

## TEHNOLOGIJA REZANJA Z LEDNIM VODNIM CURKOM: IZZIVI IN PRILOŽNOSTI ZA SLOVENSKO STROJEGRADNJO

Joško VALENTINČIČ<sup>1</sup>, Andrej LEBAR<sup>1,2</sup>, Suzana VINETIČ<sup>1</sup>, Pavel DREŠAR<sup>1</sup>, Izidor SABOTIN<sup>1</sup>, Marko JERMAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

<sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta

### IZVLEČEK

Obdelava z abrazivnim vodnim curkom (AVC) spada med nekonvencionalne obdelovalne postopke z usmerjenim dovajanjem energije. Prednost AVC pred sorodnimi postopki je v tem, da ne povzroča toplotno prizadete cone. V Sloveniji je tehnologija rezanja z AVC prisotna že od leta 1990, kar je komaj 10 let po prvi industrijski uporabi tega postopka za konturno rezanje. Mineralni abraziv, ki se dovaja v visokohitrostni vodni curek premera manj kot milimeter, doseže hitrosti do 700 m/s, kar omogoča rezanje praktično vseh materialov. Kljub očitnim prednostim, uporaba postopka v prehrambeni in letalski industriji ni sprejemljiva, saj na obdelani površini ostanejo sledovi delcev mineralnega abraziva. Z raziskavami materialnih lastnosti ledu, je bilo ugotovljeno, da imajo močno podhlajena ledena zrna podobno trdoto kot mehkejši mineralni abrazivi, zato smo raziskujemo in razvijamo tehnologijo, pri kateri namesto mineralnega abraziva uporabljamo ledena zrna. V podhlajen visokohitrostni vodni curek dovajamo močno ohlajena ledena zrna in tako režemo tudi trše materiale. Z dosedanjimi raziskavami smo potrdili preživetje ledenih zrn v ekstremnih pogojih, ki vladajo v rezalni glavi. Na osnovi dosedanjih rezultatov in publikacij smo vzbudili zanimanje industrije tako v EU, kot v Aziji, ki že izkazuje potrebo po tej tehnologiji, kar odpira nove možnosti slovenski strojegradnji.

### 1 UVOD

Tehnologija obdelave z vodnim curkom (VC) in abrazivnim vodnim curkom (AVC) je trenutno v uporabi v številnih industrijskih procesih za rezanje, graviranje ter struženje kovinskih in nekovinskih materialov debeline do nekaj sto milimetrov. V zadnjem času se postopek uveljavlja predvsem v živilski, letalski in navtični industriji, kjer se pogosto srečujemo z biološkimi in sodobnimi materiali, kot so razne zlitine in kompozitni materiali, ki jih je težko obdelovati s preostalimi obdelovalnimi postopki. Po drugi strani se tehnologija uporablja tudi za čiščenje in površinsko obdelavo materiala.

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 predstavile 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. 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.), predvsem pa se je tehnologija izkazala pri obdelavi aluminija in težko obdelovalnih zlitin.

Mineralni abraziv kot potrošni material predstavlja glavni strošek procesa in več kot 99 % odpadnih snovi, ki nastanejo med rezanjem ali odstranjevanjem materiala. Ostanke abraziva na obdelovancu je treba po obdelavi odstraniti, pri čemer posamezna zrna abraziva pogosto ostanejo zagozdena v obdelani površini, kar v posebnih primerih (npr. v živilski industriji, medicini, pri obdelavi turbinskih lopatic) ni zaželeno. Zaradi tega obstaja potreba po uporabi VC brez abraziva

ali s takšnimi abrazivnimi sredstvi, ki ne bi pustila odpadkov po obdelavi.

Na voljo imamo več tehnik, s katerimi se spoprijemamo z opisanim problemom. Uporabljamo lahko čisti VC brez dodanega abraziva, ki pa ne zmore rezati trših materialov, oz. dodajamo abrazivna sredstva, ki se po obdelavi stopijo (npr. sol, sladkor), a imajo slabše obdelovalne lastnosti. Ena izmed obetavnejših novih tehnologij je zamenjava mineralnih abrazivov z ledenimi zrn.

V tem prispevku predstavljamo prototipno napravo za rezanje z lednim abrazivnim vodnim curkom, kjer ledena zrna v visokohitrostnem vodnem curku sodelujejo pri odnašanju materiala in omogočajo med drugim tudi konturno rezanje kompozitnih materialov, jekla in barvnih kovin. Napravo smo razvili do stopnje tehnološkega razvoja 3 (TRL 3) v Laboratoriju za alternativne tehnologije na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

## 2 TEORETIČNO OZADJE

Uporabo ledenih zrn, kot nadomestek za mineralni abraziv je raziskovalo več raziskovalnih skupin [4–8], ki so prišle do zaključka, da je zamenjava izvedljiva.

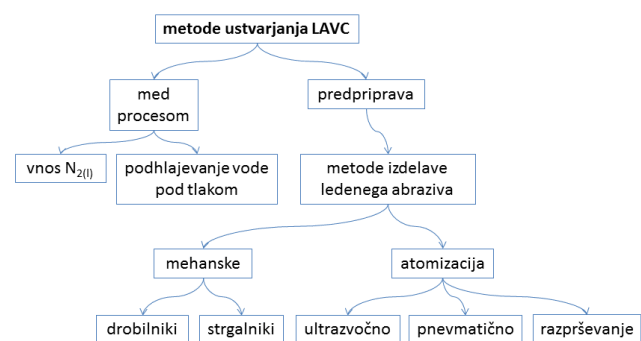
Razvoj tehnologije sega v leto 1982, ko je Galecki s sodelavci [9] uporabo lednega abrazivnega vodnega curka (LAVC) predlagal za čiščenje površin. Do danes je tehnologijo raziskovalo že več raziskovalnih skupin. V literaturi tako zasledimo več pristopov k razvoju LAVC, ki jih glede na način priprave ledenih zrn lahko razdelimo na dva osnovna principa; (1) na ustvarjanje ledenih zrn med procesom s transformacijo oz. delno zamrznitvijo VC v LAVC, in (2) na vnos v naprej pripravljenih podhlajenih ledenih zrn v rezalno glavo. Delitev metod glede na način ustvarjanja in vnosa ledenih zrn predstavlja slika 2.7.

Eden od načinov je zamrzovanje vodnih kapljic v prhi iz utekočinjenega dušika. Zaradi intenzivne izmenjave toplote ob vrenju utekočinjenega dušika ob stiku z vodno kapljico, le-ta skoraj v trenutku zamrzne in pade v zbiralnik ledenih zrn (Slika 4).

Tako nastala ledena zrna dovajamo v visokohitrostni vodni curek kot prikazuje Slika 5 (desna stran). S stališča trdote ledenih zrn je dobro,

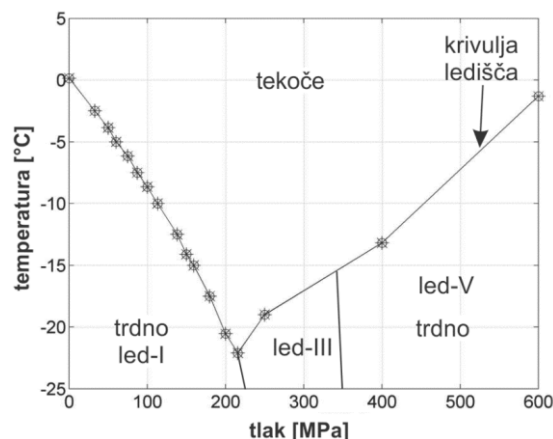
da je vodni curek čim hladnejši. Zato je dobro hladiti vodo na tlačni strani (leva stran na Slika 5).

Pri ustvarjanju ledenih zrn izven rezalne glave je pri njihovem transportu in skladiščenju treba poskrbeti, da ne pride do sintranja in lepljenja na površino. Moč oprijema delcev je odvisna od temperature ledu in se manjša z nižanjem temperature [12]. Pri temperaturi nižji od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  postanejo adhezijske sile zanemarljivo majhne.

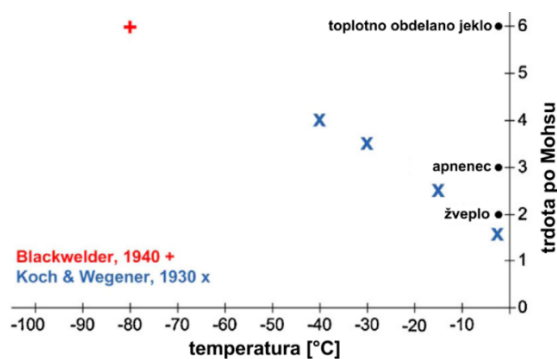


Slika 1: Različne metode ustvarjanja lednega abrazivnega vodnega curka.

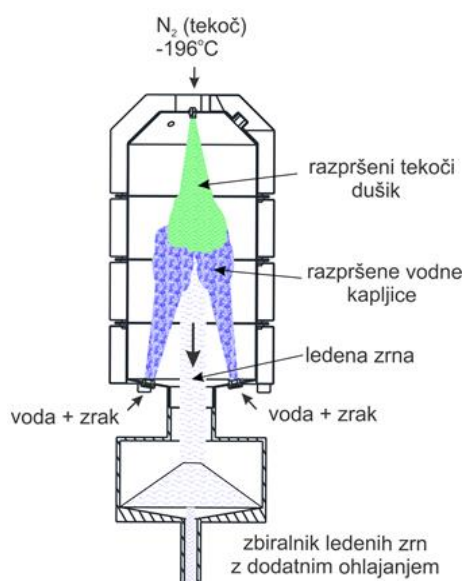
Žal se izkaže, da nobena od metod sprotnega (med procesom) ustvarjanja lednega abrazivnega vodnega curka v praksi ne deluje. S podhlajevanjem vode pod visokim tlakom res lahko ohladimo tekočo vodo tudi pod  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Slika 2), vendar ledena zrna, ki nastanejo pri prehodu skozi vodno šobo zaradi nenadnega padca tlaka niso dovolj hladna, da bi s takim curkom lahko učinkovito rezali. Trdota ledenih zrn je namreč zelo odvisna od njihove temperature (Slika 3) in doseže trdoto mehkejših materialov, ki se uporabljajo za rezanje z AVC, pri temperaturi okoli  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Slika 2: Fazni diagram vode v območju interesa, izdelan glede na podatke iz literature [10,11]



Slika 3: Trdota ledu v odvisnosti od temperature po Mohsovi lestvici trdote [12]



Slika 4: Shema delovanja enote za izdelavo ledenega abraziva

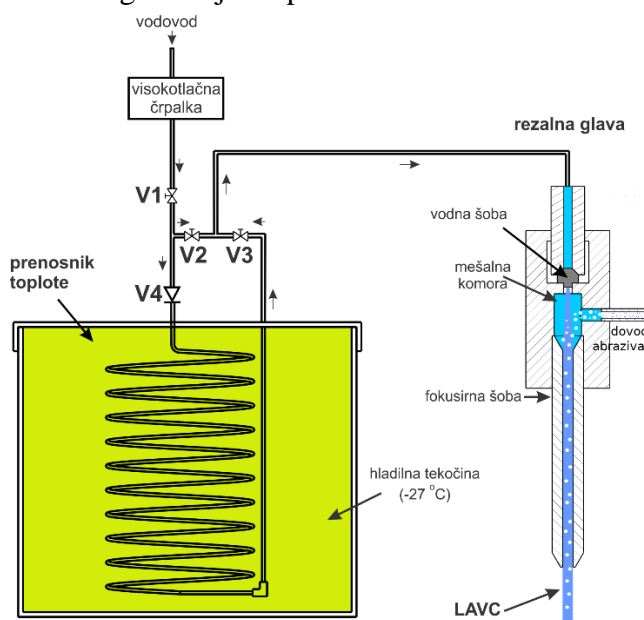
Kondenzirana vlaga iz zraka lahko povzroči, da se ledena zrna med sabo sprimejo ali pa se prilepijo na stene posode oziroma cevi. V obeh primerih je posledica mašenje cevi in neustrezna velikost ledenih zrn, ki jih želimo uporabiti kot abraziv. Pri rokovanju z ledenim abrazivom moramo torej paziti, da je le-ta vedno pri temperaturi nižji od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter ga hraniti in prenašati v dušikovi atmosferi, da preprečimo nastajanje kondenzata.

Gostota ledu je prav tako odvisna od temperature in z njenim nižanjem narašča [11]. Sprememba gostote neposredno vpliva na spreminjanje velikosti zrn pri njihovem segrevanju oz. ohlajanju, vendar je ta sprememba zanemarljivo majhna pri velikosti zrn okoli  $500\text{ }\mu\text{m}$ .

Toplotna prevodnost ledu s padanjem temperature narašča [11]. Pri nižji temperaturi se

ledena zrna torej nekoliko počasneje segrevajo, kar je za proces ugodno.

Lomna žilavost materialov se z nižanjem temperature običajno znižuje, zaradi česar pri obremenitvi materiala pri nizkih temperaturah običajno hitreje pride do porušitve. Ledu se s spreminjanjem temperature lomna žilavost ne spreminja bistveno [13,14]. V rezalni glavi VC udari ob abraziv in ga pospešuje do obdelovanca. Ob tem udarcu pogosto pride do drobljenja zrn abraziva, saj ima curek veliko hitrost. Relativno konstantna lomna žilavost ledu pomeni, da lahko ledena zrna ohladimo na temperaturo tekočega dušika brez bojazni, da bi zrna v rezalni glavi zaradi tega hitreje razpadala.



Slika 5: Hlajenje vode na tlačni strani in dovajanje ledenih zrn v visokohitrostni vodni curek.

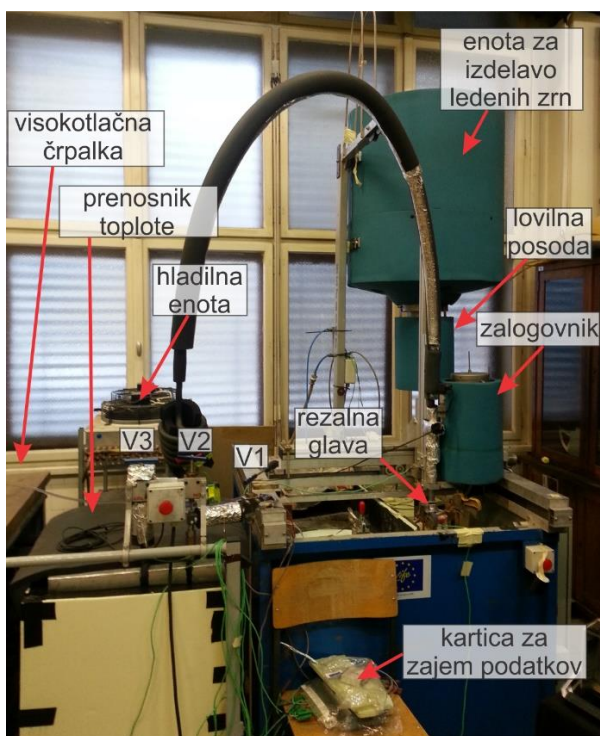
### 3 OPIS PROTOTIPNE NAPRAVE

Prototip stroja za rezanje z LAVC, ki je predstavljen na Slika 6, je sestavljen iz visokotlačne črpalke (P-2040, Omax, ZDA), ki lahko doseže tlake do  $280\text{ MPa}$ , pri največjem pretoku vode  $3,2\text{ l/min}$ . Za hlajenje vode pod tlakom uporabljamo prenosnik toplote, sestavljen iz bazena za hladilno tekočino, ki je v našem primeru mešanica glikola in vode v razmerju 1:1, ter z volumnom  $200\text{ l}$ .

V hladilni tekočini je potopljena spiralna visokotlačna cev skupne dolžine  $20\text{ m}$ . Hladilno tekočino ohlajamo s hladilnim kompresorjem

hladilne moči 7,3 kW, s katerim stabilno ohranjamo temperaturo vode pred vodno šobo pri -20 °C, pri pretoku vode 1,15 l/min, ki ga dosežemo pri tlaku 200 MPa in vodno šobo premera 0,2 mm. Za doseganje omenjene temperature moramo hladilno tekočino ohladiti na temperaturo okoli -27 °C. Prenosnik toplote hladilnega sistema prikazuje Slika 7. Za merjenje temperature uporabljamo sistem termoparov, ki je predstavljen v poglavju meritev temperatur.

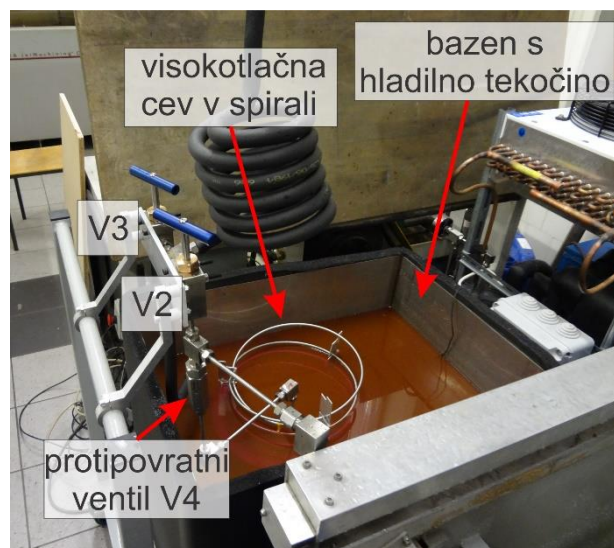
Uporabljamo rezalno glavo proizvajalca Allfi AG Wasserstrahl-Schneidtechnik (Švica) z dvema dovodom za abraziv. Eno odprtino smo uporabili za dovod abraziva, drugo pa za namestitev senzorja tlaka v mešalni komori, preko spremembe katerega lahko zaznamo zamašitev dovodne cevi za abraziv.



Slika 6: Prototip stroja za obdelavo z LAVC, po metodi ustvarjanja ledenega abraziva izven rezalne glave

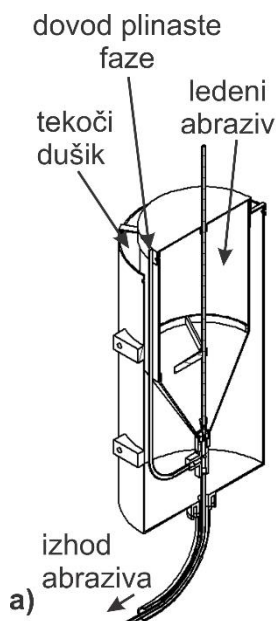
Ledeni abraziv je potrebno hraniti na hladnem, da ne pride do segrevanja in posledično sintranja in taljenja delcev. V ta namen smo izdelali gravitacijski zalogovnik z dvojno steno, ki je prikazan na Slika 8. V zunanjem prostoru hranimo tekoči dušik za hlajenje notranjega dela, kjer se nahajajo ledena zrna. Pri dovajanju abraziva je pomembno, da poleg abraziva dovajamo tudi

plinasto fazo transportnega plina, saj bi se drugače šoba v rezalni glavi lahko zamašila.



Slika 7: Prenosnik toplote hladilnega sistema prototipa stroja za obdelavo z LAVC

Ledena zrna proizvajamo kot smo opisali v prejšnjem poglavju.



Slika 8: Zalogovnik za ledeni abraziv z dvojno steno; a) shematski prikaz in b) izvedba zalogovnika, ki je izoliran s peno iz armafleksa

#### 4 SKLEP – IZZIV IN PRILOŽNOST ZA SLOVENSKO STROJEGRADNJO

Nekaj podjetij po svetu, ki delujejo na področju prehranske industrije in obdelave težko

obdelovalnih materialov je izkazalo interes za to tehnologijo. Za dve od teh smo po pogodbi izvedli obširno testiranje tehnologije. Njihova ugotovitev je bila, da je potrebno še nekaj razvoja, da bi dokončno ugotovili, če je tehnologija za njih uporabna. Na podlagi rezultatov vidijo potencial, vendar glede na svojo strategijo ne sodelujejo kot razvojni partner.

## ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) za finančno podporo v okviru Raziskovalnega programa Inovativni izdelovalni sistemi in procesi (P2-0248).

## Viri

- [1] Cooley WC. Advances in the technology of fluid jets: Past, present and targets for the 21st century. 5th Pacific Rim Int. Conf. Water Jet Technol., New Delhi, India: 1998, p. 3–5.
- [2] Momber AW, Kovacevic R. Principles of Abrasive Water Jet Machining. London: Springer London; 1998. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1572-4>.
- [3] Zeng J, Kim TJ. Parameter Prediction and Cost Analysis in Abrasive Waterjet Cutting Operations. 7th Am. Water Jet Conf., Seattle: 1993, p. 175–89.
- [4] Bach F, Hassel T, Biskup C, Hinte N, Schenk A, Pude F. In-process generation of water ice particles for cutting and cleaning purposes. BHR Gr. - 20th Int. Conf. Water Jet., Graz, Austria: BHR Group Limited, Bedfordshire, UK; 2010, p. 275–83.
- [5] Jerman M, Orbanić H, Junkar M. Razvoj obdelave s kriogenim vodnim curkom. Ljubljana : [M. Jerman], 2010., 2010.
- [6] Karpuschewski B, Emmer T, Schmidt K, Petzel M. Cryogenic wet-ice blasting—Process conditions and possibilities. CIRP Ann - Manuf Technol 2013;62:319–22. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.102>.
- [7] Shanmugam DK. Development of Ice Particle Production System for Ice Jet Process 2005.
- [8] Li F, Geskin ES, Tismenetskiy L. Development of ice jet machining technology. 8th Am. Waterjet Conf., Houston, Texas: WaterJet Technology Association; 1995, p. 671–80.
- [9] Galecki G, Vickers G. Development of ice-blasting for surface cleaning. 6th Int. Symp. Jet Cut. Technol., Guildford, UK: BHRA Fluid Engineering; 1982, p. 59–79.
- [10] Wagner W, Pruss A. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. J Phys Chem Ref Data 2002;31:149. <https://doi.org/10.1063/1.1461829>.
- [11] Lide DR. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 85th ed. CRC Press; 2005.
- [12] Hobbs PV. Ice Physics. Clarendon Press; 1974.
- [13] Nixon WA, Schulson EM. A micromechanical view of the fracture toughness of ice. Le J Phys Colloq 1987;48:8. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1987144>.
- [14] Litwin KL, Zygielbaum BR, Polito PJ, Sklar LS, Collins GC. Influence of temperature, composition, and grain size on the tensile failure of water ice: Implications for erosion on Titan. J Geophys Res 2012;117:E08013. <https://doi.org/10.1029/2012JE004101>.

