



Kalabić R.¹⁾, Popović M., Pjević, M., Mladenović, G., Tanović Lj.²⁾

ISTRAŽIVANJE UTICAJA PARAMETARA OBRADNE NA POKAZATELJE KVALITETA PRI OBRADI REZANJEM POLIMERA

Rezime

Kroz istoriju mašinstva kao nauke napisano je mnogo radova i priručnika koji se bave temom obrade rezanjem metalnih materijala. Sa druge strane o obradi rezanjem termoplasta, materijala nove generacije koji sve češće služe kao zamena metalnim materijalima i koji nalaze primenu u većini grana modernog mašinstva, može se naći mnogo manje podataka i eksperimentalno potvrđenih činjenica. S obzirom na nivo primene i značaj termoplasta kao i kroz praksu potvrđenu razliku u režimima obrade u odnosu na metalne materijale, potrebno je detaljnije istražiti, ustanoviti i dokumentovati režime obrade i alate pogodne za obradu termoplasta, što predstavlja temu ovog rada.

Ključne reči: termoplasti, obrada rezanjem, režimi obrade

1. UVOD

Pored metala sve češća je u industriji pojava upotrebe polimernih materijala za izradu konstrukcija različitih složenosti i namena. Na tržištu se pojavljuju različite vrste polimera koje su dostupne korisnicima za primenu u različitim granama mašinskog inženjerstva i industrije uopšte. Kada se govori o polimerima njihova klasifikacija se može izvršiti prema poreklu, strukturi, vrsti monomera, vrsti reakcije polimerizacije i vrsti molekularnih veza. Prema vrsti molekularnih veza možemo ih podeliti na elastomere, duroplaste, fibre i termoplaste [1].

Termoplasti kao polimeri koji se sastoje od dugih lanaca između kojih vladaju sekundarne Van der Valsove veze zbog koji se pri zagrevanju tope i očvršćavaju kada se hlade našli su najveću primenu u opštem mašinstvu. Bez obzira na osnovnu podelu polimera, zbog razlike u konstrukcionim, mehaničkim i termičkim svojstvima termoplasti se dele na podgrupe od kojih su najzastupljeniji poliamidi i poliacetali [1]. Od ostalih termoplasta poliacetal izdvaja dobra otpornost na habanje i toplotu, čvrstoća, krutost, anti frikciona svojstva, otpornost na puzanje i organske rastvarače. Poliamid je svoju primenu i zastupljenost u industriji našao zbog krutosti, hemijske rezistentnosti, otpornosti na habanje i puzanje, ali i zbog dobrih kliznih i izolatorskih svojstava [2].

Zbog razlike u konstrukcionim, mehaničkim i termičkim svojstvima kao i procesu dobijanja polufabrikata razlikuju se režimi obrade pri obradi rezanjem poliamida i poliacetala. Razliku u režimima obrade kao i kvalitetu obrađene površine poliamidnih i poliacetalnih materija treba ispitati, zabeležiti i dovesti na nivo saznanja kakav se danas poseduje kada se radi o obradi metalnih materijala.

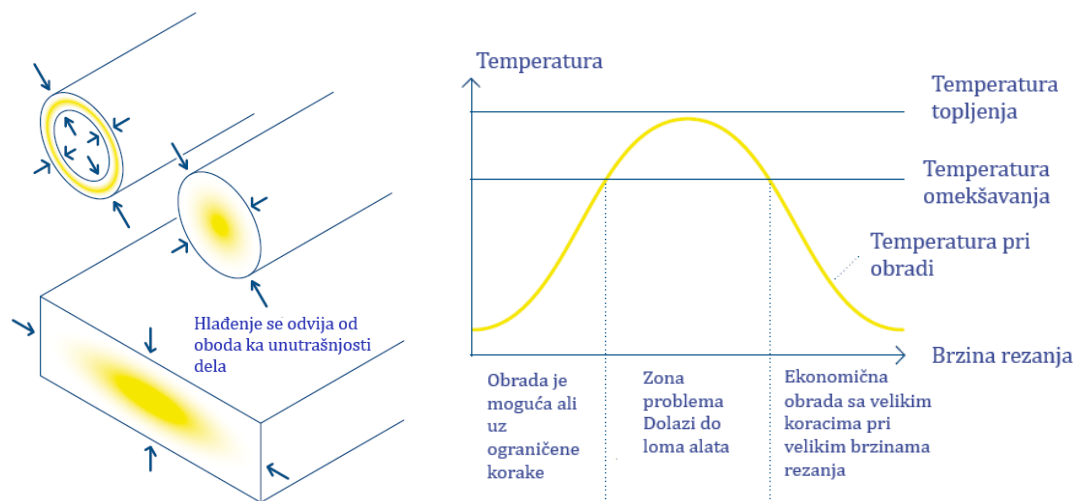
2. POSTAVKA ZADATKA

Procesi proizvodnje polufabrikata, posebno ekstrudiranje ima veliki uticaj na karakteristike materijala. Prilikom ekstrudiranja poluproizvoda dolazi do pojave unutrašnjih napona usled neravnomernog hlađenja. Naime, nakon izlaska iz ekstrudera polufabrikat se hladi od oboda ka unutrašnjosti (slika 1), zbog čega se u sredini javljaju unutrašnji naponi. Postupci obrade rezanjem plastičnih delova su slični obradi rezanjem metala. Međutim, za obradu delova od polimera potrebno je koristiti velike brzine rezanja primenom mašina

¹⁾Ranka Kalabić, mast. inž. maš., Tehnika KB, Sektor projektovanja i konstrukcije, (konstrukcija@tehnika.kb.com)

²⁾ Doc. dr Mihajlo Popović, (mpopovic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Miloš Pjević, (mpjevic@mas.bg.ac.rs), doc. dr Goran Mladenović, (gmladenovic@mas.bg.ac.rs), prof dr Ljubodrag Tanović, (ltanovic@mas.bg.ac.rs), Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

za obradu lakih metala i drveta, kako bi se postigla što ekonomičnija obrada. Kao što se na dijagramu prikazanom na slici 1 može videti, pri brzinama rezanja koje su adekvatne za obradu metala, u slučaju obrade termoplasta došlo bi do topljenja materijala. Preporuke proizvođača su da se za obradu plastičnih delova koriste rezni alati koji odgovaraju obradi aluminijumskih delova, iako je najbolje koristiti alate za obradu plastike sa oštrijim uglom reznog klina. Hlađenje vodom, emulzijom ili komprimovanim vazduhom je neophodno kako ne bi došlo do lepljenja termoplasta i dobijanja površine velike hrapavosti.



Slika 1. Prikaz procesa hlađenja ekstrudiranog dela (levo) i dijagram zavisnosti brzine rezanja i temperature pri obradi rezanjem (desno) [2]

Obrada rezanjem je širok pojam i obuhvata razne procese, a glodanje je među najzastupljenijim od njih. Obrada glodanjem plastičnih materijala, poliamida i poliacetala, može se pored CNC mašina izvoditi i na konvencionalnim mašinama alatkama. Pri obradi glodanjem preporučuju se visoke brzine rezanja i srednji koraci. Prilikom stezanja priprema u pomoćni pribor neophodno je osigurati pripremak od mogućnosti na izvijanje. Alati namenjeni za obradu glodanjem treba da budu izuzetno oštri zbog toga što veći kvalitet površine koja se obrađuje prouzrokuje težu obradu materijala.

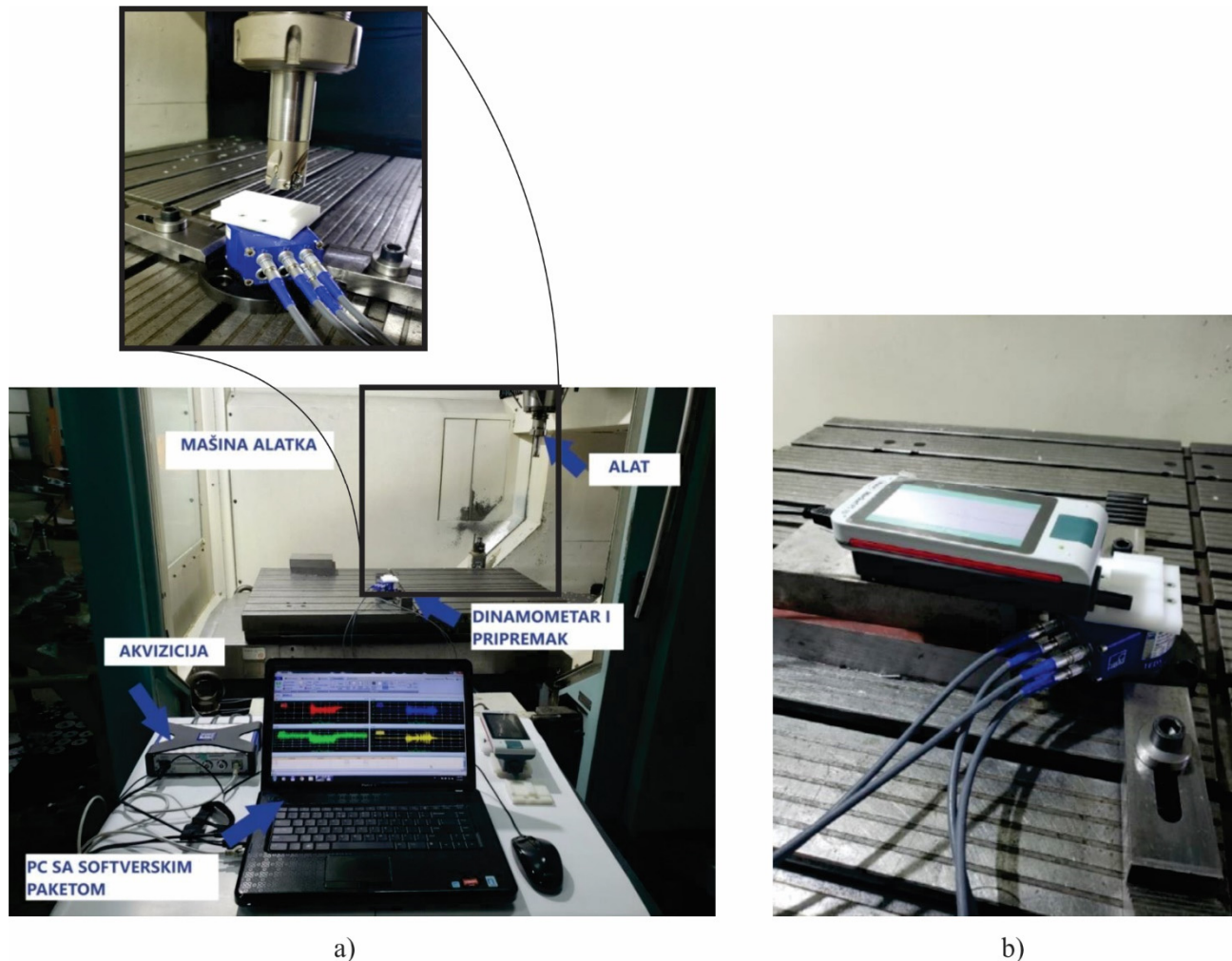
S obzirom da se pri procesu glodanja generiše više toplote neophodno je direktno i redovno hlađenje alata kako bi se sprečilo topljenje materijala koji se obrađuje i nagomilavanje strugotine, a samim tim i pucanje alata ili priprema. Obradu je najbolje izvoditi istovremeno i jednako sa obe strane kako ne bi došlo do izvijanja. Ono što dodatno karakteriše obradu delova od plastike je da ivice nakon obrade ostaju veoma oštre, pa ih je neophodno naknadno obraditi [3].

Tabela 1. Parametri pri obradi glodanjem inženjerskih plastika iz kategorije poliamida i poliacetala [2]			
Termoplasti	Broj zuba <i>z</i>	Brzina rezanja <i>v</i> [m/min]	Korak po obrtu <i>s</i> [mm/o]
POM-C	Z2-Z4	300	0.15-0.5
PA6, PA6.6	Z2-Z4	250-500	0.1 – 0.45

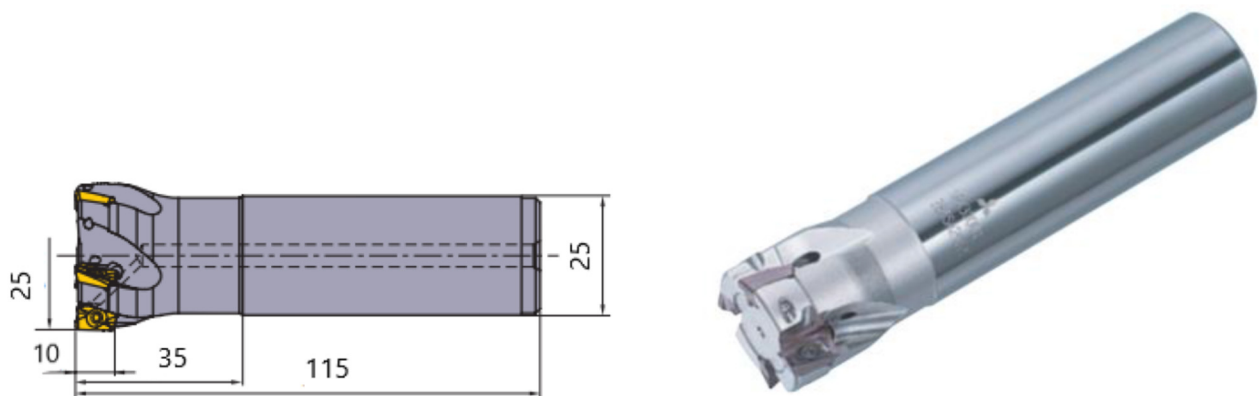
S obzirom na prethodno navedeno, cilj rada predstavlja eksperimentalnu identifikaciju uticaja parametara režima obrade na sile, moment rezanja i kvalitet obrađene površine kod obrade glodanjem. Ovim je izvršena analiza obradljivosti termoplasta konkretno poliamida i poliacetala. Vrednosti intenziteta sila rezanja koje se javljaju u toku procesa obrade su od izuzetne važnosti jer predstavljaju jedan od pokazatelja kvaliteta obrade, pri čemu se pomoću njih mogu predvideti izlazne karakteristike procesa obrade, koje su od za adekvatno propisivanje režima obrade kako bi se npr. povećala postojanost alata.

3. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA

U ovom eksperimentu kao ulazi eksperimentalnog ispitivanja postavljeni su brzina rezanja v i ugao zahvata ψ dok se parametri obradljivosti određuju u funkcijama F_x , F_y , F_z , M_z i R_a . Eksperimenti obrade polimera su izvršeni na mašini DECKEL MAHO DC 100V, korišćenjem četvorokomponentnog dinamometra HBM-K-MS10-005 i univerzalnog pojačivača HBM Quantum MX440B (slika 2a), dok je za potrebe merenja hrapavosti obrađenih površina korišćen uređaj MahrSurf PS10 (slika 2b). Proces obrade je sproveden korišćenjem alata APX3000R254WA25SA, prikazan na slici 3.



Slika 2. Eksperimentalna postavka za a) proces detekcije sila rezanja i b) merenje hrapavosti.



Slika 3. Alat korišćen tokom procesa obrade..

Vrednosti brzine rezanja v su varirane u granicama $v_{\min}=140,523$ m/min, $v_{sr}=234,206$ m/min i $v_{\max}=390,343$ m/min, a vrednosti ugla zahvata ψ u granicama $\psi_{\min}=78,7453$ °, $\psi_{sr}=106,722$ ° i $\psi_{\max}=180$ °.

Obrada je rađena pri konstantnom koraku koji je iznosio 0,2 mm/zubu.

Eksperimentalna ispitivanja su vršena na pripremcima od poliamida i poliacetala, prema matrici plana eksperimenta prikazanog u tabeli 2.

Pre samog sprovođenja eksperimenta izvršena su probna ispitivanja zbog podešavanja merno akvizicionog sistema.

Nakon sprovedenog eksperimenta u tabelu 2 uneseni su vrednosti podataka u kolonama F_1, F_2, F_3, M_z i R_a , koje predstavljaju zavisno promenljive. U poslednje četiri kolone upisani su prirodni logaritmi dobijenih vrednosti koji su u nastavku upotrebljeni za izračunavanje veličina b_0, b_1 i b_2 .

Tabela 2. Plan eksperimenta														
Redni broj eksperimenta	Plan eksperimenta													
	Plan matrica		Promenljivi faktor		Rezultati merenja									
	f_1	f_2	v [m/min]	ψ [°]	F_1 [N]	F_2 [N]	F_3 [N]	M_z [N]	R_a [µm]	$y=\ln F_1$	$y=\ln F_2$	$y=\ln F_3$	$y=\ln M_z$	$y=\ln R_a$
1	1	-1	390.3429	78.74529	-19.5213	-20.3135	-4.6791	-0.689	0.612	2.971506	3.011286	1.543106	-0.37251	-0.49102
2	0	0	234.2057	106.7219	-38.2847	-21.0945	-9.0222	-0.2988	1.2195	3.64505	3.049012	2.199688	-1.20798	0.198441
3	1	1	390.3429	180	-51.7695	-4.3781	-18.1434	0.1925	1.237	3.946801	1.476615	2.898307	-1.64766	0.212689
4	0	0	234.2057	106.7219	-38.4663	-22.5011	-12.8644	-0.1949	1.5405	3.649783	3.113564	2.554464	-1.63527	0.432107
5	0	0	234.2057	106.7219	-38.0054	-20.9881	-9.0962	-0.1039	1.22	3.637728	3.043956	2.207857	-2.26433	0.198851
6	-1	-1	140.5234	78.74529	-21.347	-22.132	-4.5543	-0.7326	0.866	3.060911	3.097025	1.516072	-0.31116	-0.14387
7	0	0	234.2057	106.7219	-37.6106	-22.405	-14.3184	-0.796	0.983	3.627286	3.109284	2.661545	-0.22816	-0.01715
8	-1	1	140.5234	180	-63.4542	-7.0165	-18.5197	0.8451	1.0465	4.150318	1.948265	2.918835	-0.1683	0.045451

4. OBRADA REZULTATA

Funkcionalna zavisnost između ulaza eksperimentalnog ispitivanja i zavisno promenljive R pretpostavlja se prema

$$R = C * f_1^{p_1} * f_2^{p_2}, \quad (1)$$

gde je R - zavisno promenljiva, tj. izlaz eksperimentalnog ispitivanja, f_1 i f_2 nezavisno promenljive ili ulazi eksperimentalnog ispitivanja i C, p_1 i p_2 parametri obradljivosti.

Prema plan matrici sistem opštih jednačina je sledeći

$$b_0 = \frac{1}{8}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8), \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(y_1 + y_3 - y_6 - y_8), \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(-y_1 + y_3 - y_6 + y_8). \quad (4)$$

Konačne jednačine traženih vrednosti parametara obradljivosti u polaznoj funkciji obradljivosti (1) su

$$\ln C = b_0 + b_1 + b_2 - 2 * \left(b_1 \frac{\ln f_{1max}}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}} + b_2 \frac{\ln f_{2max}}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}} \right), \quad (5)$$

$$p_1 = \frac{2b_1}{\ln \frac{f_{1max}}{f_{1min}}}, \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{2b_2}{\ln \frac{f_{2max}}{f_{2min}}}. \quad (7)$$

Primenom prirodnih logaritama zavisno promenljivih iz tabele 2 u formulama (2) - (4) dobijene su vrednosti b_0 , b_1 i b_2 . Dalje su izračunate vrednosti b_0 , b_1 i b_2 unesene u formule (5) – (7) gde su dobijene vrednosti $\ln C$, p_1 i p_2 koje su unošenjem u formulu (1) dale računске vrednosti zavisno promenljivih za poliamid. Izračunate vrednosti prikazane su u tabeli 3.

Na isti način, počevši od dobijanja prirodnih logaritama zavisno promenljivih dobijenih obradom glodanjem poliacetala, izračunate su računске vrednosti zavisno promenljivih za poliacetal. Izračunate vrednosti prikazane su u tabeli 4.

Tabela 3. Prikaz rezultata izmerenih i računski dobijenih vrednosti zavisno promenljivih F_x , F_y , F_z , F_o i R_a za poliamid

Promenljivi faktor		Stvarna vrednost					Računska vrednost				
v	ψ	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a
390,3429	78,74529	19.5213	20.3135	4.6791	28.17303	0.612	20.0207	26.41737	5.076488	28.23101	0.80751
234,2057	106,7129	38.2847	21.0945	9.0222	43.71151	1.2195	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
390,3429	180	51.7695	4.3781	18.1434	51.9543	1.237	56.21131	3.863805	20.15801	55.23984	1.262025
234,2057	106,7219	38.4663	22.5011	12.8644	44.56406	1.5405	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
234,2057	106,7219	38.0054	20.9881	9.0962	43.41556	1.22	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
150,5234	78,74529	21.347	22.132	4.5543	30.74931	0.866	23.17857	26.23635	5.060001	32.69387	0.883519
234,2507	106,7219	37.6106	22.405	14.3184	43.77832	0.983	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
140,5234	180	63.4542	7.0165	18.5197	63.84095	1.0465	65.07752	3.837328	20.09254	63.97234	1.380816

Tabela 4. Prikaz rezultata izmerenih i računski dobijenih vrednosti zavisno promenljivih F_x , F_y , F_z , F_o i R_a za poliacetal

Promenljivi faktor		Stvarna vrednost					Računska vrednost				
v	ψ	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a	F_x	F_y	F_z	F_o	R_a
390,3429	78,74529	19.5213	20.3135	4.6791	28.17303	0.612	20.0207	26.41737	5.076488	28.23101	0.80751
234,2057	106,7129	38.2847	21.0945	9.0222	43.71151	1.2195	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
390,3429	180	51.7695	4.3781	18.1434	51.9543	1.237	56.21131	3.863805	20.15801	55.23984	1.262025
234,2057	106,7219	38.4663	22.5011	12.8644	44.56406	1.5405	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
234,2057	106,7219	38.0054	20.9881	9.0962	43.41556	1.22	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
150,5234	78,74529	21.347	22.132	4.5543	30.74931	0.866	23.17857	26.23635	5.060001	32.69387	0.883519
234,2507	106,7219	37.6106	22.405	14.3184	43.77832	0.983	31.48821	12.98365	8.415471	38.88626	0.995383
140,5234	180	63.4542	7.0165	18.5197	63.84095	1.0465	65.07752	3.837328	20.09254	63.97234	1.380816

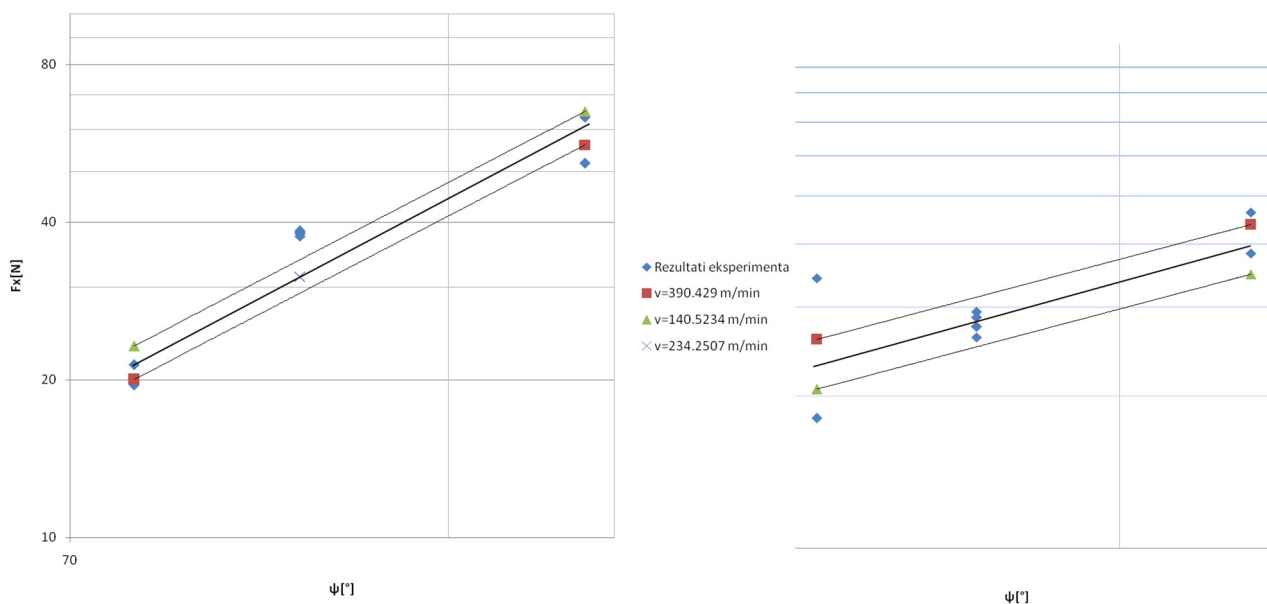
U nastavku su na slici 4 dati dijagrami računski dobijenih vrednosti sile F_x za poliamid (levo) i poliacetal (desno) zajedno sa tačkama eksperimentalnih rezultata. Teorijski dijagram zavisnosti F_x od brzine rezanja i ugla zahvata sa tačkama rezultata merenja pri obradi glodanjem poliamida i poliacetala prikazuje sila rezanja F_x raste sa porastom ugla zahvata u oba slučaja iako je u slučaju poliamida taj porast veći.

Na isti način su obrađeni podaci iz tabela 2 i 3 i za F_x , F_y , F_z , F_o i R_a . Obradom podataka došlo se do sledećih zaključaka:

1. Sila F_y opada sa porastom ugla zahvata i u slučaju poliamida i poliacetala, ali je pad veći kod poliacetala. Takođe, može se primetiti da je vrednost sile F_y veća pri obradi poliamida

za izabrane režime obrade. Kod obrade glodanjem poliamida sila F_y je najmanja pri brzini rezanja $v=390.3429$ m/min dok je poliacetala približno jednaka za sve tri vrednosti brzine i opada sa porastom ugla zahvata.

2. Sila F_z raste sa porastom ugla zahvata u oba slučaja iako je u slučaju poliamida taj porast veći. Takođe, može se primetiti da je vrednost sile F_z veća pri obradi poliamida za izabrane režime obrade, da je približno jednaka za sve tri vrednosti brzine rezanja dok se kod poliacetala njena vrednost menja u zavisnosti od brzine rezanja.
3. Sila F_o raste sa porastom ugla zahvata u oba slučaja.
4. Hrapavost R_a se smanjuje sa porastom ugla zahvata u oba slučaja. Takođe, može se primetiti da je vrednost hrapavosti neznatno manja pri obradi poliacetala za izabrane režime obrade.



Slika 4. Teorijski dijagram zavisnosti F_x od brzine rezanja i ugla zahvata sa tačkama rezultata merenja pri obradi glodanjem poliamida (levo) i poliacetala (desno).

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je da ukaže na kompleksnost pri izboru elemenata tehnologije obrade rezanjem poliamida i poliacetala kao najčešće upotrebljivanih inženjerskih plastika. Kako istraživanja pokazuju ova dva materijala se najviše koriste za izradu mašinskih delova te je njihova obrada rezanjem najzastupljenija u odnosu na ostale plastike. Sve obrade rezanjem se izvode na istim mašinama alatkama kao i kada je u pitanju metal, međutim alati za obradu plastike se razlikuju. Iako postoje i alati za obradu plastike u praksi se najčešće koriste alati za obradu aluminijuma.

Preporučeni režimi za obradu rezanjem poliamida i poliacetala su preuzeti od proizvođača korišćenih alata. Kako je pojam obrade rezanjem širok, u radu je najviše pažnje posvećeno obradi glodanjem i sticanju praktičnih znanja o njoj. Za razliku od obrade rezanjem metala, o obradi termoplasta postoji mnogo manje literature, kao i naučno dokazanih činjenica. Međutim, eksperimentalno je pokazano da režimi obrade pri obradi glodanjem za pojedine materijale, kao što su legure aluminijuma, mogu da se primene i za obradu poliamida i poliacetala.

Zaključak je svakako da se obrada glodanjem ovih termoplasta razlikuje od obrade metala, pored razlike u izboru alata i njihovih karakteristika, najviše u pogledu brzine rezanja.

5. LITERATURA

- [1] Društvo za plastiku i gumu, Polimeri, Zagreb 1980.
- [2] The Ensinger Group, Semi-finished Engineering Plastic products, <https://www.ensingerplastics.com/> [pristupljeno: jun 2019].
- [3] CNC-STEP, CNC Machining of plastic, <https://www.cnc-step.com/> [pristupljeno: jun 2019].