oblikovanja su odgovarajuća mašina sa pripadajućim CAD modelom na osnovu kojeg se definira putanja alata, alat koji deformiše lim, naprava za držanje i stezanje alata sa kalupom ukoliko je kalup predviđen, te lim odnosno materijal koji se oblikuje. Zbog jednostavnosti pripreme i izvođenja procesa, u najvećem broju istraživanja vršenim za procese inkrementalnog oblikovanja, uticajni parametri na uspješnost i efikasnost procesa oblikovanja se identifikiraju na SPIF postupku. S tim u vezi, a kako je predstavljeno na slici 3., kao osnovni uticajni parametri postupka inkrementalnog oblikovanja smatraju se:  $\alpha$  - ugao spuštanja alata,  $\Delta z$  - vertikalni korak alata, odnosno inkrementalna dubina obrade,  $\omega$  - ugaona brzina alata,  $s_C$  - udaljenost između horizontalnih prolaza alata,  $v_T$  – posmak,  $s_0$  - početna debljina lima i  $s_I$  - nova stanjena debljina lima.

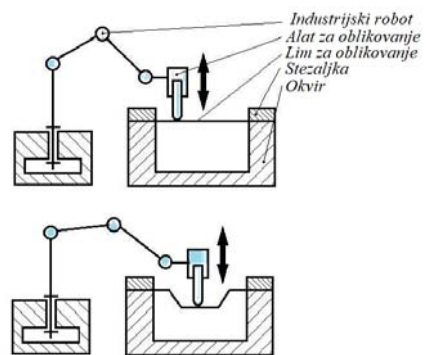
Ugao spuštanja alata  $\alpha$  predstavlja najbitniji parametar tehnologije koji najviše utiče na sposobnost oblikovanja i veličinu plastične deformacije koja se može ostvariti prije otkaza materijala. Istraživanja pokazuju da uglovi od  $45^\circ$  do  $60^\circ$  daju najbolje rezultate u smislu kvaliteta površine. Veličina vertikalnog koraka  $\Delta z$  po z-osi u tehnologiji inkrementalnog oblikovanja je drugi uticajniji parametar procesa, odnosno u velikoj mjeri utiče na kvalitet i tačnost izradaka. Pored toga, vertikalni korak alata značano utiče na vrijeme trajanja procesa oblikovanja, te je neophodno isti u što većoj mjeri optimizirati. Istraživanja potvrđuju da se sa povećavanjem koraka smanjuje kvalitet obrađene površine kao i deformabilnost materijala. Ugaona brzina alata  $\omega$  je brzina kojom se obrće dio alata koji deformiše obradak, a koju alat preuzima od mašine. Dejstvo parametra ugaone brzine je značajno na kvalitet površine, deformabilnost lima, intenzitet trenja, a samim tim i na temperaturu procesa. Slično dejstvo na proces inkrementalnog oblikovanja kao i vrijednost ugaone brzine alata ima i posmak  $v_T$ . Stoga je smisao optimizacije posmaka dobijanje adekvatnog kvaliteta i preciznosti finalnog proizvoda za prihvatljivo vrijeme obrade. Kod postupaka inkrementalnog oblikovanja jako značajan parametar je odnos početne i krajnje debljine lima u smislu kontrole redukcije debljine zida, Stoga je tokom samog postupka neophodno pratiti trenutnu debljinu lima u smislu stabilnog održavanja procesa. Redukcija debljine zida ili stanjivanje lima je posljedica lokalnog deformisanja. Ispituje se u odnosu na veličine vertikalnog koraka alata  $\Delta z$  i udaljenost između horizontalnih prolaza alata  $s_c$ .



Slika 3. Identifikacija uticajnih parametara SPIF

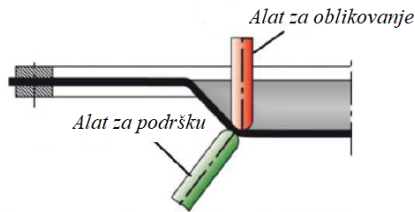
### 3. INKREMENTALNO OBLIKOVANJE POMOĆU ROBOTA

Za ekonomičnu izradu specifičnih prototipova ili limenih proizvoda u manjim količinama postupcima inkrementalnog oblikovanja u nekoliko posljednjih desetljeća intenzivno se razmatraju i razvijaju različiti načini primjene robota. S tim u vezi, u literaturnim izvorima i istraživačkim radovima danas je uobičajeno da se tehnološki postupak inkrementalnog oblikovanja koji se izvodi primjenom robota naziva Roboforming. Razvijena su uglavnom dva pristupa u primjeni robota za inkrementalno oblikovanje lima bez kalupa. Zbog intenzivnije pojave vibracija lima tokom oblikovanja manje je u primjeni postupak koji se zasniva na oblikovanju prethodno pričvršćenog lima u ramu korištenjem uzastopnog udarnog dejstva alata koji se pomjera pomoću robota duž definisane putanje oblikovanja, a čiji je princip predstavljen na slici 4. Primjena Roboforminga i opsežnija istraživanja se vrše za postupak oblikovanja bez kalupa na principu asimetričnog inkrementalnog oblikovanja. Pri tome se najčešće koristi postupak koji se bazira na fleksibilnom oblikovanju sinhronim kretanjem i međusobnim djelovanjem dva univerzalna alata za oblikovanje, a čiji je princip rada prikazan je na slici 5. Sinhronizovano kretanje alata za oblikovanje i podršku obezbjeđuje se pomoću slobodno programabilnog usklađenog kretanja



Slika 4. Inkrementalno oblikovanje industrijskim robotom udarnim dejstvom [5]

dva industrijska robota. Shodno tome, na ovom principu je za potrebe istraživanja u području robotskog inkrementalnog oblikovanja lima, Odsjek za proizvodne sisteme na Univerzitetu



Slika 5. Princip Roboforminga

Ruhr Bochum razvio postrojenje za istraživanje koje se sastoji od dva serijska robota KUKA KR360 i okvira, odnosno rama kao držača priprema iz lima, slika 6. Svaki robot je opremljen držačem alata sa sfernim vrhom. Glavni ili 'Master' robot je podržan od podređenog ili 'slave' robota [4]. Platina metalnog lima je pričvršćena u vertikalnoj ravni između dva robota u čvrstom okviru, odnosno rami. Glavni robot postepeno silom pritiska djeluje na lim, formirajući limeni izradak prema obliku putanje alata. Podređeni robot pruža podršku na suprotnoj strani lima kako bi glavni robot mogao vršiti aktivno oblikovanje lima deformativnom silom pritiska na lim. Roboti su umreženi u tzv. KUKA RoboTeam. To omogućava robotima da izvode kooperativne transformacije tokom procesa kroz sinhronu pokrete. Roboti imaju odgovarajuće alate za oblikovanje lima, koji su pričvršćeni na prirubnice, a između njih je pozicioniran FT-NET Omega191 senzor sile/momenta iz SCHUNK GmbH & Co. KG. Lim koji treba formirati je fiksiran u steznom okviru i usidren u podu između dva robota. Stezni okvir omogućava fiksiranje lima različitih veličina koje mogu biti u rasponu od 220 mm x 220 mm do 1500 mm x 600 mm. Na slici 7. detaljnije je prikazan položaj alata i strukture okvira za stezanje tokom oblikovanja. Postrojenje za istraživanje također sadrži KR C4 kontrolere koji su kablom povezani sa robotima i ručnim uređajem za programiranje. Svi uređaji su dio ćelije za roboformiranje, a računar koji služi za kontrolu procesa, odnosno kompenzaciju krutosti i kontrolu sile se nalazi izvan ćelije.

Dosadašnja istraživanja na Odsjeku za proizvodne sisteme bila su usmjerena na analizu uticajnih parametara na efikasnost postupka oblikovanja, silu pritisku i geometriju radnog komada, eliminaciju elastičnog povrata materijala, te poboljšanje preciznosti formiranih oblika i tačnosti njihovih dimenzija kroz različite pristupe što uspješnije kompenzacije krutosti robotskog sistema. Vlastita iskustva autora rada i rezultati dosadašnjih istraživanja sa Univerziteta Ruhr u Bochumu kao i drugih istraživanja iz domena inkrementalnog oblikovanja treba da posluže kao osnova za pripremu neophodnih elemenata na što uspješnijoj implementaciji predmetnog postupka oblikovanja na Mašinskom fakulteta u Zenici, a kasnije i u industrijskoj primjeni u regiji centralne BiH.

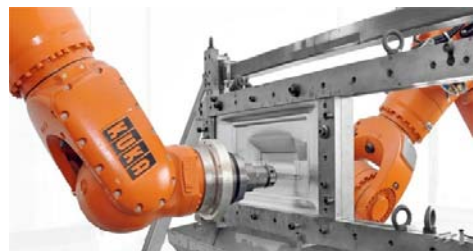
#### 4. IMPLEMENTACIJA POSTUPAKA INKREMENTALNOG OBLIKOVANJA

Uspješna implementacija tehnologije inkrementalnog oblikovanja podrazumijeva primjenu adekvatne metodologije koja obuhvata nekoliko koraka prilikom oblikovanja proizvoda iz lima. Redosljed ovih koraka predstavljen je na slici 8.

se sastoji od dva serijska robota KUKA KR360 i okvira, odnosno rama kao držača priprema iz lima, slika 6. Svaki robot je opremljen držačem alata sa sfernim vrhom. Glavni ili 'Master' robot je podržan od podređenog ili 'slave' robota [4]. Platina metalnog lima je pričvršćena u vertikalnoj ravni između dva robota u čvrstom okviru, odnosno rami. Glavni robot postepeno silom pritiska djeluje na lim, formirajući limeni izradak prema obliku putanje alata. Podređeni

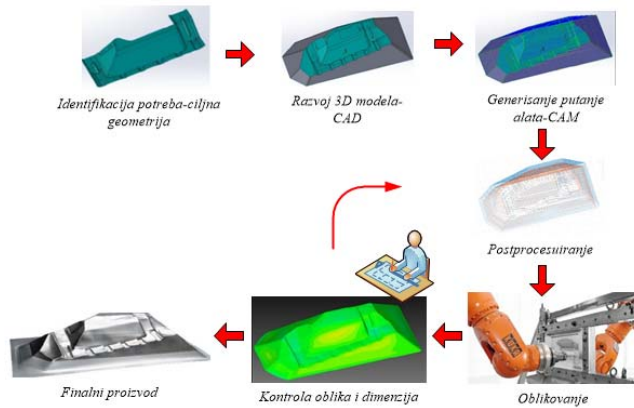


Slika 6. Kuka RoboTeam u postupku Roboforminea



Slika 7: Postupak Roboformiranja [2]

Na bazi modela u CAM softverima generišu se putanje alata uzimajući u obzir tip alata i dostupni radni prostor nakon stezanja lima na napravi. U slučaju inkrementalnog oblikovanja primjenom robota postprocesuiranjem se generisane putanje alata prevode u programe za upravljanje i animaciju kretanja robota. Parametri procesa se biraju prema preporukama ili literaturnim izvorima. Najbitniji parametri koji trebaju biti optimizirani su posmak, brzina obrtanja alata i vertikalni korak alata. Prije početka oblikovanja potrebno je odabrati alat i izraditi ram, odnosno napravu za držanje lima u skladu sa proizvodnim kapacitetima uzimajući u obzir mogućnost postavljanja rama ili naprave na raspoloživu površinu ili radni sto CNC alatne mašine. Lim se steže na ram ili napravu, a nakon toga se vrši oblikovanje lima. Postupak se najčešće izvodi u više prolaza. Nakon oblikovanja lim se ravnomijerno otpušta sa naprave za stezanje. Prema potrebi može se vršiti dodatna obrada poput opsjecanja, čišćenja i slično. Posljednji korak je analiza procesa i proizvoda, te se razmatraju eventualna poboljšanja procesa.



Slika 8. Dijagram toka na implementaciji postupka roboforminga

#### 4.1. Analiza mogućnosti i preporuke za eksperimentalnu primjenu inkrementalnog oblikovanja na Mašinskom fakultetu u Zenici

Shodno definisanim pozitivnim aspektima primjene postupaka inkrementalnog oblikovanja i potrebe za njihovom implementacijom s ciljem izučavanja i optimiranja parametara primjene na Mašinskom fakultetu u Zenici neophodno je izvršiti analizu postojećih resursa. Postojeće laboratorije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Zenici posjeduju neophodne resurse za početnu implementaciju postupaka inkrementalnog oblikovanja sa i bez matrice. Za inkrementalno oblikovanje sa primjenom matrice može se koristiti petosna glodalica DMU monoBlock 60, slika 9. sa pripadajućom opremom i priborom u Loram laboratoriji Mašinskog fakulteta. Ova mašina je po svojim karakteristikama i tehničkim specifikacijama adekvatna za obradu limova inkrementalnim oblikovanjem budući da su za izradu osnovnih oblika proizvoda ovom tehnologijom dovoljni i troosni obradni centri. S obzirom da je na Mašinskom fakultetu u Zenici instalisan robot KUKA KR 150 za potrebe edukacije studenata, koji je prikazan na slici 10. isti se može koristiti za inkrementalno oblikovanje dijelova od lima direktno iz CAD modela bez potrebe za matricom. Uz odgovarajući softverski paket za kreiranje, simulaciju i projektovanje putanje alata za asimetrični proces inkrementalnog oblikovanja u jednoj tački predmetni robot se može efikasno koristiti za proces inkrementalnog oblikovanja tanjih limova. Za primjenu inkrementalnog oblikovanja u dvije tačke s međusobnim djelovanjem dva alata neophodno je izvršiti nabavku još jednog robota sličnih



Slika 9. Glodalica DMU 60 monoBlock

karakteristika. Preostale potrebne elemente za implementaciju navedene tehnologije oblikovanja poput potrebnih oblikača i kalupa, kao i ramova za stezanje lima moguće je izraditi u objektima fakulteta u saradnji sa vanjskim dobavljačima. Preporuke za mogući izbor oblika, materijala i procesnih parametara prema raspoloživim resursima detaljnije su predstavljene u [4].

## 5. ZAKLJUČAK

Inkrementalno oblikovanje je tehnologija oblikovanja limova kojom se dobijaju složene geometrijske forme limenih proizvoda visokog kvaliteta. Njihov kvalitet ogleda se u mogućnošću ostvarenja dimenzione preciznosti oblikovanih dijelova i njihovim dobrim mehaničkim osobinama koje su rezultat ojačavanja materijala tokom hladne plastične deformacije. U radu je kroz teorijsku razradu postojećih metoda inkrementalnog oblikovanja i analizu uticajnih parametara na efikasnost procesa u postupku oblikovanja prototipova ili manjeg broja dijelova složenijih geometrijskih formi ukazano na značaj primjene i potrebu za detaljnijim istraživanjima predmetne tehnologije oblikovanja, te način izbora ključnih parametara oblikovanja. Predstavljanje alternativne metode proizvodnje dijelova iz lima inkrementalnim postupcima oblikovanja pomoću CNC glodalica i industrijskih robota ukazuju na moguće pravce razvoja i daljnjih poboljšanja izvan tradicionalnih postupaka oblikovanja limova. To u značajnoj mjeri doprinosi osiguravanju visokog kvaliteta hladno oblikovanih proizvoda iz lima u domenu izrade prototipova, pojedinačne i maloserijske proizvodnje za potrebe jako zahtjevnih industrijskih grana i medicine. Provedena površna analiza postojećih resursa i preporuke u vezi sa mogućnošću implementacije može efikasno da posluži kao podstrek i inicijalna aktivnost na bržoj primjeni i razvijanju vlastite metodologije inkrementalnog oblikovanja na Mašinskom fakulteta u Zenici, a time i u industrijskoj praksi metaloprerađivačkih kompanija u regiji centralne BiH. S tim u vezi, kroz daljnu saradnju sa Katedrom za proizvodne sisteme Ruhr univerziteta u Bochumu neophodno je raditi na obezbjeđenju nedostajućih resursa i implementaciji pilot projekata inkrementalnog oblikovanja sa testiranjem različitih materijala i debljina lima, te složenijih geometrija izradaka.



Slika 10. Robot KUKA KR 150

## 6. LITERATURA

- [1] H. Meier, J. Zhu, B. Buff, R. Laurischkat, CAx Process Chain for Two Robots Based Incremental Sheet Metal Forming, Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), Procedia CIRP 3 37 – 42, 2012.
- [2] Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl für Produktionssysteme: "Roboforming" - Roboterbasierte Blechumformung komplexer Bauteile in kleinen Stückzahlen: Abschlussbericht des Verbundprojektes. 2010.
- [3] Muhammed Imamović, Inkrementalno oblikovanje sa preporukama za mogućnost njegove primjene na Mašinskom fakultetu u Zenici, diplomski rad, 2019.
- [4] Malik Čabaravdić, Dennis Möllensiep, Bernd Kuhlenkötter, Alfred Hypki, Analysis of Pressure Force in Robot Supported Sheet Metal Forming, International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Proceedings of KOD, Novi Sad, Serbia, 2021.
- [5] Chera Ionut, Bologna Octavian, Racz Gabriel, Breaz Radu, Robot-Forming – An Incremental Forming Process using an Industrial Robot by means of DELMIA software package, Applied Mechanics and Materials Vol. 371, pp 416-420, 2013.
- [6] Kathryn Jackson, The Mechanics of Incremental Sheet Forming, University of Cambridge Department of Engineering, Pembroke College, 2008.