

T. Kostadin, G. Cukor, T. Mihalić*

PRIMJENA EKOLOŠKIH NAČELA U OBRADI METALA ODVAJANJEM ČESTICA

UDK 621.9:504.06
PRIMLJENO: 4.12.2018.
PRIHVAĆENO: 4.2.2019.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License 

SAŽETAK: Većina tekućina za obradu metala koje se primjenjuju za hlađenje i podmazivanje pri različitim postupcima obrade metala odvajanjem čestica formulirana je iz mineralnih ulja koja se izdvajaju iz sirove nafte. Zbrinjavanje otpadnih tekućina otvara brojna ekološka pitanja osobito kada se uzme u obzir da se radi o jednom od najsloženijih i najopasnijih vrsta otpada. Razvoj ekološke svijesti uz istovremeno donošenje novih, strožih zakonskih regulativa u svrhu zaštite prirodnih dobara kao i razvoj sustava za upravljanje zdravljem i sigurnošću osoba na radu sve više usmjeravaju proizvodnu industriju prema razvoju i implementaciji alternativnih tehnika hlađenja i podmazivanja u obradi metala te u konačnici suhoj obradi. Tako se danas već govori o posebno prilagođenoj obradi odnosno proizvodnji koristeći nazive "ekološki prihvatljiva obrada", "održiva proizvodnja", "zelena proizvodnja" i sl. U ovome radu istražuju se mogućnosti i prednosti primjene alternativnih tehnika hlađenja i podmazivanja, a posebno hlađenje vrtložnom cijevi. Također, evaluacija obrade obuhvaćena je eksperimentalnom studijom u svrhu razumijevanja vjerojatnih utjecaja korištenja hlađenja vrtložnom cijevi na troškove proizvodnje. Studija slučaja odnosi se na obradu martenzitnog nehrđajućeg čelika. Pokazano je da troškovi alata predstavljaju glavni doprinos ukupnom trošku proizvodnje i da u usporedbi s emulzijom za obradu metala hlađenje vrtložnom cijevi nudi ekonomično rješenje na putu prema održivoj obradi.

Ključne riječi: održiva obrada metala, ekologija, sigurnost na radu

UVOD

Tek početkom 60-ih godina prošlog stoljeća znanstvenici su počeli prepoznavati i izražavati zabrinutost za štetan utjecaj tekućina za obradu metala koje se primjenjuju za hlađenje i podmazivanje pri različitim postupcima obrade metala odvajanjem čestica na okoliš i čovjeka. Zabrinjavajući je podatak da se u Europskoj uniji samo 32 % od ukupne potrošnje ovih tekućina ekološki zadovoljavajuće zbrine (Mortier i sur., 2010.). Zbog smanjenja negativnih utjecaja i provedbe

zakona o zaštiti okoliša i radnika, proizvodna industrija nastoji smanjiti primjenu tekućina za obradu metala i usmjeriti se na prihvaćanje alternativnih tehnika hlađenja i podmazivanja na putu prema održivom načinu proizvodnje.

Brinksmeier i sur. (2015.) dali su opsežni pregled tekućina za obradu metala s posebnim težištem na njihova svojstva i razvoj s obzirom na ekološke karakteristike i korištenje alternativnih tehnika hlađenja i podmazivanja pri obradi. Weir i sur. (2004.) istražili su prednosti suhe obrade u odnosu na mokru obradu te su istaknuli uštedu i porast imidža poduzeća u slučaju kada se ne koriste tekućine za obradu metala. Liao i sur. (2007.) utvrdili su da tehnika podmazivanja minimalnom količinom reznog ulja (MQL tehnika) pri glodanju čelika povećane tvrdoće većim brzinama rezanja

*Tihana Kostadin, mag. ing. stroj., (tihana.kostadin@vuka.hr), Veleučilište u Karlovcu, Trg J. J. Strossmayera 9, 47000 Karlovac, prof. dr. sc. Goran Cukor, (goranc@riteh.hr), Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, dr. sc. Tihomir Mihalić, (tihomir.mihalic@vuka.hr), Veleučilište u Karlovcu, Trg J. J. Strossmayera 9, 47000 Karlovac.

daje bolje rezultate hrapavosti obrađene površine u odnosu na konvencionalnu mokru obradu. Ezugwu (2005.) predstavio je rezultate tvrdog glodanja prevučeni alatom od tvrdog metala iz kojih se vidi znatno dulja postojanost alata kod kriogene obrade u usporedbi s primjenom tekućine za obradu metala. Boswell (2008.) potvrdio je da je učinak hlađenja ohlađenim komprimiranim zrakom generiranim pomoću vrtložne cijevi vrlo usporediv s učinkom hlađenja tekućina za obradu metala. Općenito, u usporedbi s tekućinama za obradu metala alternativne tehnike hlađenja i podmazivanja u određenim uvjetima daju bolji učinak obrade. Ovome treba pridodati ekološke, zdravstvene i ekonomske aspekte primjene.

Uzimajući u obzir negativne učinke koji proizlaze iz korištenja tekućina za obradu metala na osnovi mineralnih ulja, cilj ovog istraživanja je uvođenje alternativne tehnike hlađenja vrtložnom cijevi, čime se pridonosi zaštiti okoliša i zdravlja radnika te smanjenju troškova obrade.

EKOLOŠKI, ZDRAVSTVENI I EKONOMSKI ASPEKTI TEKUĆINA ZA OBRADU METALA

Osnovni zadaci tekućine za obradu metala su hlađenje i podmazivanje alata i obratka u zoni rezanja te ispiranje (odvođenje) strugotine i čestica nastalih zbog trošenja alata iz zone rezanja (Pavić, 2013.). Hlađenjem se odvodi generirana toplina, a podmazivanjem se smanjuje trenje reznog klina u zoni rezanja. Na taj način smanjuju se sila rezanja i potrebna snaga obrade te se usporavaju tribološki procesi, tj. trošenje rezne oštrice alata. Osim porasta postojanosti alata, poboljšava se kvaliteta obrađene površine i smanjuju troškovi eventualne naknadne obrade te povećava produktivnost obrade.

U podjeli tekućina za obradu metala razlikuju se rezna ulja koja imaju primarno svojstvo podmazivanja i tekućine koje se miješaju s vodom (emulzije, polusintetici i sintetici) koje imaju primarno svojstvo hlađenja. Rezna ulja mogu biti

mineralna, biljna, životinjska, njihove mješavine i sintetička, a upotrebljavaju se pri obradi nižim brzinama rezanja gdje porast temperature nije značajan te smanjuju adheziju i abraziju. Emulzije su tekućine na osnovi mineralnog ulja disperziranog u vodi u čiji sastav obvezno ulaze emulgatori koji održavaju ulje u finim kapljicama u vodi i inhibitori korozije, a prema potrebi i drugi aditivi s ciljem poboljšanja radnih svojstava te se koriste pri obradi višim brzinama rezanja gdje postoji veći porast temperature. Polusintetici su mikroemulzije koje sadrže vrlo malu količinu mineralnog ulja disperziranog u vodi. Sintetici su vodene otopine na osnovi sintetičkih (kemijskih) komponenti s dodatkom aditiva i ne sadrže ulje.

Primjena tekućina za obradu metala otvara brojna ekološka pitanja. Promatrajući gubitke kao što su isparavanje, nekontrolirano istjecanje i zaostale količine na obratku, alatu ili strugotini može se ustanoviti kako gotovo 30 % od ukupne godišnje potrošnje tekućine za obradu metala dopijeva iz obradnog sustava u okoliš (Byrne i sur., 2003.). Poseban je problem zbrinjavanje otpadnih tekućina za obradu metala. Iste se prema Odluci Europske komisije o popisu otpada (2000/532/EZ) svrstavaju u opasan otpad te ih je potrebno sigurno zbrinuti na način kojim se ne ugrožava zdravlje ljudi i ne šteti okolišu (Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i vijeća). Prolijevanje otpadne tekućine kao i ispuštanje u kanalizaciju ili u sustav odvodnje oborinske vode može onečistiti tlo i kontaminirati podzemne vode, rijeke, jezera ili more. Pravilno zbrinjavanje podrazumijeva recikliranje ili spaljivanje kao gorivo.

Rukovanje tekućinama za obradu metala predstavlja rizik za zdravlje čovjeka i mogućnost obolijevanja od različitih bolesti, od kojih su najčešće kožne bolesti uzrokovane direktnim kontaktom (slika 1); (NIOSH, 2018.) te maligne i nemaligne bolesti respiratornog sustava. Ostali opasni učinci su: učinak uljnih para, baktericidni učinak, genotoksični učinak, generiranje kancerogenih supstanci, prisutnost čestica teških metala u aditivima itd.



Slika 1. Dermatitis uzrokovan tekućinom za obradu metala
Figure 1. Dermatitis caused by metalworking fluid

Procjena je da troškovi povezani s tekućinama za obradu metala iznose približno 16 % ukupnih troškova proizvodnje, dok kod obrade teško obradivih materijala oni dostižu 20-30 % (Pušavec i sur., 2010.). To je mnogo više od troškova alata koji iznose približno 2-4 % ukupnih troškova proizvodnje. Troškovi povezani s tekućinama za obradu metala nisu ograničeni samo na njihovu nabavu i pripremu, već uključuju i troškove održavanja te zbrinjavanja. Troškovi zbrinjavanja otpadnih tekućina za obradu metala mogu biti i preko četiri puta veći od njihove nabavne cijene, uglavnom, zbog činjenice da većina tekućina za obradu metala nije prirodno biorazgradiva, što onda zahtijeva poseban (skupi) tretman (Hong i Zhao, 1999.).

ALTERNATIVNE TEHNIKE HLAĐENJA I PODMAZIVANJA

Ekološki prihvatljiva obrada ili održiva proizvodnja ili zelena proizvodnja sinonimi su za suvremenu proizvodnu strategiju s krajnjim ciljem minimiziranja potrošnje resursa i utjecaja na okoliš poput otpada i onečišćenja tijekom životnog ciklusa proizvoda s težištem na tekućine za obradu metala kao jednog od glavnih onečišćivača. Za smanjivanje ekološkog opterećenja koje donosi mokra obrada na raspolaganju su različiti pristupi: promjena sastava tekućina za obradu metala, primjena minimalne količine tekućine za obradu metala, kriogena obrada, hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom i suha obrada.

Osnovni sastojak većine tekućina za obradu metala su mineralna ulja koja se izdvajaju iz siro-

ve nafte i čija je biorazgradivost jako niska. Svijest o očuvanju okoliša i zaštiti zdravlja sve više potiče primjenu biljnih ulja ili eterskih ulja koja su po prirodi biorazgradiva.

Primjena minimalne količine tekućine za obradu metala podrazumijeva uporabu ekstremno malih količina (tipično reda veličine 5-50 mililitara po satu s potrošnjom gotovo bez ostatka umjesto nekoliko litara u minuti kao što je to slučaj kod konvencionalne mokre obrade) vrlo fine disperzije kapljevine u struji komprimiranog zraka ili jednostavnije u obliku aerosola. Dovođenje aerosola u zonu obrade može biti vanjsko pomoću posebnih mlaznica ili unutrašnje kroz radno vreteno i kanale u alatu. Ovisno o vrsti i primarnoj zadaći dovedene tekućine uobičajeno se izvodi razlika između podmazivanja minimalnom količinom – MQL (engl. *Minimum Quantity Lubrication*) kada se koriste biorazgradiva ulja odnosno rashladnog podmazivanja minimalnom količinom – MQCL (engl. *Minimum Quantity Cooling Lubrication*) kada se koriste emulzije. Posebno je zanimljiv napredni MQL sustav zasnovan na koncepciji tankog uljnog filma na kapljici vode (Ekinović i sur., 2015.). Kada kapljica dosegne alat ili vruću obrađivanu površinu, ulje za podmazivanje širi se površinom prije širenja vode. Od kapljica vode se očekuje obavljanje tri zadatka: nošenje ulja za podmazivanje, učinkovito širenje ulja preko površine zbog inercije i povećanje učinka hlađenja površine zbog njihove visoke specifične topline i isparavanja. Smanjena potrošnja tekućine za obradu metala osim smanjenja troškova za njezinu nabavu, pripremu, održavanje i zbrinjavanje također smanjuje opasnost za zdravlje uzrokovanu emisijama tekućine kroz udahnuti zrak i na koži radnika. Tekućina za obradu metala se ne prelijeva i ne prska oko alatnog stroja što pridonosi manjem onečišćenju radnog mjesta i neposredne okoline. Ekstremno smanjenje količine tekućine rezultira gotovo suhim radnim komadima i strugotinom zbog čega se MQL/MQCL obrada u literaturi često naziva i gotovo suha obrada (engl. *near-dry machining*).

Kriogena obrada podrazumijeva upotrebu ukapljenih plinova umjesto tekućina za obradu metala na osnovi ulja. Tekući dušik (-196 °C) smatra se jednim od najprihvatljivijih rješenja kriogene obrade. Dušik je kemijski inertan plin bez boje, okusa i mirisa. Nadalje, dušik je nezapaljiv i ne

izaziva koroziju. Tekući dušik apsorbira toplinu u zoni rezanja brzim isparavanjem u atmosferu (volumni udio dušika u zraku je 78,1 %) ne ostavljajući nikakve kontaminirane ostatke na obratku, strugotini, alatnom stroju ili radniku. Osnovni nedostatak kriogene obrade je visoka cijena sustava i njegovog održavanja. Izrazito niske temperature ukapljenih plinova predstavljaju potencijalnu opasnost za čovjeka. Prilikom rukovanja i upotrebe može doći do teških smrzotina pa je obvezna upotreba zaštitnih sredstava.

Eksperimentalna istraživanja (*Boswell, 2008., Celent, 2014.*) izdvajaju hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom kao jednu od učinkovitijih tehnika za hlađenje u obradi metala odvajanjem čestica. Odvođenje strugotine je također uspješno. Zrak kao rashladni medij je potpuno prirodan pa je ova tehnika hlađenja najčišća i ekološki najprihvatljivija (*Dixit i sur., 2012.*). Za razliku od tekućina komprimirani zrak lakše prodire do kontaktnih površina alata u zoni rezanja. Glavni je nedostatak nepostojanje funkcije podmazivanja, ali se ona može djelomično nadomjestiti izborom odgovarajućih alata sa samopodmazujućim prevlakama (tipično molibden disulfidna prevlaka).

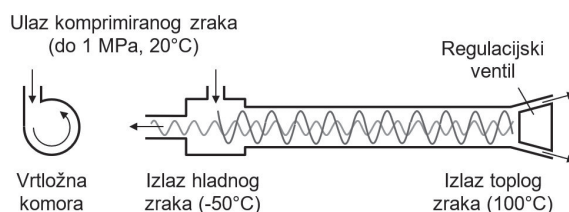
Kod suhe obrade izostaje pozitivan učinak tri osnovne funkcije tekućine za obradu metala: apsorpcija generirane topline, smanjivanje trenja i ispiranje (odvođenje) strugotine. Zamjena za tri navedene funkcije nije jednostavna. Za primjenu suhe obrade potrebno je imati nove materijale reznog alata, nove prevlake, drukčiju tj. prikladnu reznu geometriju i novi koncept alatnog stroja. U ovom trenutku rezni materijali pružaju najbolji temelj za suhu obradu. U tom su pogledu posebno važne prevlake za alate od tvrdih metala jer smanjuju toplinsko opterećenje na osnovni materijal te trenje i adheziju između materijala obratka i alata (samopodmazivanje). Suha obrada je ekološki prihvatljiva i neškodljiva za zdravlje, ali mogućnost njezine primjene bitno ovisi o postupku obrade metala odvajanjem čestica i materijalu obratka (*Klocke, 2011.*).

HLAĐENJE VRTLOŽNOM CIJEVI

Hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom ekološka je alternativa primjeni tekućina za

obradu metala, a najčešće se provodi pomoću vrtložne cijevi. Prvi je zapis o vrtložnoj cijevi zabilježen 12. prosinca 1931. kada je Georges Joseph Ranque podnio zahtjev za francuskim patentom svojeg slučajnog otkrića. Ipak, vrtložna cijev je postala široko poznata tek 1946. kada je njemački fizičar Rudolf Hilsch objavio rad u kojem opisuje unaprijeđene konstrukcijske detalje. Zbog toga se često naziva i Ranque-Hilsch vrtložna cijev.

Vrtložna cijev je jednostavna naprava bez pokretnih dijelova koja komprimirani zrak istovremeno dijeli u dva vrtložna strujanja i to s višom i nižom temperaturom od ulazne. Na slici 2 prikazana je vrtložna cijev protusmjernog protoka. Komprimirani zrak se tangencijalno uvodi u vrtložnu komoru cijevi kroz jednu ili više mlaznica, ubrzava do velike frekvencije vrtnje (i do 10^6 s^{-1}) i usmjerava niz cijev. Zbog centrifugalne sile zrak se prema regulacijskom ventilu na toplom kraju cijevi kreće njezinim obodnim područjem. Regulacijski ventil propušta manji dio vrtložne struje zraka uz samu stijenku cijevi dok se ostatak odbija kroz središnje područje cijevi u suprotnom smjeru. Na svojem putu unutar vrtložna struja zraka predaje toplinu vanjskoj i uz značajan pad temperature izlazi na hladnom kraju cijevi. Hladna struja zraka može dostignuti temperaturu i do -50 °C dok topla struja zraka može postići temperaturu od 100 °C . Postoji i izvedba vrtložne cijevi s istosmjernim protokom obje struje zraka, ali je njezina učinkovitost niža. Fenomen razdiobe protoka zraka u dva temperaturna područja poznat je kao Ranque-Hilsch učinak. Iako postoje brojne numeričke i eksperimentalne analize ovog učinka, još ne postoji jedinstveno fizikalno objašnjenje pojave radijalnog temperaturnog razdvajanja u vrtložnoj cijevi.



Slika 2. Načelo rada vrtložne cijevi protusmjernog protoka (shema)

Figure 2. Working principle of counter-flow vortex tube (scheme)

Visoka primjenjivost vrtložne cijevi temelji se na njezinoj jednostavnosti, niskim investicijskim troškovima, kompaktnosti, maloj masi i izrazito tihom načinu rada. Budući da ne sadrži nikakve pokretne dijelove, vrtložna cijev ne puca niti je podložna trošenju što je čini jednostavnom za održavanje. Osim za hlađenje zone rezanja, vrtložna cijev može se upotrebljavati i za hlađenje visokobrzinskih motorvretena CNC alatnih strojeva (*Kostadin i Cukor, 2015.*). Za njezin je rad potreban samo komprimirani zrak kojeg obično posjeduje svaki proizvodni pogon, pri čemu treba uzeti u obzir da je zbog visokog protoka zraka potreban kompresor velikog kapaciteta (*Ginting i sur., 2016.*).

PRIMJER TROŠKOVNE ANALIZE PRIJELAZA NA ODRŽIVU OBRADU METALA

U nastavku se iznosi primjer troškovne evaluacije obrade martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 kako bi se pokazalo da u usporedbi s konvencionalnom emulzijom hlađenje vrtložnom cijevi nudi ekonomično rješenje na putu prema održivoj obradi. U izračunu troškova, postojanost alata je ključni čimbenik. Stoga su provedeni eksperimenti tokarenja na šipkama promjera 80 mm s dužinom prolaza od 463 mm. Upotrijebljena je CNC tokarilica TU 360 Prvomajska, SECO TP 2501 tvrdometalne rezne pločice ISO oznake DNMG 150608-MF-4 i držač pločica SECO PDNJL 2525M15. Postojanost alata procijenjena je prema normi ISO 3685 i kriteriju istrošenosti stražnje površine alata 0,5 mm. Trošenje alata mjereno je digitalnim mikroskopom Dino Lite Pro (povećanje 230x). Za mokru obradu korištena je 5 %-tna emulzija (koncentrat INA BU 7) s protokom od 4,8 litara u minuti. Hlađenje ohlađenim

zrakom izvedeno je primjenom protusmjernje vrtložne cijevi Nex Flow™ Frigid-X Cooler System c/w 57025AD s protokom zraka od 708 litara u minuti i ulaznim tlakom zraka od 0,69 MPa.

Struktura jediničnog proizvodnog troška prikazana je u Tablici 1. Navedeni parcijalni troškovi uključeni u jedinični proizvodni trošak vrijede za tokarenje s brzinom rezanja 220 m/minuta, posmakom 0,2 mm i dubinom rezanja 0,4 mm. U obzir je uzeto 1968 sati rada godišnje.

Trošak pomoćnih poslova (uzimanje, stezanje, otpuštanje i otpremanje radnog komada) proporcionalan je pomoćnom vremenu obrade dok je trošak obrade proporcionalan glavnom vremenu obrade. Trošak nabave alata odgovara nabavnoj cijeni rezne pločice i držača svedenoj na jednu rezu oštricu i raspodijeljenoj na broj obrađenih komada do postizanja kriterija istrošenosti rezne oštrice. Trošak zamjene rezne oštrice proporcionalan je komadnom alatnom vremenu tj. vremenu zamjene rezne oštrice raspodijeljenom na broj obrađenih komada do postizanja kriterija istrošenosti rezne pločice. Gledano s aspekta jednog alatnog stroja osnovni se trošak upotrebe rashladnog medija računa zbrajanjem troškova nabave, distribucije i zbrinjavanja, a proporcionalan je glavnom vremenu obrade. Trošak distribucije odnosi se na trošak energije pumpe ili kompresora odgovornih za cirkuliranje rashladnog medija. Općenito je kod emulzije cijena zbrinjavanja veća ili jednaka nabavnoj cijeni. Dodatni troškovi upotrebe emulzije odnose se na čišćenja radnog komada od emulzije i čišćenja strugotine odmašćivanjem u svrhu pohrane ostataka emulzije i pripreme strugotine za prikupljanje i recikliranje. Trošak energije alatnog stroja računa se zbrajanjem troška energije u stanju pripravnosti (zamjena radnog komada i rezne oštrice) i troška energije potrebne za obradu.

Tablica 1. Struktura jediničnog proizvodnog troška**Table 1. Structure of unit production cost**

Kategorija	Emulzija	Vrtložna cijev
Postojanost alata, minuta/oštrica	1,64	2,00
Pomoćno vrijeme obrade, minuta/komad	4,60	4,60
Glavno vrijeme obrade, minuta/komad	2,67	2,67
Komadno alatno vrijeme, minuta/komad	0,81	0,67
Broj obrađenih komada po reznoj oštrici, komad/oštrica	0,61	0,75
Trošak materijala, kuna/komad	487,78	487,78
Trošak pomoćnih poslova, kuna/komad	22,28	22,28
Trošak obrade, kuna/komad	12,94	12,94
Trošak alata, kuna/komad	38,83	31,83
Trošak rashladnog medija, kuna/komad	0,71	0,14
Trošak energije alatnog stroja, kuna/komad	0,053	0,052
Jedinični proizvodni trošak, kuna/komad	562,59	555,02

Tablica 1 pokazuje da se u promatranim uvjetima obrade upotrebom hlađenja vrtložnom cijevi postiže 7,57 kuna manji jedinični proizvodni trošak u usporedbi s mokrom obradom. Također je vidljivo da postojanost alata i rashladni medij najviše utječu na jedinični proizvodni trošak.

S obzirom na postojanost alata, jedinični proizvodni trošak nije koreliran samo s glavnim vremenom obrade, već i s vremenom zamjene istrošene rezne oštrice. Za ispitivane parametre rezanja vrijeme zamjene rezne oštrice ima veći doprinos jediničnom proizvodnom trošku u mokroj obradi. Stvarno vrijeme mijenjanja rezne oštrice nije veće, ali je broj promjena veći zbog bržeg trošenja rezne pločice u mokroj obradi. Analogno tome, kod mokre obrade veći je i trošak alata.

Kako bi se utvrdio doprinos rashladnog medija jediničnom proizvodnom trošku, formirana je Tablica 2. Iz perspektive zaštite okoliša i zdravlja radnika poželjno je potpuno uklanjanje tekućina za obradu metala na osnovi ulja. Također, poželjna je i ekonomska korist. Za promatrani alatni stroj godišnja potrošnja emulzije iznosi 800 litara. Prevedeno samo u troškove nabave i zbrinjavanja to je ekvivalentno iznosu od 4.019,26 kuna na godišnjoj razini. S druge strane, jednokratni investicijski trošak u hlađenje ohlađenim zrakom iznosi 4.767,31 kuna (vrtložna cijev 3.648,41 kuna; regulator tlaka, filter, manometar i crijevo 1.118,90 kuna; pogon već posjeduje kompresor za zrak). Dakle, povrat investicije je moguć već

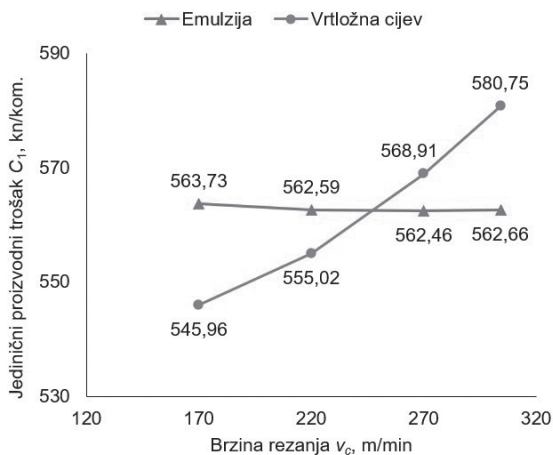
nakon samo 14 mjeseci. Ovdje treba ukazati na 5,75 puta veći trošak distribucije rashladnog medija u slučaju primjene vrtložne cijevi u odnosu na mokru obradu, ali je u konačnici hlađenje vrtložnom cijevi ipak isplativije.

Tablica 2. Struktura troškova primjene rashladnog medija**Table 2. Structure of cooling medium application cost**

Kategorija	Emulzija	Vrtložna cijev
Trošak nabave, kuna/komad	0,05	0,025
Trošak distribucije, kuna/komad	0,02 (pumpa)	0,115 (kompresor)
Trošak zbrinjavanja, kuna/komad	0,05	0,00
Trošak čišćenja radnog komada, kuna/komad	0,48	0,00
Trošak čišćenja strugotine, kuna/komad	0,11	0,00
Trošak rashladnog medija, kuna/komad	0,71	0,14

Jedinični proizvodni trošak može se odrediti za različite brzine rezanja kao što je prikazano na slici 3. Može se uočiti da je hlađenje vrtložnom cijevi isplativije od brzine rezanja 248,64 m/minuta. To znači da nakon ove brzine rezanja hlađenje vrtložnom cijevi više ne može osigurati bolju postojanost alata u usporedbi s emulzijom odnosno da dolazi do ubrzanog trošenja alata i u konačnici njegovog otkazivanja. S druge strane, optimalna brzina rezanja kod mokre obrade je 270 m/minuta. Ovo je pokazatelj da u proma-

tranom rasponu brzina rezanja kod primjene hlađenja vrtložnom cijevi treba koristiti kvalitetniji materijal reznih pločica u usporedbi s mokrom obradom.



Slika 3. Ovisnost jediničnog proizvodnog troška o brzini rezanja

Figure 3. Dependency of unit production cost on cutting speed

Dodatna ocjena obrade martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 koja nije ovdje prikazana podatkovno dokazala je da hlađenje vrtložnom cijevi smanjuje hrapavost obrađene površine u usporedbi s mokrom obradom (Kostadin i sur., 2017.).

ZAKLJUČAK

U prvom dijelu ovog rada razmotreni su izazovi u proizvodnji s obzirom na ekološke, zdravstvene i ekonomske aspekte primjene tekućina za obradu metala. U tom smislu, hlađenje ohlađenim komprimiranim zrakom koje se provodi pomoću vrtložne cijevi je predstavljeno kao izvediva i održiva alternativna tehnika hlađenja u usporedbi s mokrom obradom. Zrak kao rashladni medij je potpuno prirodan pa prijelaz s tekućina za obradu metala na osnovi ulja na ohlađeni komprimirani zrak predstavlja korak prema održivoj obradi, što rezultira značajnim smanjenjem ekološkog opterećenja i ugrožavanja zdravlja ljudi.

U drugom dijelu rada prikazan je primjer troškovne evaluacije obrade martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13. Hlađenje vrtložnom cijevi

ocijenjeno je u smislu jediničnog proizvodnog troška, pokrivajući sve mjere održivosti. Pokazano je da uklanjanje emulzije za obradu metala, smanjenje troškova povezanih s otpadom i veća postojanost alata smanjuju jedinični proizvodni trošak u odnosu na mokru obradu. To potvrđuje da osim ekoloških i zdravstvenih koristi hlađenje vrtložnom cijevi može očigledno ponuditi i značajnu ekonomsku korist.

LITERATURA

Boswell, B.: *Use of air-cooling and its effectiveness in dry machining processes*, PhD Thesis, Curtin University, Australia, 2008.

Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A.G., Herrmann, C.: *Metalworking fluids – Mechanisms and performance*, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 64, 2015., 2, 605-628.

Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B.: *Advancing cutting technology*, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 52, 2003., 2, 483-507.

Celent, L.: *Implementacija hlađenja komprimiranim hladnim zrakom korištenjem vrtložne cijevi u postupku glodanja*, doktorski rad, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split, 2014.

Direktiva 2008/98/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 19. studenoga 2008. o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva, dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&rid=1>, pristupljeno: 20.11.2018.

Dixit, U.S., Sarma, D.K., Davim, J.P.: *Environmentally friendly machining*, Springer, New York, USA, 2012.

Ekinović, S., Prčanović, H., Begović, E.: *Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3*, *Procedia Engineering*, 132, 2015., 608-614.

Ezugwu, E.O.: *Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 2005., 12-13, 1353-1367.

Ginting, Y.R., Boswell, B., Biswas, W.K., Islam, M.N.: Environmental Generation of Cold Air for Machining, *Procedia CIRP*, 40, 2016., 648-652.

Hong, S.Y., Zhao, Z.: Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1, 1999., 2, 107-116.

Klocke, F.: *Manufacturing Processes 1 – Cutting*, Translated by Aaron Kuchle, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011.

Kostadin, T., Cukor, G.: An overview of the development and use of coolant and lubricant systems in machining. U: *Zbornik radova CIM 2015*, Hrvatska udruga proizvodnog strojarstva, Zagreb, 153-160, 2015.

Kostadin, T., Cukor, G., Jakovljević, S.: Analysis of corrosion resistance when turning martensitic stainless steel X20Cr13 under chilled air-cooling, *Advances in Production Engineering & Management*, 12, 2017., 2, 105-114.

Liao, Y. S., Lin, H. M.; Chen, Y. C.: Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 2007., 11, 1667-1676.

Mortier, R.M., Fox, M.F., Orszulik, S.T.: *Chemistry and Technology of Lubricants (3rd Edition)*,

Springer Science+Business Media B.V., 2010., 435-457.

NIOSH, dostupno na: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/skin/occderm-slides/occderm9.html>, pristupljeno: 20.11.2018.

Pavić, A.: *Tehnologija – Obrada odvajanjem čestica*, udžbenik, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.

Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., Kopac, J.: Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies, *Journal of Cleaner Production*, 18, 2010., 12, 1211-1221.

Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wakabayashi T.: Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 53, 2004., 2, 511-537.

2000/532/EZ: Odluka Komisije od 3. svibnja 2000. koja zamjenjuje Odluku 94/3/EZ o popisu otpada u skladu s člankom 1. točkom (a) Direktive Vijeća 75/442/EEZ o otpadu i Odluku Vijeća 94/904/EZ o utvrđivanju popisa opasnog otpada u skladu s člankom 1. stavkom 4. Direktive Vijeća 91/689/EEZ o opasnom otpadu (priopćena pod brojem dokumenta C(2000) 1147), dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000D0532&rid=9>, pristupljeno: 20.11.2018.

APPLICATION OF ECOLOGICAL PRINCIPLES IN MACHINING

SUMMARY: Most metalworking fluids used for cooling and lubrication in various machining processes are formulated from mineral oils separated from crude oil. Disposal of waste fluids opens numerous ecological issues, especially considering that it is one of the most complex and hazardous waste types. Developing environmental awareness while at the same time adopting new, stricter legal regulations for the protection of natural assets as well as developing health and safety management systems for people at work are increasingly directing the manufacturing industry towards the development and implementation of alternative cooling and lubrication techniques in machining and ultimately dry machining. Thus, today it is already talking about specially adapted machining or manufacturing using the terms “environmentally friendly machining”, “sustainable manufacturing”, “green manufacturing” and the like. In this paper, the possibilities and advantages of using alternative cooling and lubrication techniques, especially cooling with a vortex tube, are explored. In addition, the machining evaluation was covered by an experimental study in order to understand the likely effects of the use of cooling with the vortex tube on the production costs. The case study concerns the machining of martensitic stainless steel. It is shown that tool costs represent a major contribution to the total production cost and that in comparison with the metalworking emulsion the cooling with the vortex tube offers an economical solution on the route to sustainable machining.

Key words: *sustainable machining, ecology, safety at work*

Original scientific paper

Received: 2018-12-04

Accepted: 2019-02-04