

**METODE ZA UNAPREĐENJE KVALITETA IZRADAKA PRI
INKREMENTALNOM OBLIKOVANJU LIMA PRIMJENOM ROBOTA**

**METHODS FOR THE QUALITY IMPROVEMENT OF PRODUCTS
MADE BY ROBOFORMING TECHNOLOGY**

Malik Čabaravdić, prof.dr.sc.
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici
Zenica, Bosna i Hercegovina

Ibrahim Plančić, prof.dr.sc.
Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici
Zenica, Bosna i Hercegovina

REZIME

Inkrementalno oblikovanje limova je tehnologija koja se pojavila početkom ovog vijeka. Njezin daljnji razvoj omogućen je prvenstveno razvojem i upotrebom CNC strojeva i industrijskih robota za proizvodnju složenijih i znatno kvalitetnijih proizvoda u malim serijama te za potrebe brzog prototipiranja. Iz tog razloga razvijen je novi proces za istraživanje u području robotski potpomognutog inkrementalnog oblikovanja limova, takozvani roboforming. Glavni nedostatak roboforminga je struktura industrijskog robota s rotacijskim zglobovima, koja se odlikuje smanjenom krutošću, što uzrokuje pogreške u obliku i tačnosti dimenzija proizvoda. Kako bi se taj problem prevladao, osim poboljšanja postojećeg načina obrade koji uključuje kompenzaciju krutosti pri pozicioniranju robota, potrebno je razviti i testirati nove strategije za provedbu procesa inkrementalnog oblikovanja limova potpomognutog industrijskim robotima. U ovom radu bit će prikazana metoda roboforminga koja, uz kontrolu položaja industrijskog robota, koristi i kontrolu sile, gdje je kontaktna sila između alata i obratka dodatna varijabla u upravljačkoj petlji. Da bi se ova metoda mogla primijeniti, prethodno je potrebno, na temelju dosadašnjih istraživanja i dodatnih eksperimenata, ispitati sile koje nastaju tijekom samog procesa.

Ključne riječi: inkrementalno oblikovanje limova, industrijski roboti, ispravljanje grešaka oblika

ABSTRACT

Incremental sheet metal forming is a technology that emerged at the beginning of this century. Its further development was enabled primarily by the development and use of CNC machines and industrial robots for the production of more complex and much higher quality products in small series and for the needs of rapid prototyping. For this reason, a new process has been developed for research in the field of robot-supported incremental sheet metal forming, the so-called roboforming. The main disadvantage of roboforming is the structure of the industrial robot with rotary joints, which is characterized by reduced rigidity, causing errors in the shape and accuracy of the product dimensions. In order to overcome this problem, in addition to improving the existing processing method which includes rigidity compensation of the robot positioning, it is necessary to develop and test new strategies for implementing an incremental sheet metal forming process supported by industrial robots. This paper will present a roboforming method that, in addition to controlling the position of an industrial robot, also uses force

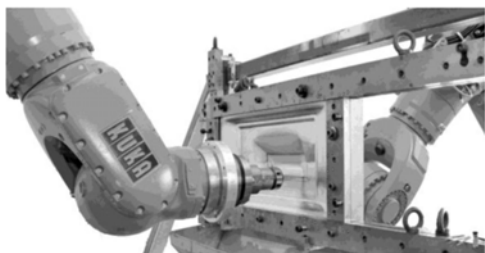
control, where the contact force between the tool and the workpiece is an additional variable in the control loop. In order for this method to be applied, it will first be necessary, based on previous research and additional experiments to investigate the forces that arise during the execution of the process itself.

Keywords: incremental sheet metal forming, industrial robots, form errors correction

1. UVOD

Ponašanje tržišta posljednjih godina pokazuje trend prema sve većoj prilagodbi proizvoda koji se proizvode. S time povezano povećanje broja varijanti i kraći životni ciklusi proizvoda zahtijevaju veću brzinu i fleksibilnost u razvoju proizvoda [1, 2]. Dok se prijelaz s masovne proizvodnje na proizvodnju varijanti proizvoda dogodio u prošlom vijeku, ekonomski isplativa proizvodnja pojedinačnih proizvoda (veličina serije 1) predstavlja izazov budućnosti [3]. Kao rezultat toga, potreban je kontinuirani razvoj inovativnih proizvodnih sistema kako bi se zadovoljili ti zahtjevi [1].

Posebno u području oblikovanja limova postoji velik potencijal za unaprjeđenje u pogledu ekonomski isplative i brze proizvodnje komponenti u malim količinama, kao što su male serije ili prototipovi. Klasični postupci oblikovanja (npr. istežanje i duboko izvlačenje) nude nizak stupanj fleksibilnosti zbog upotrebe masivnih i specifičnih alata za svaki radni komad, što dovodi do viših troškova, većeg utroška vremena i dodatnog radnog napora. Zbog toga je u posljednjim godinama intenzivirano istraživanje inkrementalnih procesa oblikovanja limova, koji imaju potencijal za fleksibilniju proizvodnju. Inkrementalno oblikovanje limova karakterizira prostorno ograničeno, višekratno deformiranje, kojim se postupno oblikuje željeni oblik, što omogućuje upotrebu alata neovisnih o geometriji proizvoda. Osim toga, ove lokalno ograničene zone oblikovanja imaju, u usporedbi s klasičnim postupcima, prednost znatno manjih procesnih sila. Zahvaljujući vrlo maloj kontaktnoj površini alata s limom koji se obrađuje, za vođenje alata često se koriste CNC strojevi ili industrijski roboti, koji omogućuju fleksibilno programiranje putanje kretanja [1, 4].



Slika 1. Roboforming proces [13]

Iz tog razloga je na Institutu za proizvodne sisteme (LPS) Ruhr Univerziteta u Bochumu razvijen novi postupak za istraživanje u području inkrementalnog oblikovanja limova, tzv. roboforming. Uz pomoć dva nasuprotna šestoosna industrijska robota sa velikom nosivošću, dijelovi se oblikuju iz limene ploče koja je vertikalno učvršćena između njih u fiksnom okviru. Alati potrebni za to pričvršćeni su na krajeve obje robotske ruke, koje se kreću sinhronizirano i kooperativno deformiraju lim s obje strane (Slika 1) [5, 13].

2. INKREMENTALNO OBLIKOVANJE LIMOVA

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 [9]. 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.

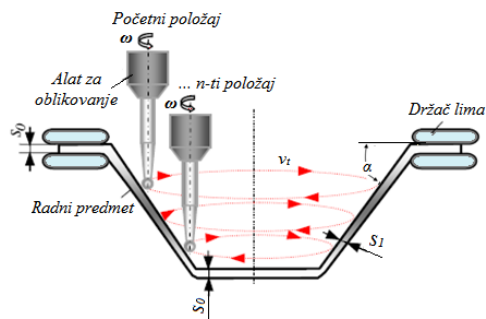
Tokom procesa inkrementalnog deformisanja lima, obradak se čvrsto pridržava steznim prstenom odnosno držačem lima, dok se određeno područje lima oblikuje koristeći alat za deformisanje pojedinačnih tačaka na obratku. Postupak je vrlo jednostavan, a na

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).

3. ISPRAVLJANJE GREŠAKA OBLIKA KROZ KOMPENZACIJU KRUTOSTI

Međutim, uz prethodno spomenute potencijale i druge prednosti, poput proizvodnje složenih komponenti s nesimetričnim oblicima, pojavljuju se i nedostaci povezani s procesom. Industrijski roboti, zbog svoje strukture s rotacijskim osama, imaju nisku mehaničku krutost, što znači da pri većem opterećenju – u ovom slučaju velikim silama deformacije – dolazi do otklona u zglobovima. Ti otkloni dovode do pomicanja vrha alata, koji je montiran na kraju robotske ruke, s ciljanog položaja, što uzrokuje značajne netačnosti u obliku i dimenzijskoj preciznosti tokom obrade [1].



Slika 2. Postupak inkrementalnog oblikovanja lima u jednoj tački [9]

Kako bi se minimizirala pogreška u obradi, na Institutu za proizvodne sisteme (LPS) Ruhr Univerziteta u Bochumu već je provedeno nekoliko istraživanja i razvijeni su različiti koncepti tzv. kompenzacije krutosti. Funkcija kompenzacije krutosti je izračunati pomake alata uzrokovane silama deformacije, na temelju informacija o tim silama, kako bi se dobile odgovarajuće korekcijske vrijednosti, čime se robot vraća na izvorno ciljane točke.

U implementacijama koje su razvili Zhu [6] i Kang [7], ti izračuni odnosno radni koraci provode se prije početka procesa oblikovanja, tzv. offline metoda. Laurischkat [8] je osmislio dodatne koncepte u kojima se spomenuti izračuni korekcijskih vrijednosti (djelomično) odvijaju tijekom samog procesa oblikovanja, tj. online metoda. Međutim, zbog ograničene brzine proračuna u upravljačkoj jedinici robota, na stvarnim robotima je implementirana samo djelomično online verzija.

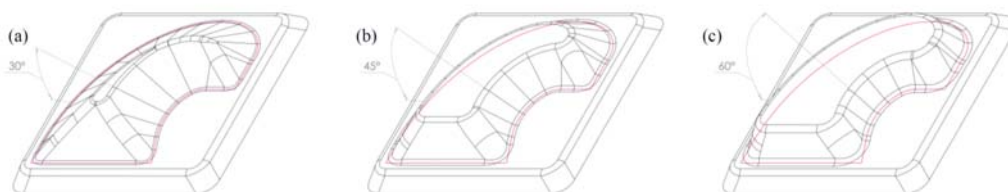
U radu Gorlasa [12] po prvi put je implementirana funkcionalna online kompenzacija krutosti, koja nije zahtijevala odvojene proračune unaprijed. To konkretno znači da se određivanje odstupanja i izračun korekcijskih vrijednosti odvija na računaru smještenom pored sistema tokom procesa oblikovanja, a robot ih u stvarnom vremenu provodi.

Iako je ovom metodom poboljšana tačnost proizvoda dobivenih inkrementalnim oblikovanjem limova, konačni rezultat još uvijek nije bio na zadovoljavajućoj razini za neke složene geometrije. Osim toga, zbog velikog broja izračuna i visoke brzine komunikacije između robota i vanjskog računara pri online kompenzaciji krutosti, upravljačke jedinice robota ponekad nisu mogle izvršiti zadani zadatak. To je, osobito kod manjih radijusa obratka, uzrokovalo neujednačeno kretanje manipulatora, što je dodatno povećalo odstupanja konačne geometrije.

4. UPRAVLJANJE SILOM U PROCESU ROBOFORMINGA

Da bi se navedene slabosti otklonile ili minimizirale postoji potreba za unaprjeđenjem postojećeg načina obrade ili ispitivanjem drugih strategija u okviru robotski potpomognutog inkrementalnog oblikovanja limova. Jedna od tih strategija je inkrementalno oblikovanje limova s kontrolom sile, koje će ovdje biti predstavljeno. U ovom pristupu, sila pritiska između alata i obratka koristi se kao dodatna upravljačka varijabla u petlji upravljanja (uz položaj krajnjeg izvršitelja robota), što omogućuje sistemu smanjenje grešaka u konačnoj geometriji obratka.

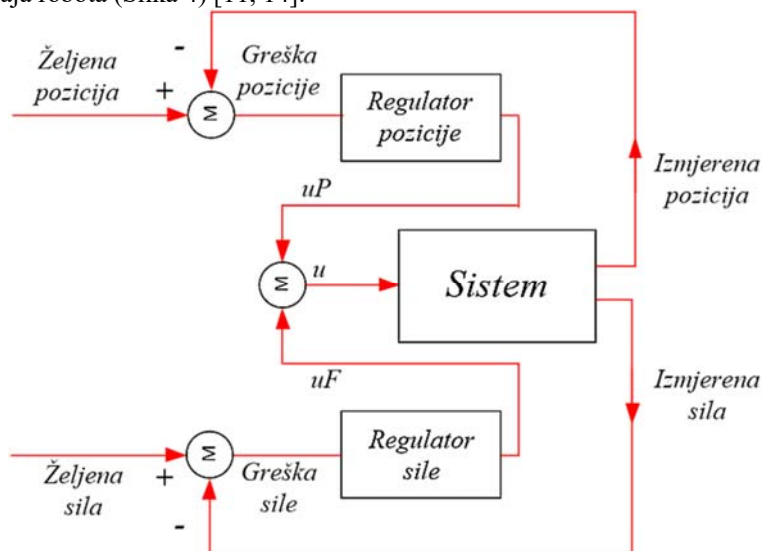
U prvom koraku analizirane su sile pritiska iz prethodnih eksperimenata. Temelj su bila ispitivanja za lokaliziranu automatsku parametrizaciju na svakoj točki putanje alata u robotski potpomognutom inkrementalnom oblikovanju limova [10, 13]. Glavni ulazni parametri bili su: dubina uvlačenja, ugao stijenke, ugao potpore i potporna sila.



Slika 3. Primjeri geometrija obradaka s uglovima stijenke od (a) 30°, (b) 45° i (c) 60° [13]

Glavni izlazni parametar za analizu u ovom radu je sila pritiska. Putem RSI veze s robotom, tokom obrade prikupljeni su online podaci s 6-osnog senzora sile i momenta, koji je montiran na ruci robota. Nakon izvršenja svakog pojedinačnog eksperimenta, analizirana je aktivna sila pritiska i izračunata je njezina srednja vrijednost. Na temelju dobivenih podataka razvijen je regresioni model koji predviđa srednju silu pritiska za zadani skup ulaznih parametara te se može primijeniti u kontroli sile industrijskog robota pri inkrementalnom oblikovanju limova.

Na temelju ovih rezultata planirano je provođenje serije eksperimenata s novom strategijom upravljanja. U procesu inkrementalnog oblikovanja limova primijenjena je hibridna kontrola sile i položaja robota (Slika 4) [11, 14].



Slika 4. Hibridna kontrola sile i položaja robota [14]

Ova shema implementirana je uz pomoć MATLAB softvera na vanjskom računaru koji je putem online komunikacije u stvarnom vremenu bio povezan s upravljačkom jedinicom robota. Kao ulazni parametri korištene su konusne geometrije obradaka, a kao konstantne ulazne vrijednosti željenih sila pritiska korištene su srednje vrijednosti sila pritiska iz prethodno navedenih eksperimenata.

Nažalost, planirani eksperimenti nisu mogli biti provedeni kako je bilo zamišljeno. Razlog za to je činjenica da sila pritiska snažno ovisi o trenutnom radijusu obratka, te se njezina vrijednost mijenja tijekom procesa oblikovanja. Zbog toga obrada s konstantnom silom pritiska nije bila moguća. Korištena srednja vrijednost sile bila je veća od stvarne sile na početku procesa, što je uzrokovalo jake vibracije sistema koje nije bilo moguće eliminirati promjenom parametara regulatora. Kod korištenja manjih ulaznih sila, proces oblikovanja nije mogao biti dovršen i željeni završni oblik obratka nije se mogao postići.

Ovaj se problem može riješiti uspostavom složenijeg modela, u kojem bi trenutni radijus obratka bio jedan od ključnih ulaznih parametara, a to će biti tema daljnjih istraživanja u ovom području. Također je potrebno razviti novu upravljačku shemu, koja će koristiti promjenjivu silu pritiska kao ulazni parametar, umjesto konstantne.

5. ZAKLJUČAK

Pokušavajući implementirati novu shemu kontrole sile s ciljem poboljšanja kvalitete proizvoda dobivenih robotski potpomognutim inkrementalnim oblikovanjem limova, u prvom su koraku analizirani prethodni eksperimenti provedeni na Institutu za proizvodne sisteme Ruhr Univerziteta u Bochumu. Razvijen je novi matematički model koji opisuje ovisnost srednje sile pritiska o procesnim parametrima. Na temelju tih eksperimenata implementirana je hibridna shema upravljanja robotom (kontrola sile i položaja) s konstantnom silom pritiska kao ulaznim parametrom.

Verifikacija eksperimenata pokazala je da nije bilo moguće uspješno provesti ovu shemu s konstantnom silom, jer je sila tijekom procesa bila varijabilna i ovisna o trenutnom radijusu obratka.

Stoga bi buduća istraživanja u ovom području trebala uključivati izgradnju modela koji opisuju ovisnost sile pritiska o trenutnom radijusu obratka. Također je potrebno razviti novu upravljačku shemu, koja će koristiti promjenjivu silu pritiska kao ulazni parametar.

6. REFERENCE

- [1] Meier, H.; Smukala, V.; Buff, B.: Roboterbasierte inkrementelle Blechumformung: Bauteilgenauigkeitssteigerung in einem automatisierten industriellen Gesamtkonzept, wt Werkstatttechnik online, Vol. 10, No. 98, 2008, pp. 831-836
- [2] Groche, P.; Kraft, M.; Schmitt, S. O.; Lorenz, U.; Pokutta, S.; Martin, A.; Ziems, N.: Rechnet sich Flexibilität in der Umformtechnik?: Ein wirtschaftlicher Vergleich konventioneller und flexibler Umformanlagen, wt Werkstatttechnik online, Vol. 10, No. 100, 2010, pp. 734-742
- [3] Uhlmann, E.: Wandel der Fabrik durch Produktindividualisierung, Marktchance Individualisierung. Softcover reprint of the hardcover 1. ed., Berlin: Springer, 2013, pp. 119-127
- [4] Kreimeier, D.; Smukala, V.; Magnus, C.; Buff, B.; Zhu, J.: Kraftgeregelte Umformung im Roboforming: Einfluss auf Bauteilgenauigkeit, Oberflächenqualität und multimodale Geometrien, wt Werkstatttechnik online, Vol. 10, No. 100, 2010, pp. 772-778,
- [5] Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl für Produktionssysteme: "Roboforming" - Roboterbasierte Blechumformung komplexer Bauteile in kleinen Stückzahlen, Abschlussbericht des Verbundprojektes, 2010
- [6] Zhu, J.: Simulation of the load-dependent tool path deviations in robot based incremental sheet metal forming, Masterarbeit, RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, 2009
- [7] Kang, J.: Weiterentwicklung und experimentelle Verifikation eines modellbasierten Ansatzes zur Genauigkeitssteigerung in der roboterbasierten inkrementellen Blechumformung, Masterarbeit, RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, 2010
- [8] Laurischkat, R.: Kompensation prozesskraftbedingter Bahnfehler bei der roboterbasierten inkrementellen Blechumformung, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme 2012, Aachen: Shaker, 2012
- [9] Plančić, I.; Čabaravdić, M.; Begović, E.: Characteristics and Influential Parameters on the Quality of Products Made By Roboforming Technology, 13th research/expert conference "Quality 2023" Neum, Bosnia and Herzegovina, 2023
- [10] Čabaravdić, M.; Möllensiep, D.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.: Analysis of Pressure Force in Robot Supported Sheet Metal Forming, The 11th International Conference Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering „KOD21“, Novi Sad, Serbia, 2021
- [11] Čabaravdić, M.; Möllensiep, D.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.: Force-Controlled Path Planning for Robot-Assisted Incremental Sheet Metal Forming: A New Approach to Addressing Dimensional Accuracy Challenges, Precision Mechanics & Digital Fabrication, Vol. 1, No. 4, 2024, pp. 227-234,
- [12] Gorlas, T.: Entwicklung einer Steifigkeitskompensation für die roboterbasierte inkrementelle Blechumformung, Masterarbeit, RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM, 2020
- [13] Störkle, D.; Altmann, P.; Möllensiep, D.; Thyssen, L.; Kuhlenkötter, B.: Automated parameterization of local support at every toolpath point in robot-based incremental sheet forming, 18th International Conference on Sheet Metal, SHEMET, 2019
- [14] M.Raibert, J.Craig: Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.103, No. 2, 1981, pp. 126-133