

KARAKTERISTIKE OBDELAVE ALUMINIJA 6061 Z ABRAZIVNIM VODNIM CURKOM Z OZIROM NA STANDARD SN 214001

Marko Jerman, Andrej Lebar, Izidor Sabotin, Joško Valentinčič

Izvleček:

V raziskavi smo preučevali obdelavo aluminija 6061 z abrazivnim vodnim curkom in jo primerjali s standardom SN 214001. Eksperimenti so bili izvedeni pri različnih vodnih tlakih in debelinah obdelovanca, pri čemer smo merili hrapavost površine (Ra), koničnost reza, napake pri vhodu in izhodu iz konture ter napake vogala. Rezultati kažejo, da trenutni algoritmi za krmiljenje stroja ne dosegajo v celoti zahtevane kakovosti po standardu SN 214001, zlasti pri večjih debelinah obdelovanca. Raziskava izpostavlja potrebo po nadaljnjih izboljšavah algoritmov in prilagoditvah procesnih parametrov za doseganje boljše skladnosti s standardom ter preveliko konservativnost pri določanju rezalne hitrosti pri doseganju nižjih kakovostnih razredov, kar zmanjšuje ekonomičnost procesa.

Ključne besede:

abrazivni vodni curek, aluminij 6061, koničnost, hrapavost, napaka vogala, napaka vhoda-izhoda, hitrost rezanja

1 Uvod

Uporaba VC se je začela v Evropi v poznih 50. letih na področju rudarstva. Zasluge za izum pripisujemo ruskemu znanstveniku G. P. Čermenskiju [1]. Raziskave so se v 70. letih prestavile v ZDA. Tehnologijo obdelave z VC je za industrijske aplikacije prvi uporabil O. Imanaka z Univerze v Tokiu v zgodnjih 60. letih prejšnjega stoletja [2]. Prvo industrijsko aplikacijo je tehnologija doživela leta 1972 v podjetju Manufacturing Company McCartney. Tehnologija spada med nekonvencionalne postopke obdelave, pri kateri s pretvorbo visoke tlačne energije vode (do 600 MPa) ustvarjamo viskositrostni VC s hitrostmi nad 600 m/s. Zaradi čistosti postopka je VC uporabljen v številnih industrijskih panogah, njegova uporaba pa je zaradi relativno nizke stopnje odzema materiala omejena na rezanje mehkejših in

poroznih materialov, npr. v tekstilni in papirni industriji, uveljavljena pa je tudi na področjih obdelave tesnil in v industriji tiskanih vezij.

Leta 1979 je dr. Mohamed Hashish, zaposlen v podjetju Flow Research, začel raziskavo novih načinov za povečanje rezalne moči vode z namenom rezanja kovin in drugih materialov večje trdote. Dr. Hashish, poznan kot oče tehnologije obdelave z AVC, je vodnemu curku dodal mineralni abraziv [3]. Leta 1980 so se pojavili prvi stroji za obdelavo z AVC za rezanje jekla, stekla in betona. Tehnologija se je nato začela uveljavljati v številnih aplikacijah v industriji, saj AVC predstavlja orodje za rezanje, s katerim lahko obdelujemo skoraj vse vrste materialov (jeklo, titan, beton ipd.) brez vnosa toplotnih poškodb. Še posebej se je tehnologija izkazala pri obdelavi aluminija in težko obdelovalnih zlitin, kot so titanove zlitine z aplikacijami v različnih industrijah, vključno z letalsko, avtomobilsko in industrijo tiskanih vezij, kjer materiali, od kovin do kompozitov in keramike, zahtevajo natančno in učinkovito obdelavo [4].

Zagotavljanje kakovosti obdelave z AVC je ključni vidik, ki pomembno vpliva na proizvodne rezultate, zato se z raziskovanjem tega področja ukvarja veliko raziskovalnih skupin. Področje raziskav na področju kvalitete za različne materiale in procesne parametre procesa AVC je izčrpno predstavljeno v preglednih delih Natarajan et al. [4] in Sarava-

dr. Marko Jerman, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo;

doc. dr. Andrej Lebar, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Zdravstvena fakulteta;

dr. Izidor Sabotin, univ. dipl. inž., **izr. prof. dr. Joško Valentinčič,** univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

nan et al. [5], najnovejša dognanja pa je predstavil Wang et al. [6].

Huang et al. [7] preučuje nedavne razvojne trende v tehnologiji AVC, kot so rezanje z uporabo nagibne glave, z nagibnim curkom naprej, večprehodno rezanje in nadzorovano oscilacijo šobe v smeri rezanja. Ugotovitve kažejo, da omenjeni pristopi pozitivno vplivajo na učinkovitost obdelave zmogljivosti rezanja in izboljšajo tako debelino odrezanega materiala kot doseženo hrapavost površine. Selvam et al. [8] raziskuje zmogljivost obdelave z AVC na hibridnih kompozitih, poudarja pomemben vpliv hitrosti premikanja, vodnega tlaka in mase pretoka abraziva na hrapavost površine in koničnost reza. Zelenak et al. [9] predstavlja rezultate numeričnega modeliranja razvoja AVC v rezalni glavi. Rezultati raziskave prikazujejo, kako kombinacije procesnih parametrov, kot so masni pretok abraziva in tlaki vode, vplivajo na izstopno hitrost AVC in posledično na njegovo obdelovalno sposobnost.

Nivoji kakovosti so definirani v švicarskem standardu SN 214001 [10], ki zagotavlja strukturiran pristop k razvrščanju kakovosti rezalnih površin, ki nastanejo pri obdelavi z AVC. Standard določa pet nivojev kakovosti (Q1–Q5), določenih za pet območij debeline obdelovanja. Kakovostni razredi so določeni na podlagi hrapavosti površine Ra, koničnosti reza in dimenzijskih točnosti, kot so napaka vstopa in izstopa iz konture ter napaka vogala.

Različni materiali obdelovancev zahtevajo različne prilagoditve procesnih parametrov in kinematike gibanja.

Klichova et al. [11] v raziskavi predstavlja, kako procesni parametri vplivajo na kakovost obdelave z AVC, in preučuje vpliv obdelovalnosti materiala na kakovost površin pri rezanju aluminijevih zlitin. Ugotavlja, da poleg obdelovalnega števila tudi trdota materiala pomembno vpliva na kakovost površine. V nadaljnji raziskavi [12] nato primerja kakovost rezanja aluminijeve zlitine EN AW 6060 in Inconela Alloy 600 s standardom SN 214001.

Leta 1992 sta Jiyue Zeng in Thomas J. Kim [13] predstavila enačbo Zeng-Kim ali krajše Zengovo

enačbo, ki se uporablja za napovedovanje in programiranje kinematike AVC-strojev. Enačba za napoved globine reza izhaja iz povezave med makro stopnjo odstranjevanja materiala na rezalnem robu in akumulirano mikro stopnjo odstranjevanja materiala s posameznimi abrazivnimi delci. Makro stopnja odstranjevanja materiala je izračunana na podlagi prejšnjih študij o disipaciji energije v procesu rezanja z AVC. Za oceno mikro stopnje odstranjevanja materiala je uporabljen elasto-plastični model, izpeljan za krhke materiale. Na podlagi enačbe za globino reza je definiran nov empirični materialni parameter, obdelovalno število, ki predstavlja odpornost proti eroziji.

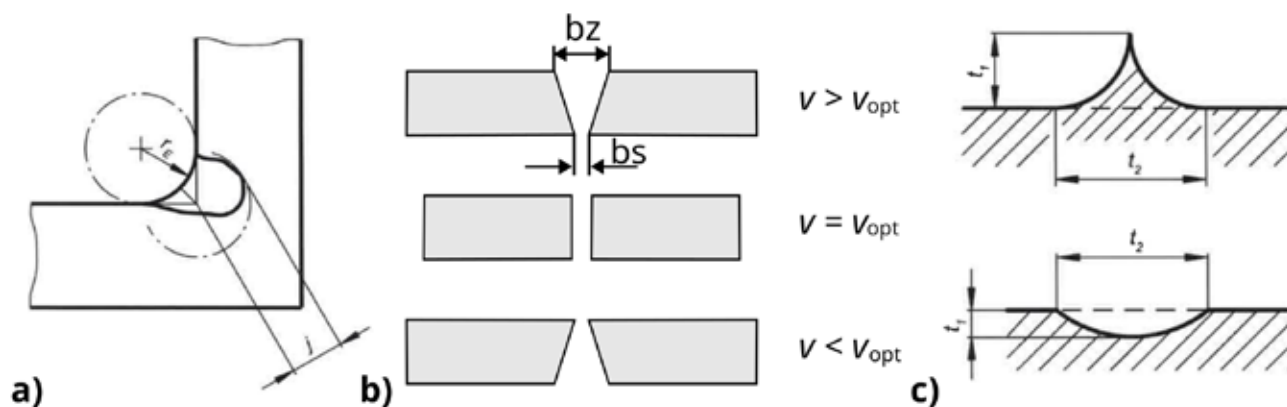
V današnjih najsodobnejših strojih za abrazivno rezanje z vodnim curkom se uporabljajo veliko bolj sofisticirani modeli rezanja za nadzor hitrosti rezanja ter kompenzacijo koničnosti [14]. Ti modeli upoštevajo parametre, kot so obdelovalno število in debelina materiala, zahteve glede kakovosti, ukrivljenost poti orodja, vodni tlak, premer šobe, premer fokusirne šobe, material in granulacija ter pretok abraziva. Nekateri proizvajalci, kot sta OMAX Corporation in Flow International Corporation, ponujajo svoje različice obdelovalnosti in lastnosti abrazivnega rezanja za širok nabor materialov. Med njima je faktor 24 razlike, pri čemer je obdelovalnost, ki jo uporablja OMAX, približno 24-krat večja od tiste, ki jo uporablja Flow [14]. Napredki v računalniških algoritmi, uporabljenih za določanje kinematike obdelovalnih centrov, pomembno prispevajo k povečanju učinkovitosti in kakovosti obdelave z AVC [15]. Izboljšave teh algoritmov povečujejo nadzor in predvidljivost obdelovalnega postopka, ki tako novim kot starejšim obdelovalnim strojem za rezanje z AVC omogočajo večjo obdelovalno učinkovitost tako v smislu hitrosti odnašanja materiala kot z izboljšanjem kakovosti obdelave. Zaradi kompleksnosti procesa rezanja z AVC so potrebne dodatne raziskave delovanja teh algoritmov na različnih materialih in obdelovalnih centrih, kar obravnava ta raziskava.

2 Kakovost obdelave in hitrost rezanja

Kakovost obdelave z AVC, kot je opredeljena v standardu SN 214001 [10], določa pet različnih kva-

Tabela 1 : Mejne vrednosti za kvalitete pri rezanju z AVC, določene po standardu SN 214001 [10]

Kvaliteta Q	Hrapavost Ra [μm]	Koničnost T [mm]	Napaka vogala j [mm]	Napaka vhoda in izhoda NVI [mm]	Debelina h [mm]
Q5	3,2	0,05	0,25	0,1	15
Q4	6,3	0,1	0,7	0,25	30
Q3	12,5	0,2	1,5	0,5	40
Q2	25	0,3	3	1	50
Q1	50	0,3	3	1	300



Slika 1: Napake pri rezanju z AVC glede na standard SN 214001

litetnih stopenj (Q1 do Q5). Te stopnje temeljijo na naslednjih merilih: hrapavost površine R_a , koničnost reza (T), napaka vogala (j) in napaka vhoda in izhoda iz konture rezanja (NVI). Mejne vrednosti so omejene glede na debelino materiala h , ki obenem predstavlja najvišjo kvaliteto, ki jo lahko dosežemo pri tej debelini materiala. Predstavljene so v Tabeli 1.

Hrapavost površine (R_a) je ključni parameter za ocenjevanje kvalitete nastale površine. Meritev poteka na spodnji strani obdelovanca, kjer je hrapavost višja, 1 mm od spodnjega roba oziroma na spodnjih 10 % nastale površine. Hrapavost je v veliki meri povezana z granulacijo abraziva, nanjo pa vplivajo tudi procesni parametri, kot so hitrost vodnega curka, količina abraziva in hitrost rezanja. Z večanjem debeline materiala oziroma hitrosti rezanja pri enaki debelini materiala rezalna učinkovitost curka pada in prihaja do oscilacij curka ob stiku z materialom obdelovanca, ki se na rezalnem robu odražajo v obliki vse večjih valovitosti.

Koničnost reza (T) opisuje spremembo debeline reza od vhoda do izhoda, kar vpliva na natančnost dimenzionalnih meritev obdelanih delov. Koničnost se povečuje z večjo debelino materiala in hitrostjo rezanja, ker se vodni curek širi med prehodom skozi material. Če režemo s hitrostjo, ki je višja od optimalne, odvezamo več materiala na zgornjem delu obdelovanca. Pri hitrosti, nižji od obdelovanca, pa se koničnost oziroma divergenca curka, ki je posledica njegovega razpadanja, preslika v obdelovanec in dobimo širši rez na spodnji strani obdelovanca. Primeri koničnosti so prikazani na sliki 1a. Določena je kot polovica razlike med širino zgornje in spodnje strani obdelovanca, kot je prikazano na sliki 1a oziroma $T = (b_z - b_s)/2$, kjer je b_z širina zgornjega roba in b_s širina spodnjega roba.

Napaka vogala (j), ki je prikazana na sliki 1b, se nanaša na odstopanje pravokotnosti notranjih vogalov obdelanega kosa. Najmanjša napaka vogala je tako najmanjši notranji radij r_E , ki ga lahko dose-

žemo in je v najboljšem premeru enak ali pa večji od polmera vodnega curka. Na spodnjem robu obdelovanca pa pride do napake zaradi odklanjanja curka med rezanjem. Odklanjanje je večje pri višjih hitrostih obdelave in povzroča spodjedanje materiala.

Napaka vhoda in izhoda (NVI) opisuje napako na rezalnem robu, ki nastane na mestu, kjer curek vstopa in izstopa iz konture, saj na tem mestu pogosto pride do spremembe strani gibanja cuka, kot prikazuje slika 1c. Na mestu spremembe smeri, podobno kot pri napaki vogala, lahko pride do spodjedanja materiala na spodnjem robu. Do napake pride tudi ob nepopolnem odvzemu materiala pri vhodu in izhodu, ki na površini pusti konico neodvzetega materiala. Napako določimo po formuli $NVI = t_1/t_2$, kjer je t_1 višina napake, t_2 pa njena širina.

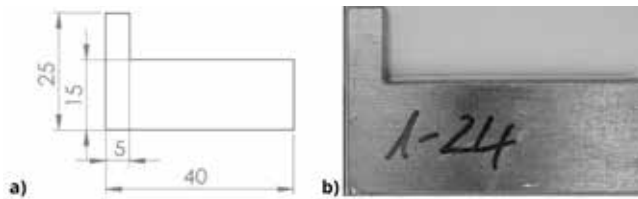
Za določanje hitrosti rezanja stroja v za obdelavo z AVC se uporablja oblika semiempirične Zengove enačbe:

$$v = \left(\frac{N_m \cdot p^{1,25} \cdot \dot{V}^{0,687} \cdot \dot{m}_a^{0,343}}{C_z \cdot h \cdot Q \cdot d_f^{0,618}} \right)^{1,15} \quad (1)$$

kjer je N_m empirično določeno obdelovalno število, p tlak vode pred vodno šobo v MPa, $\dot{V}$ volumnski pretok vode, podan v l/min, $\dot{m}_a$ masni pretok abraziva, podan v g/s, C_z brezdimenzijska konstanta 8800, d_f premer fokusirne šobe v mm, v hitrost rezanja v mm/s in h debelina materiala, podana v mm.

3 Metodologija

Za eksperimentalno delo je bil uporabljen dvoosni obdelovalni center za rezanje z AVC, OMAX 2652A (ZDA), opremljen z visokotlačno črpalko z ojačevalnikom BHDT Ecotron 403 (Avstrija). Eksperimenti so bili izvedeni pri štirih tlakih vode: 240



Slika 2 : Obdelovanec iz aluminija 6061: a) model z dimenzijami in b) izrezan preizkušalec debeline 4 mm

MPa, 250 MPa, 270 MPa in 300 MPa. Uporabili smo rezalno glavo, sestavljeno iz vodne šobe premera 0,3 mm in iz fokusirne šobe premera 1,02 mm, obe proizvajalca Allfi (Avstrija). Za rezanje smo uporabili mineralni abraziv granat granulacije #80 z masnim pretokom 7,5 g/s.

Obdelovalni center za določanje kinematike rezanja uporablja programsko opremo Omax Make, ki poleg algoritma za določanje hitrosti in pospeškov rezanja vsebuje tudi podatke o obdelovalnem številu materiala obdelovanca. Eksperimentalno smo analizirali skladnost doseganja kvalitete rezanja obdelovancev iz aluminija 6061, ki se pogosto uporablja za konstrukcijo letalskih struktur, avtomobilskih delov ter številnih drugih aplikacij in ima obdelovalno število 219,3. Obdelovanec, prikazan na *sliki 2*, je zasnovan tako, da omogoča merjenje vseh kriterijev kakovosti pri vseh 5 razredih kvalitete in je bil izdelan v treh debelinah: 4 mm, 8 mm in 10 mm.

Debeline so bile izbrane tako, da pri vseh lahko dosežemo vseh pet kvalitetnih razredov, določenih po standardu SN 214001. Hitrosti rezanja, določene z algoritmom programske opreme Omax Make, so prikazane v *tabeli 2*. Pri debelinah 4 mm in 8 mm smo izvedli poskuse pri vseh štirih tlakih,

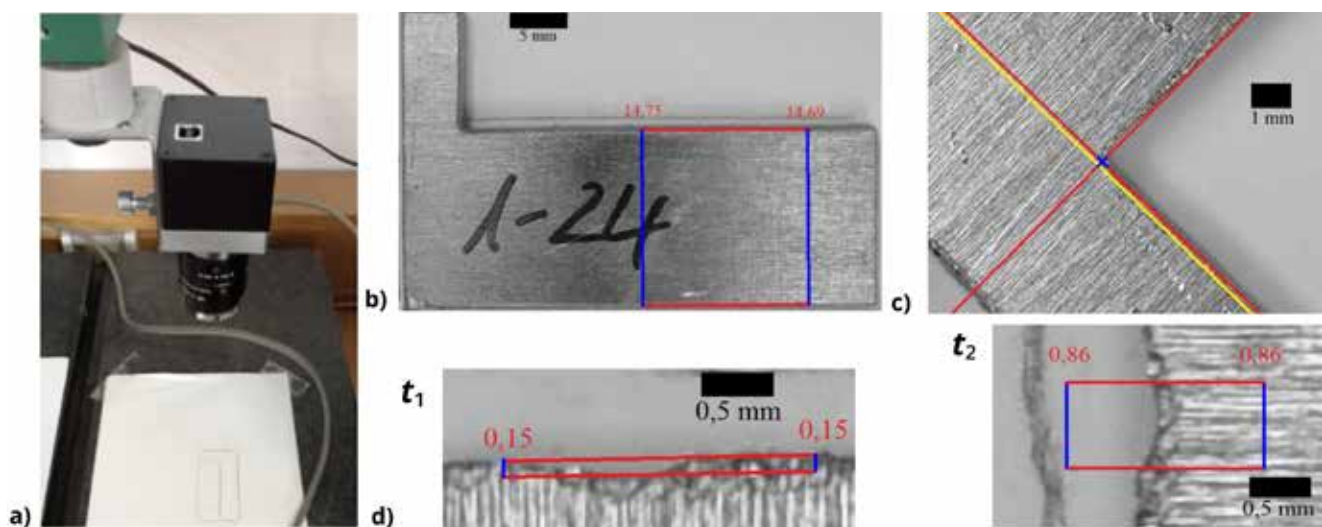
Tabela 2 : Hitrosti rezanja v mm/min, ki jih za aluminij 6061 pri izbranih procesnih parametrih določa algoritem programa Omax Make

h [mm]	p [MPa]	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
4	240	941	807	506	364	281
	250	996	855	536	3853	298
	270	1110	952	597	429	332
	300	1287	1104	693	498	385
8	240	486	417	261	188	145
	250	536	459	288	207	160
	270	640	549	345	248	192
10	300	802	688	431	310	240
	250	997	855	536	385	298

medtem ko smo karakteristike rezanja pri debelini 10 mm zaradi omejenega obsega raziskave testirali le pri tlaku vode 250 MPa.

3.1 Potek meritev

Hrapavost površine smo pomerili z merilnikom hrapavosti Hammel Tester T1000 LV15. Meritev smo ponovili trikrat na vsakem vzorcu. Ostale parametre kvalitete smo izmerili s pomočjo digitalne analize fotografij v programskem okolju Matlab. Za zajem slike smo uporabili kamero z ločljivostjo senzorja 5 milijonov slikovnih točk in lečo FUJINON 1:1,6/35mm HF35HA-1B. Vpeli smo jo v stojačo tako, da je bila postavljena pravokotno nad merilni prostor, kot prikazuje *slika 3a*. Kalibracijo smo izvedli na podlagi kljunastega merila, ki smo ga ob zajemu fotografije postavili poleg merjenja.

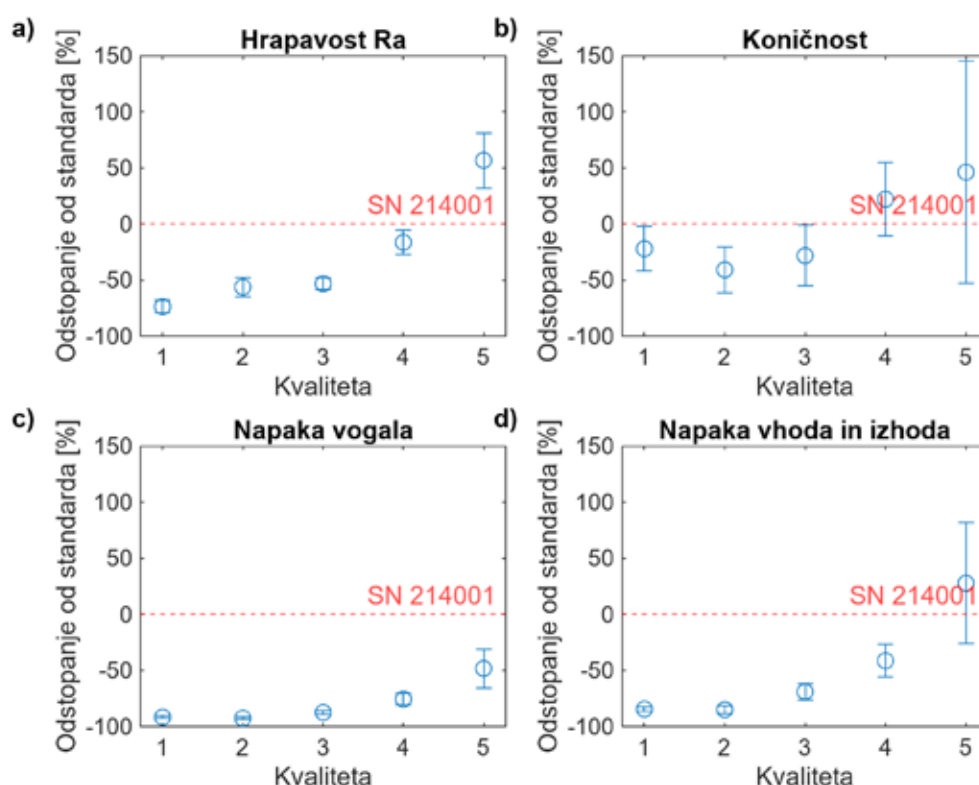


Slika 3 : a) Zajem fotografij vzorcev za analizo kriterijev kvalitete, b) določitev koničnosti, zajem širine obdelovanca, kjer modra črta prikazuje izmerjeno širino, c) meritev napake vogala in d) meritev višine (t_1) in širine (t_2) napake vhoda in izhoda.

Koničnost smo določili tako, da smo na nasprotnih robovih narisali črti ter izračunali povprečno razdaljo med njima, kot prikazuje *slika 3b*, in enako ponovili na drugi strani preizkušanca. Iz meritev smo nato preračunali koničnost. **Napako vogala** smo izmerili na spodnji strani obdelovanca tako, da smo najprej določili stranici vzorca, na *sliki 3c* prikazani z rdečima črtama. Presečišče črt je v pravem vogalu vzorca, kot ga označuje modri križec. Rumeno črto smo postavili v točko, kjer je napaka vogala največja. Merili smo razdaljo med modrim križcem in rumeno črto. **Napako vhoda in izhoda** s konture smo merili na spodnji strani vzorca in izmerili širino in dolžino napake, kot prikazuje *slika 3d*.

4 Rezultati in diskusija

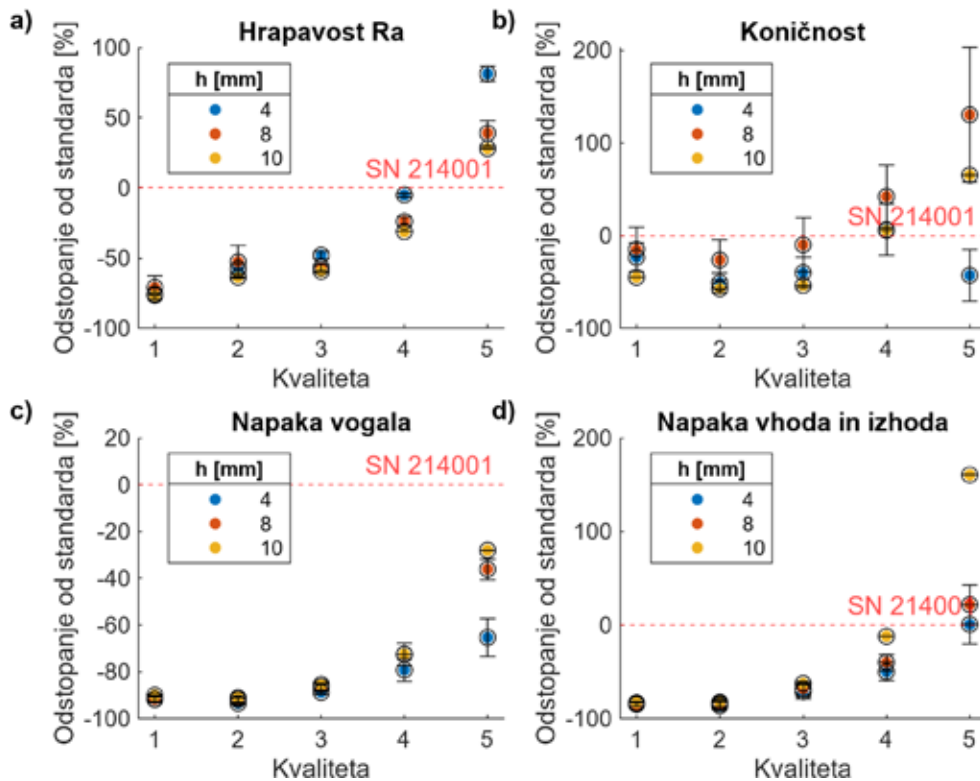
Rezultati meritev, prikazani na *sliki 4*, predstavljajo sposobnost algoritma za doseganje karakteristik kvalitete, določene po standardu SN 214001, pri rezanju aluminija 6061 izražene v procentih, medtem ko je na *sliki 5* odstopanje od standarda dodatno razdeljeno glede na debelino odrezanega materiala. Dodatno so odstopanja povprečnih vrednosti kriterijev kvalitete za posamezni razred kvalitete predstavljena v *tabeli 3*. *Slike 6-10* prikazujejo rezultate meritev kriterijev kvalitete za vsak razred kvalitete posebej in jih primerjajo z zahtevami standarda SN 214001. Iz rezultatov je razvidno,



Slika 4 : Skupno odstopanje kriterijev kvalitete od standarda SN 214001 za peto kvaliteto (rdeča črtkana črta) pri rezanju aluminija 6061: a) hrapavost Ra, b) koničnost, c) napaka vogala in d) napaka vhoda in izhoda iz konture

Tabela 3 : Odstopanje povprečnih vrednosti kriterijev kvalitete od standarda SN 214001

Kakovost Q	Ra [%]		Koničnost [%]		Napaka vogala [%]		Napaka vhoda izhoda [%]	
	srednja vrednost	Std	srednja vrednost	Std	srednja vrednost	Std	srednja vrednost	Std
1	-73,6	5,7	-22,1	19,9	-91,5	1,1	-84,4	2,1
2	-56,1	8,5	-40,7	20,3	-92,5	1,2	-84,9	3,6
3	-53,1	5,5	-28,2	27,2	-87,4	1,8	-68,9	7,3
4	-16,3	11,1	22,2	32,8	-75,5	5,4	-41,3	14,5
5	56,7	24,5	46,2	99,0	-48,2	17,4	27,9	54,0



Slika 5 : Skupno odstopanje kriterijev kvalitete od standarda za kvaliteto Q5 glede na debelino: a) hrapavost Ra, b) koničnost, c) napaka vogala in d) napaka vhoda in izhoda iz konture

da algoritmi za krmiljenje stroja procesa obdelave ne uspejo prilagoditi v taki meri, da bi rezultati obdelave v celoti zadostili kakovostnim razredom, definiranim po standardu.

Pri doseganju pogoja *hrapavosti površine Ra* tako pri kvalitetnem razredu Q5 pri nobeni od testiranih debelin nismo dosegli definiranih vrednosti, medtem ko so bile vrednosti za Q4 v celoti dosežene. Pri kvalitetnem razredu Q3 po drugi strani rezultati močno presegajo kriterij hrapavosti in so bliže kriteriju za Q4 kot za Q3. Podobno lahko opazimo za kriterija, določena za Q2 in Q1. Iz rezultatov je razvidno, da algoritmi za krmiljenje stroja procesa obdelave ne uspejo prilagoditi v taki meri, da bi rezultati obdelave v celoti zadostili kakovostnim razredom, definiranim po standardu. Pri doseganju pogoja hrapavosti površine Ra tako pri kvalitetnem razredu Q5 pri nobeni od testiranih debelin nismo dosegli zahtevanih vrednosti po standardu, medtem ko so bile vrednosti za Q4 v celoti dosežene (slika 4a, tabela 3). Pri kvalitetnem razredu Q3 po drugi strani rezultati močno presegajo kriterij hrapavosti in so bliže kriteriju za Q4 kot za Q3. Podobno lahko opazimo za kriterija, določena za Q2 in Q1.

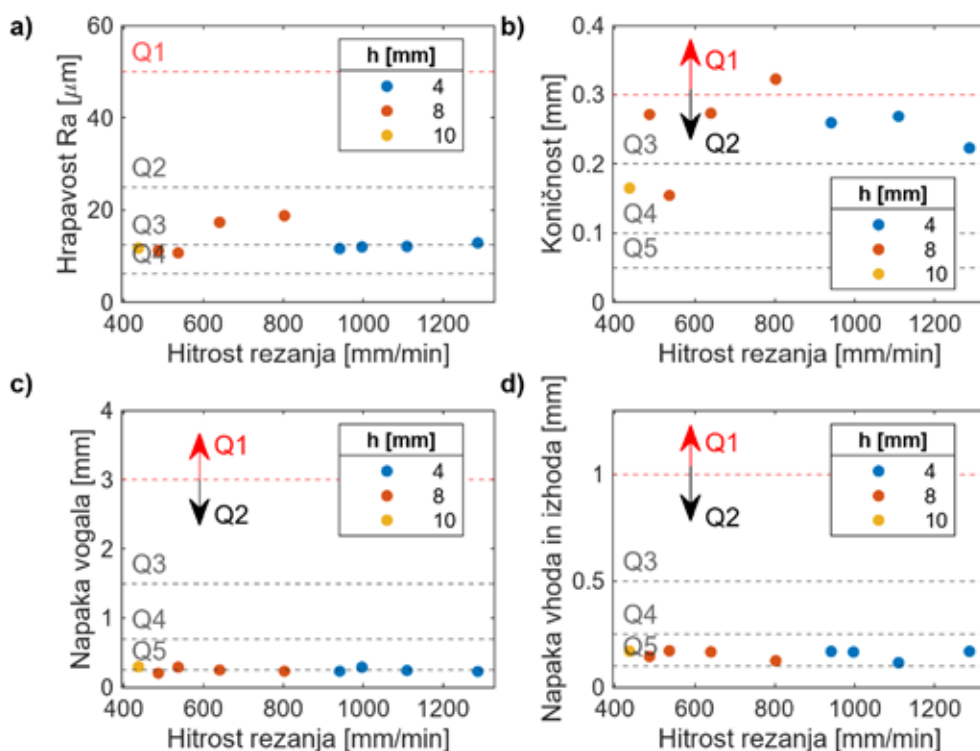
Iz dosedanjih raziskav je znano, da na hrapavost poleg procesnih parametrov, kot so tlak vode, pretok vode in masni pretok abraziva, poglavitno vpliva zrnatost abraziva. Pri izbiri bolj grobih procesnih parametrov, ki so z ekonomskega vidika bolj ugodni, je tako smiselno prilagoditi tudi granulacijo

abraziva. Z večanjem granulacije pa tako lahko tudi dodatno povišamo hitrost odnašanja materiala pri enakih procesnih parametrih.

Rezultati meritve koničnosti kažejo na to, da algoritem za uporabljen obdelovalni stroj za kvalitetni razred Q5 dobro prilagaja kinematiko stroja le pri najmanjši debelini, 4 mm (slika 4c in slika 5c). Pri večjih debelinah je bila po standardu dovoljena koničnost presežena. Bolj zanimivo je pri kvalitetnem razredu Q3, kjer algoritem na stroju dosega in presega kriterij koničnosti pri debelinah 4 mm in 10 mm, medtem ko vrednost nekoliko presega pri vmesni debelini 8 mm. Pri razredih Q2 in Q1 algoritem z nastavljen kinematiko stroja dosega boljše rezultate od zahtevanih.

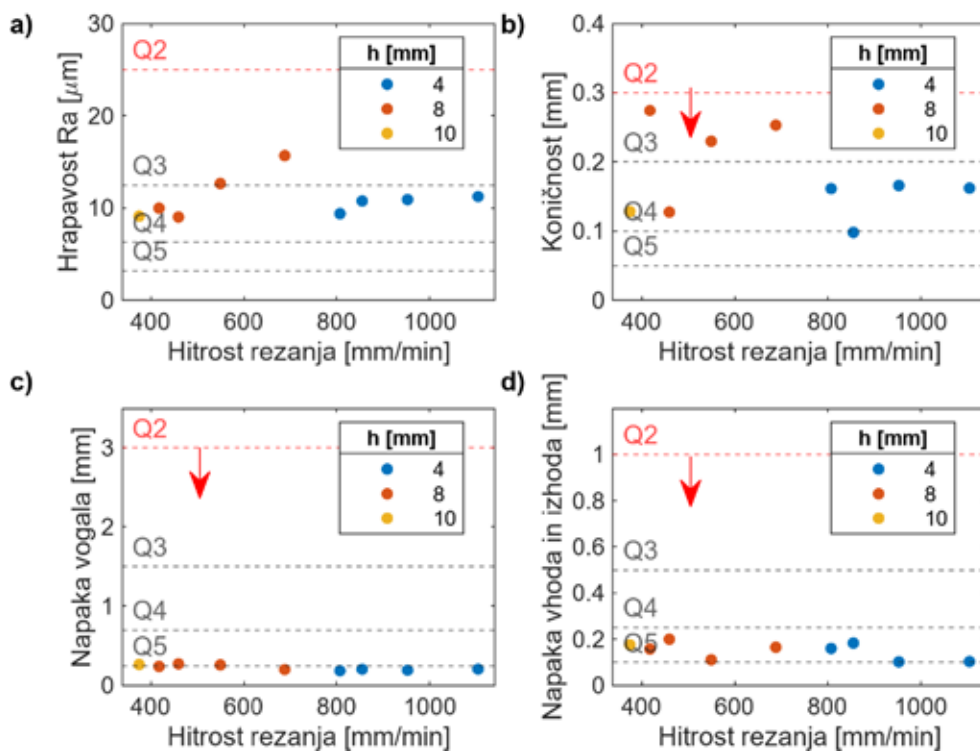
Izmerjene vrednosti *napake vogala* pri vseh kvalitetnih razredih presegajo mejo, določeno po standardu. Medtem ko je to odstopanje relativno majhno (slika 4b in slika 5b), pa pri ostalih kvalitetnih razredih močno presegamo mejne vrednosti. Napaka vogala je posledica spodjedanja vogala na spodnjem robu obdelovanca zaradi odklona curka. Pri višjih hitrostih rezanja je odklon curka večji, zaradi česar prihaja v tem primeru do večjega spodjedanja. Rezultati tako nakazujejo, da algoritem ali preveč konzervativno določa velikost pospeška ali pa kaže na mehansko omejitev stroja. Pri izdelavi bolj zapletenih kontur lahko ravno z ustreznim krmiljenjem tega parametra dosežemo visoko stopnjo skrajšanja časa obdelave.

Kvaliteta Q1



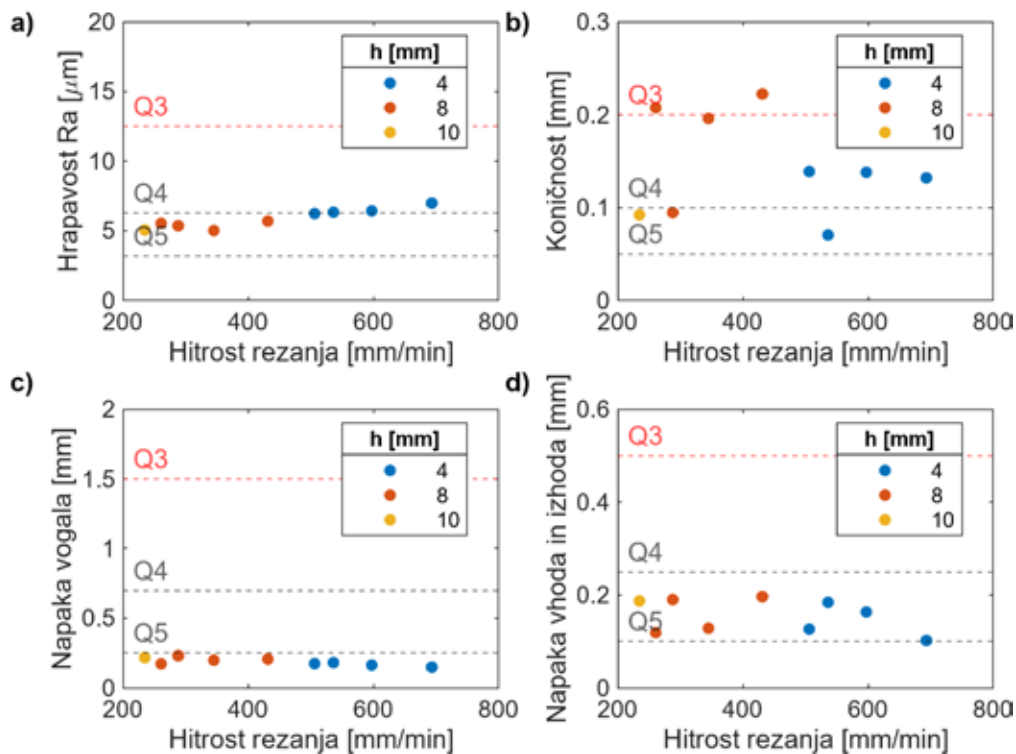
Slika 6 : Doseganje kriterijev kvalitete, določene po standardu SN 214001 za prvo kvaliteto (rdeča črtkana črta) pri različnih hitrostih rezanja aluminija 6061: a) hrapavost Ra, b) koničnost, c) napaka vogala in d) napaka vhoda in izhoda iz konture

Kvaliteta Q2



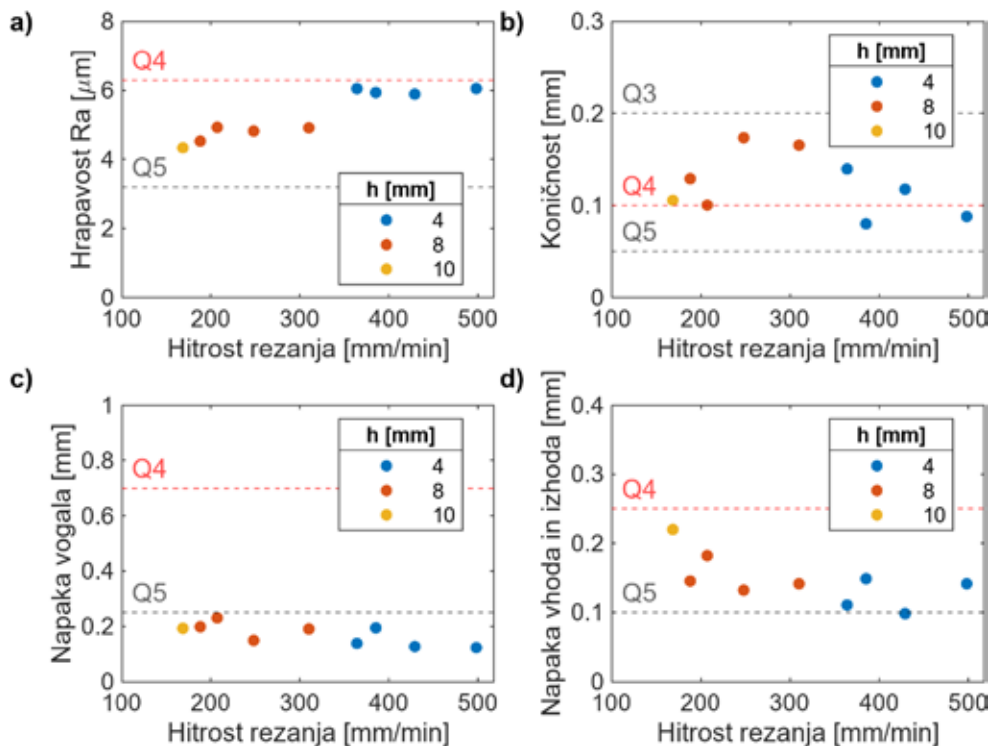
Slika 7 : Doseganje kriterijev kvalitete, določene po standardu SN 214001 za drugo kvaliteto (rdeča črtkana črta) pri različnih hitrostih rezanja aluminija 6061: a) hrapavost Ra, b) koničnost, c) napaka vogala in d) napaka vhoda in izhoda iz konture

Kvaliteta Q3



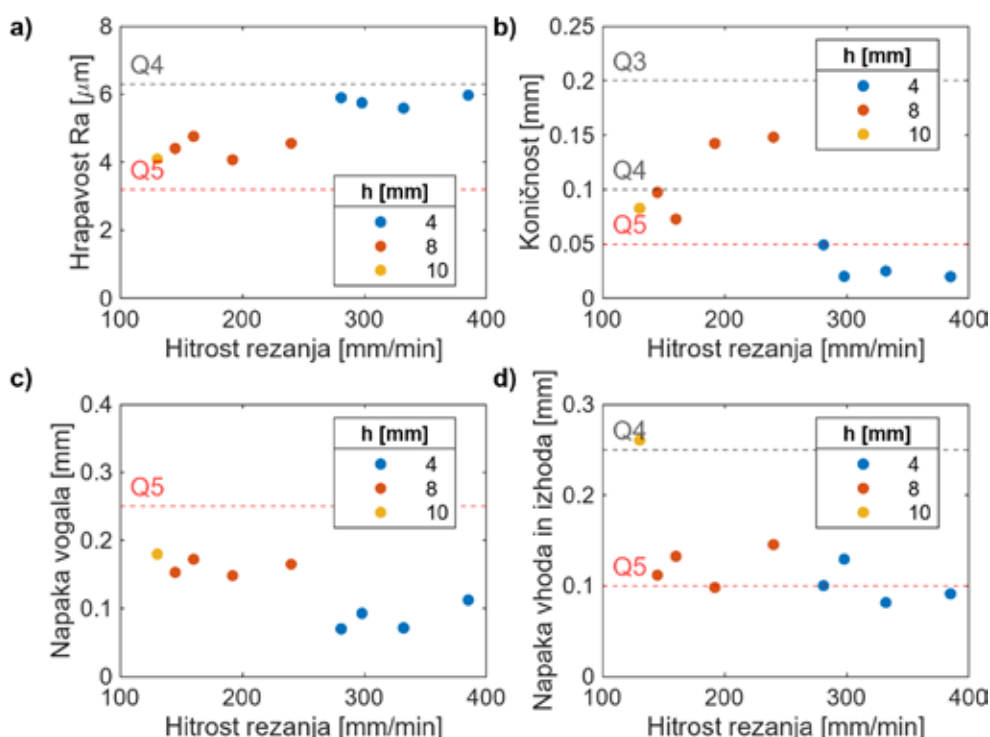
Slika 8 : Doseganje kriterijev kvalitete, določene po standardu SN 214001 za tretjo kvaliteto (rdeča črtkana črta) pri različnih hitrostih rezanja aluminija 6061: a) hrapavost Ra, b) koničnost, c) napaka vogala in d) napaka vhoda in izhoda iz konture

Kvaliteta Q4



Slika 9 : Doseganje kriterijev kvalitete, določene po standardu SN 214001 za četrto kvaliteto (rdeča črtkana črta) pri različnih hitrostih rezanja aluminija 6061: a) hrapavost Ra, b) koničnost, c) napaka vogala in d) napaka vhoda in izhoda iz konture

Kvaliteta Q5



Slika 10 : Doseganje kriterijev kvalitete, določene po standardu SN 214001 za peto kvaliteto (rdeča črtkana črta) pri različnih hitrostih rezanja aluminija 6061: a) hrapavost Ra, b) koničnost, c) napaka vogala in d) napaka vhoda in izhoda iz konture

Pri meritvah *napake vhoda in izhoda* iz konture rezultati kažejo, da algoritem s prilagajanjem kinematike procesa ustrezno dosega kriterij Q5 po standardu le za debelino 4 mm (slika 4d in slika 5d), nekoliko presega pri debelini 8 mm in močno za kar 160 % presega pri debelini materiala 10 mm. Pri vseh ostalih kvalitetnih razredih algoritem zagotovi kriterijem po standardu oziroma jih pri kvalitetnih razredih Q3, Q2 in Q1 močno presega (slika 6), kar ponovno kaže na preveliko konzervativnost algoritma v teh primerih in nakazuje na možnosti za optimizacijo procesa.

5 Zaključek

Na podlagi izvedenih eksperimentov smo ugotovili, da trenutni algoritmi za krmiljenje stroja ne dosegajo v celoti zahtevane kakovosti po standardu SN 214001. Pri najmanjši debelini 4 mm smo dosegli zahtevane vrednosti za kakovost Q4, vendar so bile pri večjih debelinah presežene. Pri kakovostnih razredih Q3, Q2 in Q1 so rezultati hrapavosti površine presegali zahtevane vrednosti, kar nakazuje na potrebo po prilagoditvi granulacije abraziva in izboljšanju procesnih parametrov. Rezultati napake vogala in napake vhoda ter izhoda kažejo na preveliko konzervativnost algoritma, kar nakazuje na možnosti za optimizacijo procesa.

Raziskava izpostavlja potrebo po nadaljnjih izboljšavah algoritmov in prilagoditvah procesnih parametrov, da bi dosegli boljšo skladnost s standardom SN 214001 in zagotovili višjo kakovost obdelave z abrazivnim vodnim curkom. Prilagoditev granulacije abraziva in izboljšanje nadzora nad kinematiko stroja sta ključna dejavnika za doseg boljših rezultatov pri rezanju različnih debelin materiala.

Viri

- [1] W. C. Cooley, "Advances in the technology of fluid jets: Past, present and targets for the 21st century," in 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, 1998, pp. 3-5.
- [2] A. W. Momber and R. Kovacevic, Principles of Abrasive Water Jet Machining. London: Springer London, 1998.
- [3] J. Zeng and T. J. Kim, "Parameter Prediction and Cost Analysis in Abrasive Waterjet Cutting Operations," in 7th American Water Jet Conference, 1993, pp. 175-189.
- [4] Y. Natarajan, P. K. Murugesan, M. Mohan, and S. A. Liyakath Ali Khan, "Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review," J. Manuf. Process., vol. 49, no. January 2019, pp. 271-322, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.11.030.

- [5] S. Saravanan, V. Vijayan, S. T. J. Suthahar, A. V. Balan, S. Sankar, and M. Ravichandran, "A review on recent progresses in machining methods based on abrasive water jet machining," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 116–122, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.373.
- [6] H. Wang, R. Yuan, X. Zhang, P. Zai, and J. Deng, "Research Progress in Abrasive Water Jet Processing Technology," *Micromachines*, vol. 14, no. 8, p. 1526, Jul. 2023, doi: 10.3390/mi14081526.
- [7] C. Z. Huang, J. Wang, Y. X. Feng, and H. T. Zhu, "Recent Development of Abrasive Water Jet Machining Technology," *Key Eng. Mater.*, vol. 315–316, pp. 396–400, Jul. 2006, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.315-316.396.
- [8] R. Selvam, L. Karunamoorthy, and N. Arunkumar, "Investigation on performance of abrasive water jet in machining hybrid composites," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 32, no. 6, pp. 700–706, Apr. 2017, doi: 10.1080/10426914.2016.1198039.
- [9] Z. Riha, M. Zelenak, K. Soucek, and A. Hlavacek, "Flow Field Analysis Inside and at the Outlet of the Abrasive Head," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 22, Jul. 2021, doi: 10.3390/ma14143919.
- [10] "SN 214001: 2010-03 – Contact-free cutting – Water jet cutting – Geometrical product specification and quality," 2010.
- [11] D. Klichova and J. Klich, "Study of the Effect of Material Machinability on Quality of Surface Created by Abrasive Water Jet," *Procedia Eng.*, vol. 149, pp. 177–182, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.653.
- [12] D. Klichova and L. Gurková, "Evaluation of quality of cut surfaces created by abrasive water jet according to swiss standard SN 214001," in *Water jet 2017*, 2017, pp. 81–89.
- [13] J. Zeng and T. J. Kim, "Development of an Abrasive Waterjet Kerf Cutting Model for Brittle Materials," pp. 483–501, 1992, doi: 10.1007/978-94-011-2678-6_33.
- [14] J. Zeng, "Determination of machinability and abrasive cutting properties in AWJ cutting," 2007, [Online]. Available: <https://www.omax.com/sites/default/files/documents/determinationofmachinabilityandabrasivecuttingproperties.pdf>.
- [15] N. Yuvaraj and M. Pradeep Kumar, "Multiresponse Optimization of Abrasive Water Jet Cutting Process Parameters Using TOPSIS Approach," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 30, no. 7, pp. 882–889, 2015, doi: 10.1080/10426914.2014.994763.

Characteristics of machining 6061 aluminum alloy with abrasive water jet in relation to standard SN 214001

Abstract:

In this study, we investigated the machining of 6061 aluminum alloy using abrasive water jet and compared it with the SN 214001 standard. Experiments were conducted at various water pressures and workpiece thicknesses, measuring surface roughness (Ra), kerf taper, inlet and outlet errors, and corner errors. The results indicate that the current machine control algorithms do not fully meet the required quality standards of SN 214001, especially at greater workpiece thicknesses. The research highlights the need for further improvements in algorithms and adjustments of process parameters to achieve better compliance with the standard. Additionally, it points out the excessive conservatism in setting cutting speeds for lower quality grades, which reduces process efficiency.

Keywords:

abrasive water jet, aluminium 6061, kerf taper, surface roughness, corner error, inlet-outlet error, cutting speed

POSVET

AVTOMATIZACIJA STREGE IN MONTAŽE 2024 - ASM `24

06. decembra 2024

na Gospodarski zbornici Slovenije v Ljubljani

aktualne novice o posvetu so na voljo na www.posvet-asm.si