

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ STROJARSTVA

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**Numeričko modeliranje procesa obrade
odvajanjem čestica uz primjenu
alternativnih tehnika hlađenja**

Mario Dragičević

Split, lipnja 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE.....	3
2.1. <i>Vrste i primjena sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje.....</i>	<i>5</i>
2.2. <i>Utjecaj sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje na održivost strojne obrade</i>	<i>7</i>
3. SUHA STROJNA OBRADA	9
4. ALTERNATIVNE TEHNIKE ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE	17
4.1. <i>Kriogeno hlađenje.....</i>	<i>18</i>
4.2. <i>Hlađenje komprimiranim hladnim zrakom</i>	<i>19</i>
4.3. <i>Primjena minimalnih količina sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje</i>	<i>22</i>
4.4. <i>Primjena minimalnih količina ulja u kombinaciji sa hladnim komprimiranim zrakom</i>	<i>25</i>
5. NUMERIČKO MODELIRANJE U OBRADI ODVAJANJEM ČESTICA	28
5.1. <i>Metoda konačnih elemenata</i>	<i>28</i>
5.2. <i>Primjena softvera temeljenih na metodi konačnih elemenata.....</i>	<i>29</i>
5.3. <i>Formulacija modela definiranjem graničnih uvjeta simulacije</i>	<i>33</i>
5.3.1. <i>Eulerova formulacija modela</i>	<i>34</i>
5.3.2. <i>Lagrangeova formulacija modela.....</i>	<i>35</i>
5.3.3. <i>Proizvoljna Lagrange-Eulerova formulacija</i>	<i>36</i>
5.4. <i>Adaptivnost i generiranje mreže</i>	<i>38</i>
5.5. <i>Kriterij nastajanja odvojene čestice.....</i>	<i>40</i>
6. DEFINIRANJE NUMERIČKOG MODELA PROCESA OBRAD E ODVAJANJEM ČESTICA	43
7. BUDUĆA ISTRAŽIVANJA	52
8. ZAKLJUČAK.....	53
LITERATURA	54
SAŽETAK.....	72

1. UVOD

Osnovni cilj proizvodne industrije je dobiti proizvod visoke kvalitete u što kraćem vremenskom roku i uz minimalne troškove proizvodnje. Proizvodna industrija se prilagođava zahtjevima tržišta koji podrazumijevaju svakodnevno poboljšanje proizvodnih procesa i primjenu novih tehnologija. Posljedica pojačanja tržišne konkurencije je povećanje udjela maloserijske i pojedinačne proizvodnje te brzo zastarijevanje novih proizvoda na tržištu. Stoga je neophodno pronaći učinkovito rješenje koje značajno minimizira ukupne troškove proizvodnje, a istovremeno maksimizira postavljene kriterije vezane uz kvalitetu gotovog proizvoda.

Jedan od najčešće korištenih postupaka obrade metala u proizvodnoj industriji jest postupak obrade odvajanjem čestica. Ulazni parametri procesa obrade odvajanjem čestica pored vrste materijala i geometrije obratka i reznog alata, su: brzina rezanja v_c , posmak f i dubina rezanja a_p . Pored ulaznih parametara obrade veliki doprinos kvaliteti proizvoda i produljenju vijeka alata u obradi odvajanjem čestica imaju sredstva za hlađenje ispiranje i podmazivanje-SHIP (engl. Cutting Fluids-CFs). Pogoršanje kvalitete obrađene površine najčešće je uzrokovano različitim mehanizmima trošenja alata koji se pri velikim temperaturama javljaju u zoni rezanja. Iako je obrada odvajanjem čestica detaljno istraživana još od 1900-te godine, izbor parametara obrade, materijala alata, geometrije alata i SHIP-a još uvijek je zasnovan na iskustvu operatera ili preporukama proizvođača. U posljednjih nekoliko godina primjena SHIP-a u proizvodnoj industriji stvara ozbiljne zdravstvene, ekološke i ekonomske probleme [1]. Kako bi se smanjili negativni utjecaji te poštivali zakoni i propisi o zaštiti okoliša proizvodna industrija je primorana smanjiti primjenu SHIP-a te se usmjeriti prema alternativnom i održivom načinu proizvodnje. Težište proizvodne industrije u posljednjih nekoliko godina usmjereno je prema suhoj strojnoj obradi i alternativnim tehnikama za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Suha strojna obrada nalazi se u središtu istraživanja zbog povećanih zahtjeva vezanih uz kvalitetu proizvoda. Temperatura nastala u zoni rezanja utječe na izlazne veličine procesa obrade kao što su trošenje alata, hrapavost obrađene površine, sile rezanja i druge veličine. Primjenom SHIP-a nastoje se smanjiti negativni utjecaji generirane topline u zoni rezanja, a što u konačnici pozitivno utječe na vijek alata i kvalitetu obrađene površine.

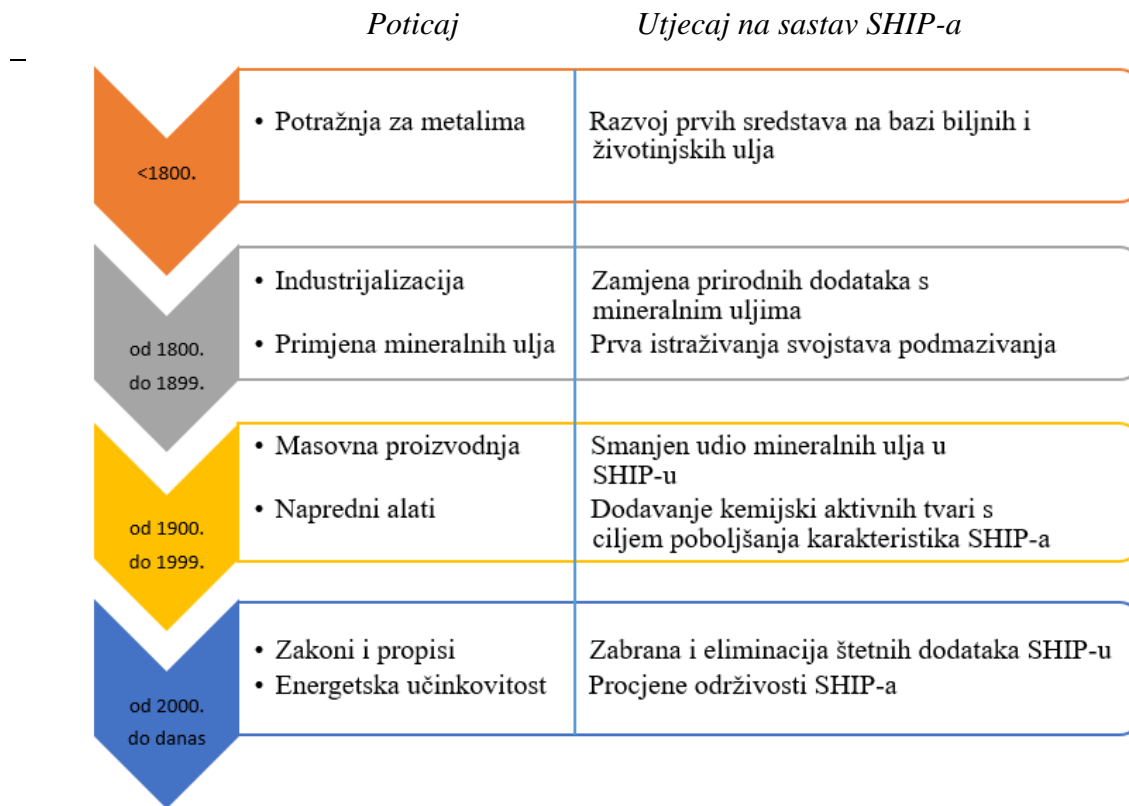
Odabrani parametri obrade često nisu optimalni, a maloserijska proizvodnja s ekonomskog gledišta ne opravdava eksperimentalna ispitivanja s ciljem povećanja učinkovitosti procesa

obrade. Eksperimentalna istraživanja značajno utječu na ekonomsku održivost proizvodnje jer su dugotrajna i skupa, a pored toga pojedina ograničenja analitičkih metoda predstavljaju veliki izazov za modeliranje složenih procesa obrade odvajanjem čestica [2]. Slijedom navedenog opravdana je potreba razvoja učinkovitije strategije s ciljem smanjenja obima i složenosti izvođenja eksperimenata. Stoga alternativni pristup predstavlja numeričko modeliranje i simuliranje primjenom metode konačnih elemenata-MKE (engl. Finite Element Method-FEM) [3]. Razvojem naprednih softverskih rješenja omogućuje se numeričko modeliranje i simuliranje proizvodnih procesa, a što je posebno bitno za procese obrade odvajanjem čestica [4], [5], [6]. MKE postaje nezamjenjiv alat s ciljem predviđanja izlaznih veličina oblika odvojene čestice, sila rezanja, temperatura, trošenja alata, toplinske deformacije alata i obratka te potrošnje energije u obradi odvajanjem čestica [7].

Različite alternativne tehnike za hlađenje, ispiranje i podmazivanje poput minimalne količine za podmazivanje (engl. Minimum Quantity Lubrication-MQL), hlađenja komprimiranim hladnim zrakom, u kombinaciji s novim materijalima za izradu alata i alatnim prevlakama mogu pomoći u izgradnji održive strategije. Primjena numeričkog modeliranja temeljena na MKE omogućuje predviđanje izlaznih karakteristika procesa obrade odvajanjem čestica. Prethodno navedeno značajno utječe na poboljšanje strojne obrade u pogledu sva tri segmenta održivosti ekološkog, sociološkog i ekonomskog.

2. SREDSTVA ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE

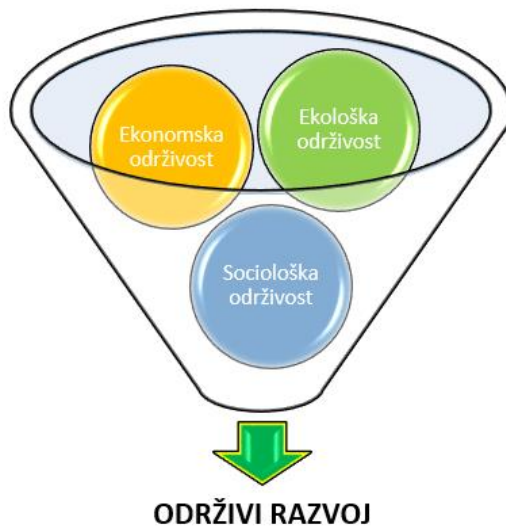
Sredstva za hlađenje ispiranje i podmazivanje su uvedena u proizvodnu industriju s ciljem poboljšanja karakteristika triboloških procesa koji su prisutni na dodirnim površinama između alata i obratka tijekom procesa obrade odvajanjem čestica. Prva istraživanja SHIP-a u obradi metala počela su sredinom 18. stoljeća, a usmjerena su na proučavanje njihovog utjecaja na smanjenje trenja i odvođenja topline iz zone rezanja [8]. Avionska i automobilska industrija bili su pokretači razvoja SHIP-a u proizvodnoj industriji s naglaskom na veću razinu produktivnosti u masovnoj proizvodnji [9]. Povijesni razvoj SHIP-a Byers je detaljno prikazao u svojoj knjizi *Metalworking fluids*, a koji je kronološki prikazan na slici 1 [10].



Slika 1. Kronološki razvoj SHIP-a [8]

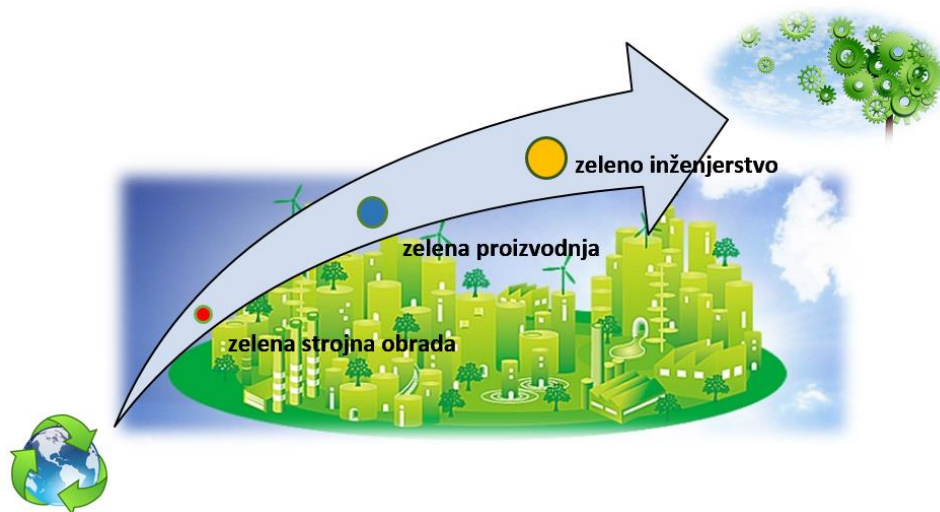
Iako primjena SHIP-a u proizvodnoj industriji doprinosi značajnim poboljšanjima zahtjeva tržišta u pogledu kvalitete gotovog proizvoda, njihova prisutnost i primjena u obradi odvajanjem čestica sa sobom nosi značajne rizike. U današnjoj proizvodnoj industriji velika pažnja je posvećena negativnim utjecajima SHIP-a i održivosti strojne obrade. Uravnoteženje sociološkog, zdravstvenog i ekonomskog segmenta proizvodnje podrazumijeva prilagođenu i održivu strojnu

obradu. Drugim riječima održiva strojna obrada predstavlja uravnotežen sustav između ekološke i sociološke prihvatljivosti te ekonomske učinkovitosti u procesima obrade odvajanjem čestica, slika 2.



Slika 2. Model održivog razvoja

Implementiranje održivog razvoja u obradi odvajanjem čestica podrazumijeva promjene u vrsti i količini korištenih resursa, te pravilno odlaganje i zbrinjavanje otpada [11]. Stoga, nazivi zelena strojna obrada (engl. Green Machining), ekološki prihvatljiva strojna obrada (engl. Environmentally Friendly Machining) i zelena proizvodnja (engl. Green Manufacturing) postaju sinonimi za provođenje strategije održivog razvoja u proizvodnoj industriji, slika 3 [12].



Slika 3. Ekološki održiva i prihvatljiva proizvodnja

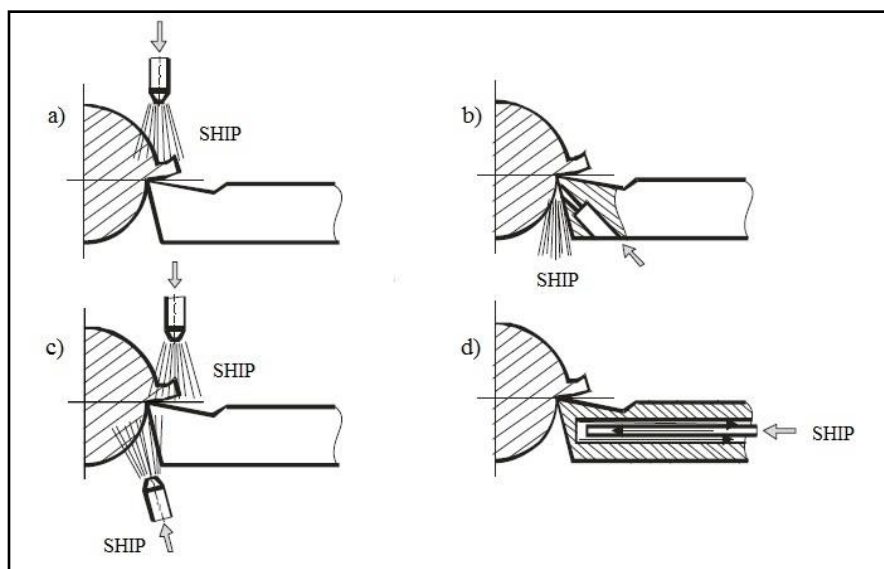
Zbog smanjenja negativnih utjecaja i provedbe zakona o zaštiti okoliša, industrija je prisiljena smanjiti primjenu konvencionalnog SHIP-a. Poseban naglasak se stavlja na održivost strojne obrade primjenom alternativnih vrsta SHIP-a, s ciljem smanjenja ukupnih troškova proizvodnje.

2.1. Vrste i primjena sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje

Do početka 19. stoljeća kao sredstvo za hlađenje u obradi odvajanjem čestica primjenjivana je samo voda. Taylor je potvrdio da se primjenom velike količine vode, brzina rezanja kod obrade čeličnih legura može povećati i za 30 % do 40 % [13]. Sredinom 19. stoljeća mineralna ulja su se široko primjenjivala kao SHIP. Northcott 1868. potvrđuje da se uporabom mineralnih ulja može znatno povećati brzina rezanja i trajnost alata, a smanjiti ukupna potrošnja energije tijekom obrade [14]. Na ovaj način su osigurane temeljne funkcije primjene tekućina u obradi odvajanjem čestica, smanjenje generirane topline u zoni rezanja i podmazivanje u svrhu smanjenja trenja na dodirnim površinama između alata i obratka. Pored osnovnih, postoji niz ne manje važnih funkcija SHIP-a kao što su odvođenje odvojene čestice, čišćenje alata i obratka, kvalitetnija završna obrada, produljenje vijeka alata, a što na poslijetku dovodi do povećanja produktivnosti strojne obrade. U postupcima obrade odvajanjem čestica najčešće se koriste četiri vrste SHIP-a:

- 1) Ulja koja se koriste kada je potrebno podmazivanje u procesu obrade jer su im svojstva odvođenja topline veoma mala. Mogu biti biljna, životinjska, mineralna, sintetička te njihove mješavine.
- 2) Uljne emulzije čiji je osnovni sastav ulje u kombinaciji s vodom ili različitim emulgatorima.
- 3) Polusintetici koji predstavljaju mješavinu vodene otopine u kombinaciji s aditivima i mineralnim uljima.
- 4) Sintetici koji se sastoje od vodene otopine u kombinaciji s kemijskim aditivima, a u sebi ne sadrže udio uljnih rastvora.

Pored osnovnih vrsta SHIP-a postoje različiti dodaci koji služe kao elementi poboljšanja hlađenja ili podmazivanja. Aditivi koji se koriste za poboljšavanje funkcionalnih svojstava osnovne supstance SHIP-a su različiti emulgatori, stabilizirajući agensi, aditivi za ekstremne tlakove, agensi protiv pjenušanja, inhibitori korozije, mikrobiocidi i drugi [15]. Nakon izbora vrste SHIP-a potrebno je odrediti i način nanošenja u zonu rezanja, a što značajno utječe na učinkovitost samog SHIP-a. Načini nanošenja SHIP-a u zonu rezanja prikazani su na slici 4.



Slika 4. Princip hlađenja alata i obratka pomoću SHIP-a [14]

- a) Prskanjem preko odvojene čestice b) Kroz rezni alat pod tlakom c) U pravcu prednje i stražnje površine alata d) Unutarnje kroz alat

Postoje četiri metode primjene SHIP-a u obradi odvajanjem čestica i to:

- 1) Prskanje slobodnim mlazom je najčešće korištena metoda primjene SHIP-a u obradi odvajanjem čestica. Količina isporučenog SHIP-a je od 10 L/min kod tokarenja s jednom reznom oštricom pa do 22 L/min kod glodanja alatima s više reznih oštrica. Tlakovi koji se koriste su od 7 bara do 140 bara.
- 2) Maglica podrazumijeva isporuku SHIP-a pod niskim tlakom, a omogućuje bolju vidljivost obratka tijekom obrade i isporuku medija u nepristupačna područja, SHIP je baziran na vodenim otopinama kao emulzije, sintetici i polusintetici. Isporuka SHIP-a osigurava se uz tlak od 0,6 bara do 6 bara. Hlađenje maglicom je manje učinkovito u odnosu na hlađenje prskanjem, te istovremeno postoji opasnost za zdravlje operatera zbog sitnih čestica SHIP-a koje isparavaju u radni prostor.
- 3) Visokotlačni sustavi isporučuju SHIP pri tlaku od 55 bara do 350 bara pomoću posebno projektiranih mlaznica. Zbog udarne moći u zoni rezanja SHIP uspješno lomi i odstranjuje odvojenu česticu.
- 4) Isporuka SHIP-a kroz alat pomoću posebno projektiranih sustava. Osnovni nedostaci ove metode su veliki troškovi ulaganja u sustav i posebna izvedba alata s mogućnošću provođenja SHIP-a kroz prihvatni i rezni dio [15], [16].

2.2. Utjecaj sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje na održivost strojne obrade

Moderna proizvodna strategija kao što je zelena proizvodnja uzima u obzir sve probleme proizvodne industrije, a krajnji cilj je smanjiti negativne utjecaje tijekom životnog ciklusa proizvoda [12]. U tradicionalnoj primjeni SHIP-a odvojena čestica je mokra (voda + ulje + aditivi) i većina kemijskih aditiva koji se nalaze u SHIP-u su opasni za okoliš i zdravlje čovjeka. Procjenjuje se da na godišnjoj razini Sjedinjene Američke Države-SAD koriste oko 100 milijuna galona SHIP-a, dok je trenutna potrošnja u svijetu oko 640 milijuna galona. Od toga se 52 % koristi u obradi odvajanjem čestica, a 31 % u postupcima deformiranja [17]. Rabie i ostali [18] iznose podatak da Europska unija-EU ima potrošnju od oko 320 000 tona SHIP-a godišnje od čega je 2/3 potrebno pravilno zbrinuti. Ostatak od 1/3 korištenog SHIP-a se odnosi na gubitke unutar proizvodnog sustava poput nekontroliranog istjecanja i isparavanja, zaostalih količina na obratku, alatu i odvojenoj čestici. Navedenim načinima se oko 30 % godišnje količine SHIP-a iznosi izvan proizvodnog sustava [19]. U ranim 1960-im, istraživači su počeli izražavati zabrinutost zbog utjecaja SHIP-a na okoliš i zdravlje radnika. Američki nacionalni institut za zdravlje i zaštitu na radu-NIOSH (engl. The National Institute for Occupational Safety and Health) osigurava namjenska sredstva potrebna za istraživanja kako bi se spriječio društveni trošak povezan sa smrtnim slučajevima, ozljedama i bolestima pri radu. NIOSH procjenjuje da je preko 1,2 milijuna radnika potencijalno izloženo opasnim i štetnim utjecajima SHIP-a [20]. Oko 85 % korištenih SHIP-a diljem svijeta su sredstva na bazi mineralnih ulja. Ogromne količine mineralnih ulja stvorile su brojne negativne učinke na okoliš poput onečišćenja voda i tla te zagađenja zraka [21]. Zbog toga SHIP na bazi mineralnih ulja zahtijevaju posebnu fizičku i kemijsku obradu prije odlaganja i zbrinjavanja [22]. U ranim 1990. započela su globalna istraživanja o primjeni tehnologija za smanjenje proizvodnih troškova povezanih s konvencionalnom primjenom SHIP-a [23]. Troškovi za nabavku, primjenu i zbrinjavanje SHIP-a su dva puta veća od troškova same obrade i mogu predstavljati između 7 % i 17 % od ukupnih troškova proizvodnje [24]. Tijekom obrade teško obradivih materijala ti troškovi mogu dosegnuti i od 20 % do 30 % od ukupnih troškova proizvodnje [25]. Skladištenje i zbrinjavanje korištenog SHIP-a postavlja mnoga pitanja vezana za zaštitu okoliša jer je to jedan od najsloženijih i najopasnijih vrsta otpada u prirodi. Velike količine nepravilno zbrinutog SHIP-a na području zapadne Europe prisilili su EU da 2006. donese propis pod nazivom-REACH (engl. Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals) [26]. Ovaj propis kao novi pravni okvir EU za kemikalije obuhvaća sve vrste SHIP-a

u svim fazama primjene, od proizvodnje i korištenja do konačnog odlaganja. Zbog smanjenja negativnih utjecaja i provedbe zakona o zaštiti okoliša i radnika, proizvodna industrija nastoji smanjiti primjenu konvencionalnog SHIP-a i usmjeriti se prema alternativnom i održivom načinu proizvodnje. Različite alternativne vrste za hlađenje, ispiranje i podmazivanje mogu pomoći u izgradnji strategije zelene proizvodnje, smanjujući pri tome troškove povezane s primjenom SHIP-a, promovirajući zadovoljstvo među radnicima i gradeći pozitivan imidž poduzeća.

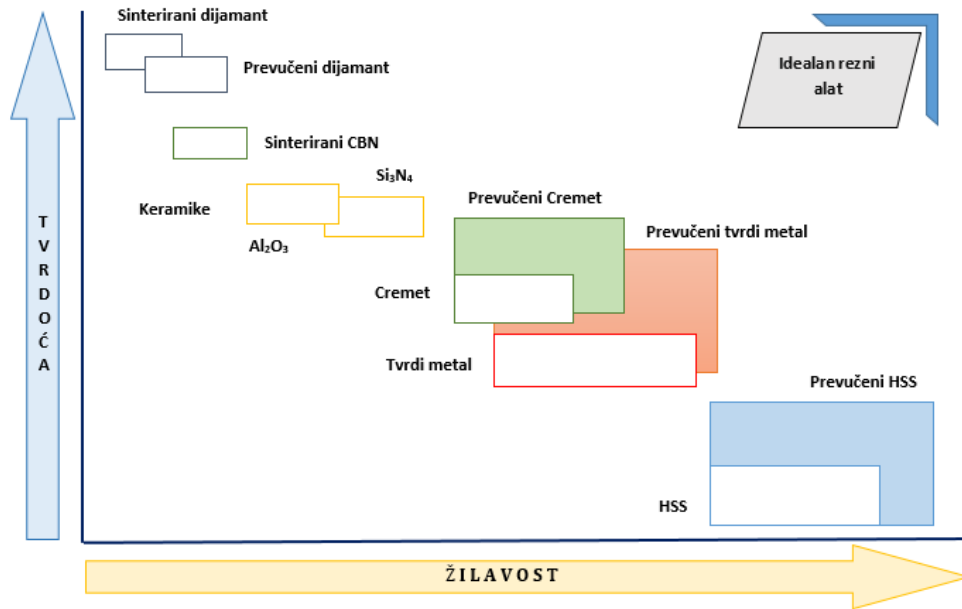
3. SUHA STROJNA OBRADA

Suha strojna obrada se primjenjuje u mnogim procesima obrade odvajanjem čestica [12]. Osnovne prednosti suhe strojne obrade su:

- ekološki je prihvatljivija jer ne dolazi do onečišćenja zraka i vode,
- smanjuje se utjecaj na alergijske pojave i zdravlje čovjeka,
- izostavljeni su dodatni troškovi za aditive čime se smanjuju ukupni troškovi proizvodnje,
- smanjuju se troškovi nabave i održavanja SHIP-a,
- izostavljeno dodatno odlaganje SHIP-a nakon upotrebe [27], [28].

Ukoliko bi se u potpunosti zanemarile pozitivne funkcije SHIP-a u strojnoj obradi na dodirnim površinama između alata i obratka pojavilo bi se trenje koje bi izazvalo neprihvatljive vrijednosti temperatura rezanja. Istovremeno uklanjanje odvojene čestice nije moguće, a rezni alat izložen različitim mehanizmima trošenja utjecao bi na kvalitetu obrađene površine. Stoga su uvjeti primjene suhe strojne obrade planirani tako da upotpune zadatke koje ispunjava SHIP, a da ne uzrokuju štetu ili da je smanje na najmanju moguću mjeru u pogledu ekonomske učinkovitosti i kvalitete proizvoda [29]. Tijekom suhe strojne obrade alat je izložen velikim mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koje direktno utječu na povećano trošenje alata. Materijali od kojih se izrađuju alati za strojnu obradu moraju ispunjavati uvjete visoke tvrdoće, velike čvrstoće i kemijske stabilnosti. Alati za suhu strojnu obradu trebaju biti posebno projektirani kako bi omogućili visoku toplinsku otpornost i minimalno trenje u zoni dodira alata i obratka, odnosno alata i odvojene čestice. Pravilnim izborom materijala i geometrije alata i predmeta obrade postiže se veća učinkovitost suhe strojne obrade. Na taj način bi se povećanjem brzina rezanja utjecalo i na smanjenje topline koja se zadržava na obratku [30]. Materijali za izradu reznih alata mogu biti brzorezni čelici (engl. High Speed Steels-HSS), prevučeni tvrdi metali poput tvrdih metala na bazi titana. Najčešće korišteni prevučeni tvrdi metali na bazi titana su: titan nitrid (engl. Titanium Nitride-TiN), titan ugljik nitrid (engl. Titanium Carbo Nitride-TiCN), titan aluminij nitrid (engl. Titanium Aluminium Nitride-TiAlN), aluminij titan nitrid (engl. Aluminium Titanium Nitride-ALTiN). Također, često se primjenjuju i keramike na bazi aluminijevog oksida (engl. Aluminium Oxide- Al_2O_3) i na bazi silicijevog nitrida (engl. Silicon Nitride- Si_3N_4), izrazito tvrdi materijali kao što je kubični borov nitrid (engl. Cubic Boron Nitride-CBN), polikristalni dijamant (engl.

Polycrystalline Diamond-PCD) ili njihova kombinacija polikristalni kubični borov nitrid (engl. Polycrystalline Cubic Boron Nitride-PCBN). Mehanička svojstva materijala za izradu alata prikazani su na slici 5.



Slika 5. Mehanička svojstva različitih materijala reznih alata [31]

Prilikom izbora materijala za izradu alata treba obratiti pozornost na njihova mehanička svojstva i reakciju na visokim temperaturama. Materijal za izradu alata koji bi imao visoku tvrdoću i kemijsku stabilnost pri visokim temperaturama bio bi idealno rješenje za uvjete suhe strojne obrade.

U proizvodnji reznih alata vidljiv je napredak na području razvoja prevlaka, gdje se svojstva reznih alata poboljšavaju postupcima modificiranja i prevlačenja osnovnog materijala. Površinski slojevi prevlaka se razlikuju od osnovnog materijala u kemijskom sastavu, mikrostrukturi i drugim fizikalno-kemijskim svojstvima [32]. Površinski sloj nastao modificiranjem podrazumijeva sloj nastao od osnovne površine prema unutrašnjosti metala, dok se kod postupaka prevlačenja površinski sloj stvara na osnovnoj površini. Prevlake kao sastavni dio reznog alata razdvajaju alat od obratka formirajući zaštitni sloj pri čemu im je osnovna funkcija nadomjestiti pojedine funkcije SHIP-a [33]. Karakteristike materijala za izradu alata zajedno s njihovim prevlakama određuju kvalitetu gotovog proizvoda u procesu strojne obrade. Materijali za izradu alata su:

a) Tvrdi metali koji se dobiju sinteriranjem na visokim tlakovima i temperaturama, korištenjem tvrdih metala kao osnove i tvrdih metala kao veziva. Jedan od najčešće upotrebljivanih materijala

je volframom tvrdi metal (engl. Tungsten carbide-WC) koji se dobije sinteriranjem praškastog WC i praškastog kobalta (engl. Cobalt-Co). Na svojstva materijala najviše utječu veličine čestica volframovog tvrdog metala i omjer Co i WC. Što je manji udio Co to je veličina zrna veća pa materijal pruža veću otpornost trošenju. Sastav u kojem su WC čestice velike i gdje je visok postotak Co omogućuje visoku otpornost na nagle temperaturne promjene i visoku žilavost. Novija dostignuća pokazuju da se tvrdoća materijala povećava uporabom mikronskih (od 0,5 μm do 0,8 μm) i ultrafinih (od 0,2 μm do 0,5 μm) veličina WC zrnastih legura [30].

b) Cermeti se po čvrstoći mogu mjeriti s tvrdim metalima te su im i po strukturi jako slični. Komponente tvrdih materijala su od karbonitrida i titana (engl. Titanium-Ti) s različitim omjerima tantala (engl. Tantalum-Ta), volframa (engl. Wolfram-W) i ponekad molibdena (engl. Molybdenum-Mo). Njihova svojstva omogućuju postizanje većih brzina rezanja zbog njihove visoke otpornost na trošenje. Iako su ovi materijali manje čvrstoće od WC tvrdih metala, zadržavaju visoku čvrstoću pri visokim temperaturama i imaju dobru kemijsku stabilnost jer su otporni na oksidaciju i tribokemijsko trošenje [32].

c) Keramike se ovisno o korištenoj matrici kao materijali za izradu alata mogu javiti u dvije vrste keramičkih kompozicija. Prvu skupinu predstavlja Al_2O_3 , koji se pri visokim temperaturama zadržava u svojoj najstabilnijoj kristalnoj heksagonalnoj rešetki, iz čega proizlaze različite poželjne karakteristike materijala. Drugu skupinu predstavlja silicijev karbid (engl. Silicon Carbide-SiC), koji ima dobru otpornost na oksidaciju zahvaljujući niskom koeficijentu toplinskog širenja, dobru otpornost na nagle temperaturne promjene za razliku od drugih keramičkih materijala. Inovacija na ovom području su SiC keramike, koje u kombinaciji s keramičkim kompozitima povećavaju čvrstoću, toplinsku vodljivost i otpornost na temperaturnu postojanost [15]. Alati na bazi Al_2O_3 i SiC keramike značajno pridonose poboljšanju procesa suhe strojne obrade, a čime se znato proširuje i područje njihove primjene. Prednost keramičkih alata u procesu suhe strojne obrade pri velikim brzinama očituje se kroz otpornost na visoke temperature rezanja i duži vijek alata [33].

d) Borov nitrid ima jako mekanu strukturu, pa stoga nije poželjan kao osnovni materijal reznih alata. Postupkom sinteriranja pri visokim tlakovima i temperaturama formira se CBN. CBN ima jako visoku tvrdoću i kemijsku stabilnost na visokim temperaturama i do 1400 $^{\circ}\text{C}$, te je sličan dijamantu. CBN materijali su najtvrdi po strukturi poslije dijamanta [19].

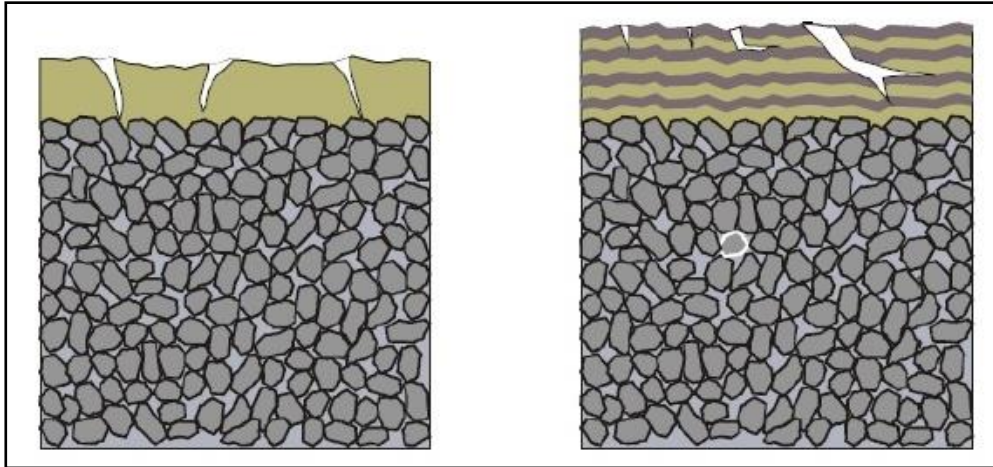
e) Dijamant se sastoji od ugljika, zbog svoje tvrdoće koristi se i jako je poželjan kao osnova reznih alata. Dijamant ima dobra kemijska, fizička i mehanička svojstva i visoku otpornost na korozijsko trošenje. Kod dijamantnih reznih alata koeficijent trenja prilikom obrade je jako mali, a toplinsko širenje veoma nisko. Po strukturi se dijele se na monokristalni i polikristalni dijamant. Zbog veće čvrstoće, polikristalni dijamant je poželjniji za izradu reznih alata u odnosu na monokristalni. Nedostaci im se ogledaju kroz visoku stopu trošenja rezne oštrice tijekom obrade željeznih materijala, zbog kemijske reakcije ugljika i željeza. Uglavnom se koristi za obradu lakih metala čija je osnova aluminij i magnezij [34].

Danas je više od 70 % korištenih alata u obradi odvajanjem čestica prevučeno različitim vrstama prevlaka [35]. Trenje i trošenje dodirnih površina između alata i obratka najčešće definiraju tijek procesa obrade. Mehanizmi trošenja adhezija i abrazija uzrokuju površinska oštećenja različitih oblika na alatu i obratku. Da bi se utjecalo na kontrolu triboloških uvjeta, potrebno je u različitim procesima obrade koristiti alate s posebnim prevlakama.

Prevlake se mogu klasificirati po metodi nanošenja:

1. Postupak kemijskog nanošenja iz parne faze (engl. Chemical Vapor Deposition-CVD)
2. Postupak fizikalnog nanošenja u vakumu (engl. Physical Vapor Deposition-PVD)

Prema broju slojeva mogu biti jednoslojne i višeslojne. Prednost višeslojnih prevlaka je bolja otpornost širenju pukotine i povoljna raspodjela opterećenja. Energija pukotine koja se pojavi na površini prevlake se oslobađa širenjem pukotine u različitim smjerovima. Pukotine se ovisno o vrsti prevlake različito šire prema površini alata, slika 6. Svojstva alatnih prevlaka mogu se poboljšati smanjenjem dimenzija mikrostrukture prevlake na nanometarske vrijednosti. Nanoslojne prevlake koje predstavljaju dostignuće moderne tehnologije, su omogućile smanjenje debljine sloja prevlake i do stotinu pojedinačnih slojeva koji dosežu ukupnu debljinu od 2 μm do 5 μm .



Slika 6. Različito širenje pukotina u jednoslojnoj i višeslojnoj prevlaci [30]

Postoji posebna vrsta prevlaka za suhu obradu, koje djelomično nadomještaju funkciju podmazivanja. To su samopodmazujuće prevlake, a najčešće korištena je molibdenov disulfid (engl. Molybdenum disulfide-MoS₂) [34]. Pored toga koriste se i aktivni volframov tvrdi metal (engl. Tungsten Carbide/Carbon-WC/C), (engl. Tungsten Carbide/Cobalt-WC/Co), kalcij difluoridom (engl. Calcium Fluoride-CaF₂), volframov disulfid (engl. Tungsten Disulfide-WS₂) [15], [12]. MoS₂ se široko primjenjuje kao aditiv kod podmazivanja [36]. MoS₂ prevlake se mogu koristiti u širokom rasponu temperatura pri čemu se osigurava podmazivanje pri visokim opterećenjima i velikim brzinama rezanja. Rezultat toga je smanjenje generirane topline i sila u zoni rezanja [30]. Na taj način se poboljšavaju uvjeti obrade čime su MoS₂ prevlake opravdale široku primjenu [36]. Lee i ostali [37] u svom radu su objasnili učinak samopodmazujućih prevlaka. Autori navode da MoS₂ prevlake mogu značajno smanjiti trenje na dodirnim površinama i sklonost stvaranju naljepka između odvojene čestice i reznog alata. Ozcelik i ostali [38] potvrđuju da suha strojna obrada nehrđajućeg čelika AISI 316 pokazuje dobre rezultate u pogledu trošenja alata, sila rezanja i hrapavosti obrađene površine uspoređujući s konvencionalnom obradom primjenom polusintetičkog SHIP-a u procesu glodanja. Ciffcti [39] je istraživao utjecaj višeslojnih prevlaka tvrdog metala TiC/TiCN/TiN i TiCN/TiC/Al₂O₃ na hrapavost obrađene površine i sile rezanja tijekom suhe obrade tokarenjem nehrđajućih čelika oznake AISI 304 i AISI 316. Autor je potvrdio da se alatom prevučenim TiC/TiCN/TiN prevlakama postižu niže vrijednosti sila rezanja od TiCN/TiC/Al₂O₃ prevlaka. Rezultati se prepisuju nižem koeficijentu trenja kojeg imaju slojevi TiN prevlake. Mohanty i ostali [40] su uspoređivali utjecaj višeslojnih prevlaka TiN/TiCN/Al₂O₃/ZrCN i neobloženog tvrdog alata na trošenje alata, hrapavost obrađene površine

i temperature rezanja tijekom suhe strojne obrade tokarenjem 17-4 PH nehrđajućeg čelika. Rezultati su pokazali da su dominantni mehanizmi trošenja tijekom obrade bili adhezija i abrazija. Potvrđeno je da višeslojne prevlake imaju značajan utjecaj na smanjenje trošenja alata i njegovu plastičnu deformaciju. Rezultat toga su bolje vrijednosti izlaznih veličina procesa obrade uspoređujući s neprevučeni alatom. Yahya i ostali [41] su proveli istraživanje suhe strojne obrade tokarenjem Ti-6Al-4V legure koristeći se CVD ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$) i PVD (TiAlN) obloženim tvrdim alatima. Autori su potvrdili da je trošenje alata manje kod alata prevučeni PVD postupkom, a da je hrapavost obrađene površine s povećanjem dubine i posmaka bolja kod alata obloženog CVD postupkom. Thakur i ostali [42] prilikom suhe obrade tokarenjem Nimonic C-263 legure neprevučeni tvrdim alatom i alatom prevučeni višeslojnim prevlakama TiN/TiCN/ Al_2O_3 /ZrCN donose zaključak da višeslojne prevlake značajno utječu na otpornost abrazivnom mehanizmu trošenja alata i na smanjenje temperature rezanja i do 63 % u odnosu na neprevučeni alat. Polini i Turchetta [43] prilikom obrade titana Ti-6Al-4V glodanjem koriste tri vrste prevlaka, višeslojnu TiAlN prevlaku, višeslojnu TiAl prevlaku i jednoslojnu TiAlN prevlaku. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da se jednoslojnom TiAlN prevlakom postižu manje vrijednosti sila rezanja i manja hrapavost obrađene površine u odnosu na prethodno korištene alatne prevlake. Ginting i Nouari [44] su ispitivali mogućnost primjene suhe strojne obrade glodanjem titanovih legura s neprevučeni reznim alatima od tvrdog metala. Rezultati nisu bili zadovoljavajući s obzirom na dominantan utjecaj mehanizama abrazije i adhezije koji uzrokuju ubrzano trošenje stražnje površine alata. Na temelju rezultata koje su predstavili Young i ostali [45] vidljivo je kako je suha strojna obrada izvediva za gotovo sve operacije i materijale obratka, tablica 1. Još uvijek je suha strojna obrada neprihvatljiva u operacijama izrade provrta i uvrta, odnosno tijekom bušenja i dubokog bušenja [24]. Razlog tome je nemogućnost odvođenja odvojene čestice, nagli razvoj mehanizama trošenja nastalih uslijed velikih temperatura i stvaranje naljepka na reznoj oštrici alata.

Tablica 1. Obradivost pojedinih materijala za različite postupke suhe strojne obrade [45]

Materijal obratka	Lijevano željezo	Neželjezne legure	Konstruktivski čelik	Toplinski obrađen čelik	Aluminijske legure
<i>Vrsta strojne obrade</i>					
<i>Tokarenje</i>	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Glodanje</i>	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Bušenje</i>	✓	✓	❖	❖	❖
<i>Duboko bušenje</i>	❖	•	❖	❖	❖
<i>Upuštanje</i>	❖	✓	❖	❖	❖
<i>Narezivanje navoja</i>	✓	✓	❖	❖	❖
✓ <i>Trenutno izvedivo</i>	❖ <i>Trenutno u razvoju</i>		• <i>Trenutno neizvedivo</i>		

Kalidas i ostali [46] ispituju učinkovitost različitih vrsta prevlaka višeslojne TiAlN/TiN, višeslojne TiAlN i MoS₂ primjenom HSS reznog alata varirajući tri ulazna parametra brzine rezanja, posmaka i uvjeta obrade (suha strojna obrada i konvencionalne obrada) tijekom bušenja. Izlazne veličine procesa su temperatura na obratku, srednji promjer rupe i hrapavost obrađene površine. Autori potvrđuju postizanje zadovoljavajućih rezultata tijekom suhe strojne obrade uspoređujući s konvencionalnom obradom. Tijekom konvencionalne obrade dolazi do formiranja naljepka na reznoj oštrici, a što je posljedica toga da se pri većim brzinama rezanja na obratku zadržava veća količina temperature u odnosu na suhu strojnu obradu. Yang i suradnici [47] ispituju svojstva TiAlN i TiAlN/CrAlN prevlaka. Eksperimenti su provedeni na čeliku 9CrSi2Mn tvrdoće od 53 HRC do 55 HRC tijekom tokarenja. TiAlN prevlake imaju bolja svojstva prianjanja za osnovni materijal u odnosu na TiAlN/CrAlN prevlake, te su ujedno i manje podložne adhezijskom mehanizmu trošenja. Rezultati ispitivanja pokazuju da su TiAlN prevlake izložene blagom abrazijskom trošenju i značajnom oksidacijskom trošenju, uspoređujući s TiAlN/CrAlN prevlakama koje su izložene isključivo adhezijskom mehanizmu trošenja. Roy i suradnici [48] navode da tijekom tokarenja aluminijske legure primjenom TiC, TiN, TiB₂ i Al₂O₃ prevlaka pri velikim brzinama rezanja dolazi do razvoja velikih temperatura na sučelju alat i odvojena čestica što pospješuje stvaranje naljepka na reznom alatu smanjujući mu rezne sposobnosti. Autori ističu da je u ovom slučaju CVD prevučeni dijamentni alat bolji izbor za postizanje manjeg trošenja alata, bolje hrapavosti obrađene površine i smanjenja sila rezanja. Zbog visokih temperatura razvijenih u zoni rezanja koje uzrokuju temperaturno elastične deformacije alata i obratka suha strojna obrada zahtjeva hlađenje. Postupci strojne obrade s definiranom reznom oštricom alata

pogodni su i teško izvedivi bez prisustva SHIP-a. Derflinger i suradnici [49] navode da cilj suhe strojne obrade treba biti usmjeren i na smanjenje topline koja se zadržava na obratku. Stoga je potrebno odrediti uvjete smanjenja topline u zoni rezanja i odvođenja odvojene čestice iz zone rezanja.

Pristupi koji bi poboljšali učinkovitost suhe strojne obrade, a time nadomjestili i nedostatke izostavljene napuštanjem konvencionalne primjene SHIP-a omogućuju se pomoću alata izrađenih od novih materijala, korištenjem alata s različitim prevlakama otpornim na visoke temperature i kroz alternativne tehnike hlađenja, ispiranja i podmazivanja [12], [28], [45].

4. ALTERNATIVNE TEHNIKE ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE

Jedan od osnovnih razloga uvođenja promjena u procese strojne obrade je ispunjavanje uvjeta održivosti s naglaskom na zaštitu okoliša i čovjeka. U tom pogledu kroz poštivanje zakona i propisa, razvojem ekološke svijesti dolazi do smanjenja troškova proizvodnje, porasta imidža poduzeća, a time i poslovnog uspjeha. Zbog toga se proizvodna industrija usmjerava na primjenu alternativnih tehnika za hlađenje, ispiranje i podmazivanje u procesima strojne obrade, a što je istovremeno i veliki poticaj razvoju zelene proizvodnje. Alternativne tehnike hlađenja ekološki su prihvatljivije od konvencionalnih sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje [50]. Primjena alternativnih tehnika promatra se sa strane poboljšanja strojne obrade u odnosu na konvencionalne metode i suhu strojnu obradu. Smanjenjem visokih temperatura u zoni rezanja smanjuju se negativni adhezijski i difuzijski utjecaji na trošenje alata. Danas se u strojnoj obradi koriste različite alternativne tehnike za hlađenje, ispiranje i podmazivanje kao što su: kriogeno hlađenje, hlađenje hladnim komprimiranim zrakom i primjena minimalnih količina ulja [51]. Krajem prošlog stoljeća Podgorkov [52] i Godlevski [53] predlažu vodenu paru kao ekološki prihvatljivo sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje u postupcima glodanja i tokarenja. Rezultati su pokazali da vodena para može osigurati ravnomjerno hlađenje zone rezanja i povećanje vijeka tvrdog alata za oko 2 do 2,5 puta tijekom tokarenja i 2 do 4 puta tijekom glodanja nehrđajućeg čelika oznake ANSI 304. Junyan i suradnici [54] navode da se učinkovitost vodene pare u strojnoj obradi očituje povećanjem vijeka alata i do 2 puta u uvjetima visokobrzinske obrade uspoređujući sa suhom strojnom obradom. Pojedini autori navode da se primjenom plinova poput tekućeg dušika (LN_2) i ugljičnog dioksida (CO_2) omogućuje smanjenje temperature i sila rezanja u odnosu na suhu i konvencionalnu obradu [55], [56]. Rezultat toga je dulji životni vijek alata i poboljšana kvaliteta obrađene površine. S obzirom da je zrak ekološki prihvatljiv, lako dostupan i jeftin jako je pogodan za primjenu u strojnoj obradi. Komprimirani hladni zrak predstavlja alternativno rješenje u pogledu odvođenja odvojene čestice i hlađenja zone rezanja. Sharma i ostali [57] navode da se primjenom sustava hladnog komprimiranog zraka povećava produktivnost obrade i stvara veća mogućnost za visokobrzinsku obradu u odnosu na uvjete suhe strojne obrade. Tehnika MQL se također pokazala pogodnom kao alternativna zamjena za konvencionalnu primjenu SHIP-a i suhu strojnu obradu [58]. Značajni rezultati se postižu primjenom biljnih ulja koja su ekološki prihvatljivija u odnosu na mineralna. Pored toga, stvara se mogućnost kombinacije MQL tehnike

i hladnog komprimiranog zraka, a što bi trebalo zadovoljiti potrebe hlađenja i podmazivanja zone rezanja. Na taj način, uz ispunjenje uvjeta održivosti, kombinacija dviju tehnika trebala bi opravdati svoju primjenu i postići zadovoljavajuće rezultate u pogledu smanjenja temperatura u zoni rezanja koje su glavni inicijatori razvoja mehanizama trošenja.

4.1. Kriogeno hlađenje

Kriogena strojna obrada podrazumijeva upotrebu kriogenih fluida kao sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Najranija poznata primjena kriogenih sredstava u procesima obrade zabilježena je sredinom 1960. kada Uehara i Kamagui [59] navode da kriogeno hlađenje u strojnoj obradi poboljšava kvalitetu izratka od titanovih legura. Jedan od ključnih problema u razvoju kriogenog postupka hlađenja bio je nanošenje fluida u zonu rezanja, zbog čega se proces u početku smatrao neisplativim. Dolazilo je do velikog rasipanja fluida, što je stvaralo dodatne troškove u procesu proizvodnje. Primjenom prikladnog sustava za nanošenja fluida u zonu rezanja došlo je do razvoja i napretka kriogene strojne obrade. Tekući dušik smatra se jednim od najprihvatljivijih rješenja kriogene obrade. Nanosi se u tekućem stanju pri temperaturi $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ i te uspješno apsorbira toplinu u zoni rezanja [60]. Tekući dušik je bezbojan, kemijski inertan, siguran, nezapaljiv i nekorozivan plin te se može koristiti u procesima strojne obrade. Brzo isparava i formira zaštitni sloj djelujući kao sredstvo za podmazivanje. Dhananchezian i Kumar [61] tvrde da kriogeno hlađenje značajno poboljšava obradivost Ti–6Al–4V legure. Autori navode da je temperatura u zoni rezanja smanjena oko 66 %, hrapavost obrađene površine za oko 36 %, sile rezanja od 35 % do 42 %, a trošenje alata od 27 % do 39 % uspoređujući s konvencionalnom obradom. Jerold i Kumar [62] provode istraživanje utjecaja hlađenja CO_2 u odnosu na konvencionalnu i suhu obradu tokarenjem čelika AISI 1045 u pogledu temperatura, sila rezanja i hrapavosti obrađene površine. Rezni alat je višeslojni obloženi tvrdi alat oznake CNMG 120412-5. Eksperimentalni podaci pokazuju učinkovitost kriogenog sredstva za hlađenje koje dovodi do smanjenja temperature u zoni rezanja od 5 % do 22 % i sila rezanja od 17 % do 38 % uspoređujući s konvencionalnom obradom. Autori ističu da je bolja kvaliteta obrađene površine postignuta primjenom CO_2 u odnosu na suhu i konvencionalnu obradu. Musfirah i suradnici [63] provode eksperimentalna istraživanja utjecaja kriogenog hlađenja primjenom tekućeg dušika na temperature, sile rezanja i hrapavost obrađene površine pri glodanju Inconel 718 legure. Autori navode da tekući dušik može smanjiti temperaturu na dodirnim površinama između rezne oštrice i odvojene čestice i do 70 %, a smanjiti hrapavost obrađene površine i do 31 % uspoređujući sa

suhom strojnom obradom. Ezugwu [64] ističe da su kriogeni postupci pogodni za obradu tvrdih materijala poput legura koje se koriste u avionskoj industriji dok Kumar i Choudhury [65] navode da su kriogeni procesi isplativi u obradi s velikim brzinama rezanja i velikim posmacima. Osnovni nedostatak kriogenog hlađenja je visoka cijena sustava i njegovog održavanja. Izrazito niske temperature kriogenih fluida predstavljaju opasnost za čovjeka tijekom nanošenja u zonu rezanja. Velika potrošnja kriogenih fluida, trošak investicije u sustav za opskrbu i nanošenje fluida u zonu rezanja utječu na trošak obrade i time se dodatno narušava segment ekonomske održivosti procesa obrade. Primjenom hladnog komprimiranog zraka uz relativno mala investicijska ulaganja moguće je znatno smanjiti ukupne troškove proizvodnje. Hladni komprimirani zrak ima jako dobar potencijal za smanjenje ukupnih troškova proizvodnje i negativnog utjecaja na okolinu i ljude [66].

4.2. Hlađenje komprimiranim hladnim zrakom

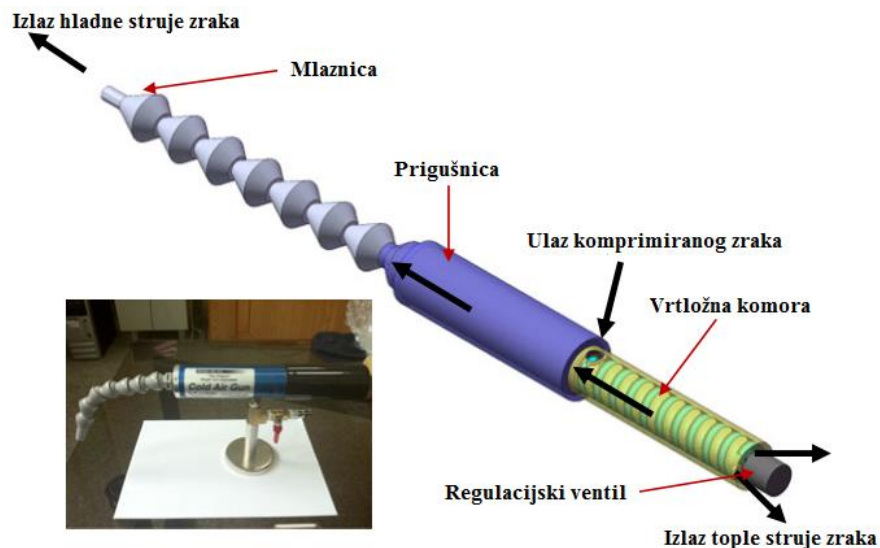
Hlađenje komprimiranim hladnim zrakom-HKHZ (engl. Cold Compressed Air) omogućuje snižavanje topline u dodirnoj zoni između alata i predmeta obrade, hlađenje alata i obratka te odvođenje odvojene čestice. Hlađenje komprimiranim hladnim zrakom izvodi se pomoću vrtložne cijevi (engl. Vortex Tube) poznate kao Ranque-Hilsch vrtložna cijev, slika 7 [67].



Slika 7. Ranque-Hilsch vrtložna cijev [68]

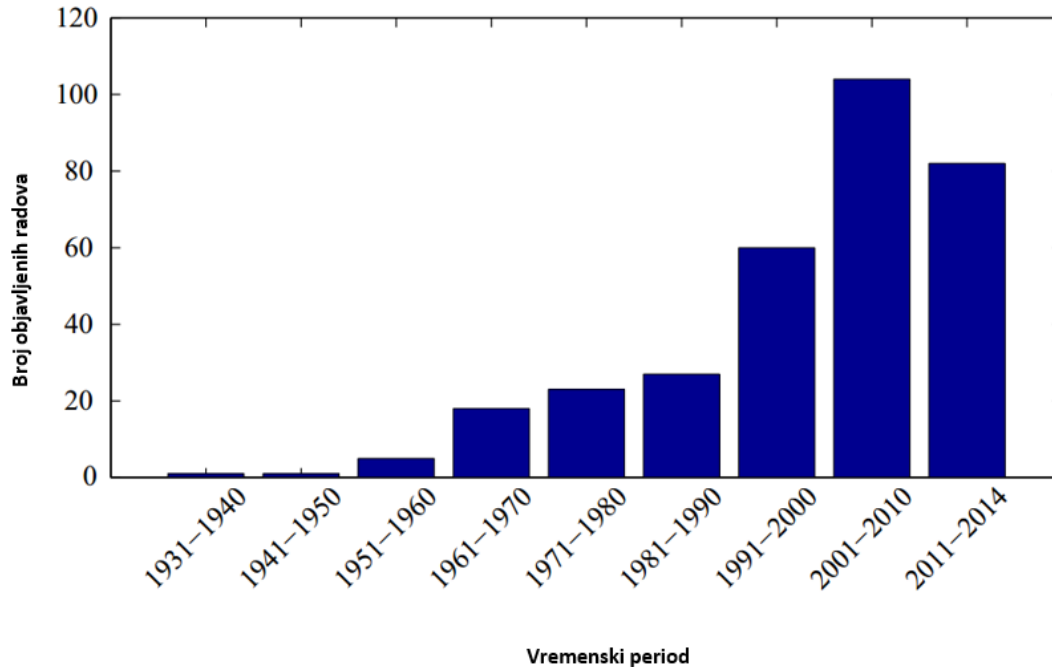
Vrtložnu cijev izumio je francuski fizičar Georges J. Ranque 1931. a projektirao i usavršio 1947. njemački fizičar Rudolf Hilsh [69]. Vrtložna cijev nema pokretnih dijelova, sastoji se od jedne ili više ulaznih sapnica, vrtložne komore, kontrolnog ventila vrućeg zraka, izlaza za hladni zrak i cijevi. Princip rada Ranque-Hilsch vrtložne cijevi zasniva se na razdvajanju ulaznog komprimiranog zraka na dvije struje. Komprimirani zrak tangencijalno kroz ulaznu sapnicu dolazi u vrtložnu komoru. U vrtložnoj komori zrak se ubrzava do velikog broja okretaja u pojedinim slučajevima i milijun okretaja u minuti. Nakon toga se razdvaja na toplu i hladnu. Hladna struja

napušta vrtložnu cijev kroz centralno ušće kraj ulaznih sapnica. Istovremeno topla struja napušta cijev preko kontrolnih ventila na suprotnom dijelu cijevi [68]. Učinak ohlađenog zraka na kvalitetu završne obrade u velikoj mjeri ovisi o parametrima obrade. Na slici 8. je prikazana vrtložna cijev istosmjernog protoka zraka.



Slika 8. Vrtložna cijev istosmjernog protoka [70]

U početku se primjenjivao komprimirani zrak sobne temperature ali njegova učinkovitost nije bila značajna u odnosu na konvencionalna SHIP-a. Eksperimentalna istraživanja koja su uslijedila izdvajaju hlađenje hladnim komprimiranim hladnim zrakom kao jednu od učinkovitijih alternativnih tehnika za hlađenje u obradi odvajanjem čestica. Isparavanje medija bez zagađenja atmosfere, produljenje vijeka alata, čista odvojena čestica te ne postojanje štetnog utjecaja na zdravlje čovjeka neke su od pozitivnih karakteristika hladnog komprimiranog zraka kao alternativne tehnike hlađenja. S obzirom da je medij za hlađenje hladni komprimirani zrak, postupak se smatra najčišćim i s ekološke strane najprihvatljivijim načinom hlađenja [71]. Liu i ostali [70] donose zaključak da hladni komprimirani zrak pomoću vrtložne cijevi bolje prodire u zonu rezanja od bilo kojih drugih konvencionalnih sredstava. Rezultati pokazuju da se pomoću hladnog komprimiranog zraka smanjuju temperature u zoni rezanja i trošenje alata te poboljšava kvaliteta obrađene površine. Autori navode da je hladni komprimirani zrak bolji izbor od suhe strojne obrade pri tokarenju Ti-6Al-4V legure. Sudhakar i Mihir [72] u svom radu kronološki prikazuju radove u kojima se primjenjuje vrtložna cijev kao sustav za hlađenje primjenom hladnog komprimiranog zraka u posljednjih nekoliko desetljeća, slika 9.



Slika 9. Broj objavljenih radova u kojima se primjenjuje vrtložna cijev [72]

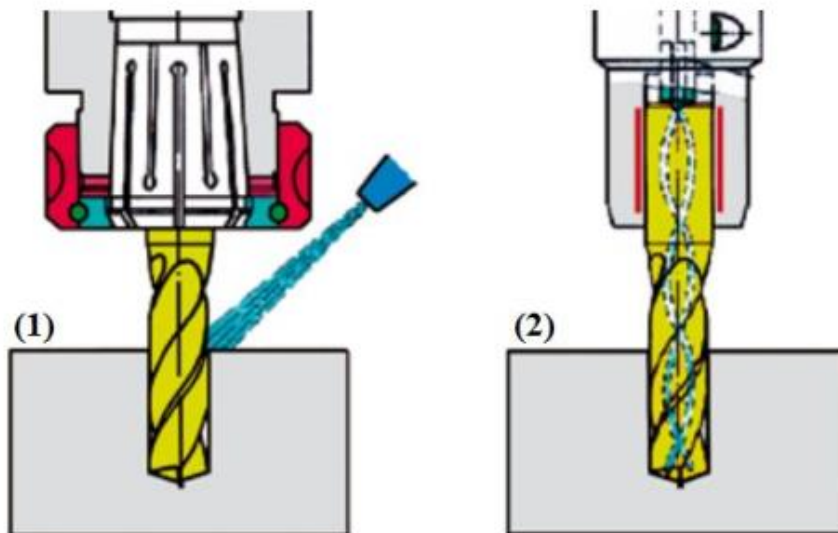
Boswell i Chandratilleke [73] tvrde da je temperatura pri tokarenju primjenom vrtložne cijevi manja za 40 °C u odnosu na konvencionalno hlađenje i 210 °C u odnosu na suhu obradu. Ekinović i ostali [74], [75] prikazuju utjecaj hlađenja hladnim komprimiranim zrakom na različite vrste materijala: legirani čelik, aluminijska bronca i čisti aluminij. Rezultati istraživanja ukazuju da je hladni komprimirani zrak u procesima obrade odvajanjem čestica odličan alternativni izbor za poboljšanje obradivosti mekših materijala. Liu i Chou [76] istražuju utjecaj temperature hladnog zraka na temperaturne promjene i trošenje alata pri tokarenju A390 aluminij-silicij legure. Hladni komprimirani zrak dobiven pomoću vrtložne cijevi je u rasponu temperatura od -25 °C do -15 °C. Celent i ostali [77] prikazuju prednosti primjene hladnog komprimiranog zraka pomoću vrtložne cijevi tijekom glodanja čelika oznake 42CrMo4. U radu su analizirane hrapavost obrađene površine i životni vijek alata pri uvjetima suhe strojne obrade, konvencionalnog hlađenja i hlađenja hladnim komprimiranim zrakom. Eksperimentalni rezultati su potvrdili da se bolji rezultati postižu primjenom hladnog komprimiranog zraka u odnosu na suhu i konvencionalnu obradu. Choi i ostali [78] su potvrdili da komprimirani hladni zrak tlaka 4 bara i temperature od -4 °C do -25 °C tijekom brušenja značajno smanjuje temperaturu u zoni rezanja i povećava kvalitetu obrađene površine u odnosu na konvencionalni SHIP. Jozić i ostali [79] provode optimizaciju parametara i uvjeta obrade s ciljem analize njihovog utjecaja na količinu odvojenog materijala, sile rezanja i trošenje alata pri glodanju 42CrMo4 čelika. Pokazalo se da uvjet obrade značajno utječe na vrijednosti

izlaznih karakteristika procesa obrade. Na temelju rezultata optimizacije autori potvrđuju da se hladni komprimirani zrak može uspješno koristiti u obradi odvajanjem čestica. Nandy i ostali [80] ističu da se povećanje životnog vijeka alata i produktivnosti pri tokarenju Ti-6Al-4V legure može postići primjenom hladnog komprimiranog zraka. Sarma i Dixit [81] ističu da se pri brzinama od 400 m/min i više tijekom tokarenja, primjenom hladnog komprimiranog zraka značajno smanjuje trošenje alata i poboljšava hrapavost obrađene površine uspoređujući sa suhom obradom. Analizirani rezultati tijekom istraživanja u literaturi ukazuju da primjena hladnog komprimiranog zraka pomoću vrtložne cijevi stvara mogućnost za poboljšanje učinkovitosti procesa obrade odvajanjem čestica. Tehnika hlađenja hladnim komprimiranim zrakom u potpunosti zadovoljava sociološke i ekološke uvjete strategije zelene proizvodnje, a koji imaju značajan utjecaj na ekonomsku održivost strojne obrade. Na temelju rezultata istraživanja u različitim procesima obrade odvajanjem čestica s različitim materijalima i reznim alatima stvara se mogućnost u pogledu potpunog napuštanja konvencionalnih SHIP-a iz proizvodne industrije. Jedan od glavnih nedostataka hlađenja hladnim komprimiranim zrakom je da se pored izvrsnog hlađenja ne osigurava dodatno podmazivanje u zoni rezanja. Ovaj problem predstavlja nemogućnost potpune zamjene pozitivnih funkcija koje tijekom obrade pružaju konvencionalna sredstva. Kombinacija hladnog komprimiranog zraka i minimalnih čestica ulja u struji zraka predstavlja novu tehniku koja bi trebala osigurati dovoljno hlađenje i podmazivanje zone rezanja. Očekuje se da će ova tehnika imati vrlo mali negativan utjecaj na održivost procesa obrade s obzirom na male količine korištenog maziva. S druge strane, očekuje se da će postići zadovoljavajuće ili čak bolje izlazne vrijednosti u odnosu na konvencionalna sredstva.

4.3. Primjena minimalnih količina sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje

Kao što sam naziv govori, minimalne količine SHIP-a nastoje smanjiti količinu medija koja se koristi u procesu strojne obrade. Minimalna količina SHIP-a, predstavlja tehniku koja može ponuditi prihvatljivija rješenja održivosti u odnosu na konvencionalne metode hlađenja. Kada je u procesu strojne obrade primarni cilj podmazivanje primjenjuje se MQL tehnika, za razliku od MQCL (engl. Minimum Quantity Cooling Lubrication) tehnike koja se koristi prilikom obrade materijala koji nužno zahtijevaju hlađenje [30]. Ove tehnike kao medij najčešće koriste ulja u kombinaciji sa zrakom. Pripadaju skupini polusuhih metoda za hlađenje i podmazivanje. Ubrizgavanje medija u zonu rezanja je u obliku aerosola, a isporuka medija omogućuje se na dva načina. Prvi je pomoću vanjskih sapnica različitog oblika, a drugi je kanalom kroz alat, slika 10.

Pravilna regulacija i omjer potrebne količine zraka i ulja u MQL sustavu osigurava se pomoću regulacijskih ventila.



Slika 10. MQL sustav s vanjskim i unutarnjim ubrizgavanjem medija [30]

Vanjsko nanošenje MQL-a automatizira se kroz ubrizgač. Nositelj podmazivanja je komprimirani zrak u kombinaciji s mikrokapljicama ulja. Aerosol nastaje u samoj brizgalici, čestice ulja rasprše se u struji komprimiranog zraka te se s velikom preciznošću dozira i nanosi u zonu rezanja. Ovaj način nanošenja je pogodniji za procese obrade glodanja, tokarenja i bušenja. Princip unutarnjeg nanošenja MQL-a bazira se na aerosolu koji se stvara u spremniku, a nanosi u kombinaciji s komprimiranim zrakom kanalima kroz sredinu alata. U ovom slučaju princip je pogodniji za postupak dubokog bušenja, gdje je omjer dubine i promjera veći od 10:1. Prednosti MQL tehnike u odnosu na konvencionalni SHIP su:

- otklanja probleme vezane za „temperaturni šok“ reznog alata,
- smanjeni su troškovi nabave, pohranjivanja i odlaganja SHIP-a,
- potrebne manje količine SHIP-a u odnosu na konvencionalnu obradu,
- negativni utjecaji na okoliš i čovjeka smanjeni su na minimalnu mjeru.

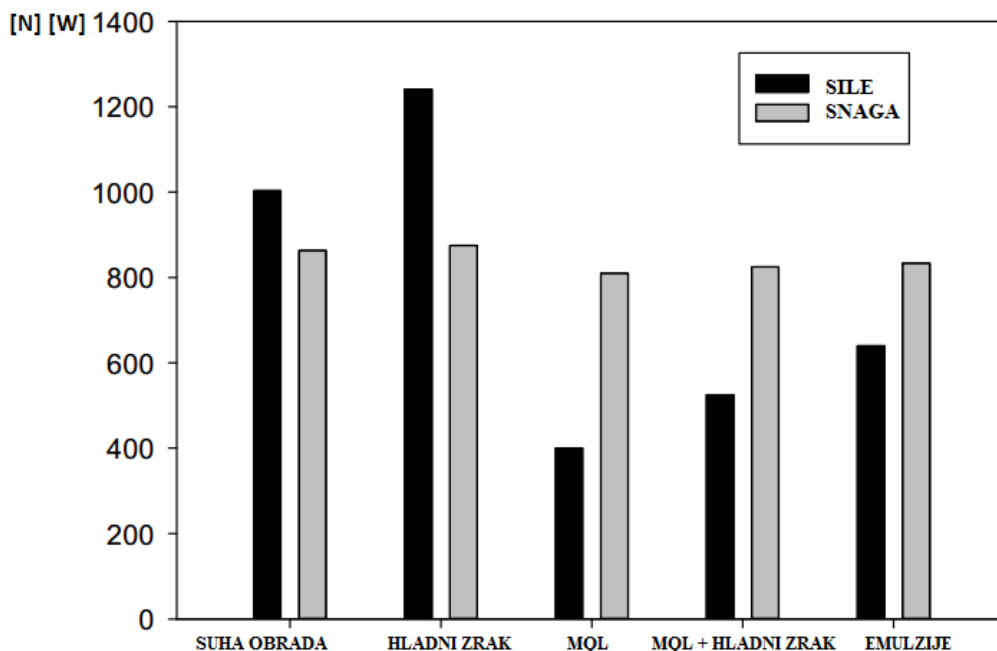
Sharma i ostali [57] su potvrdili da MQL tehnika značajno utječe na smanjenje trošenja alata pri tokarenju. Treurnicht i ostali [82] navode da se MQL tehnika može uspješno koristiti pri bušenju aluminij-silicij legura što je gotovo nemoguće tijekom suhe strojne obrade. Joshua i ostali

[83] potvrđuju da je MQL tehnika prihvatljivija tijekom obrade aluminijske legure AL6061 glodanjem u odnosu na suhu strojnu obradu. Rezultati istraživanja ukazuju na 20 % -tno poboljšanje hrapavosti obrađene površine. Sundara i Rajendran [84] su istraživali utjecaj parametara i uvjeta obrade na hrapavost obrađene površine tijekom glodanja AL6063 legure. Autori ističu da MQL tehnika daje bolje rezultate u odnosu na konvencionalnu primjenu SHIP-a. Heisel i ostali [85] navode da se MQL sustav može uspješno koristiti u postupcima obrade s geometrijski definiranom reznom oštricom. Zeilmann i Weingaertner [86] navode da se tijekom bušenja Ti-6Al-4V legure primjenom MQL tehnike i isporukom medija kroz alat postižu niže vrijednosti temperatura u odnosu na MQL tehniku s isporukom medija preko vanjskih mlaznica. Shahrom i ostali [87] navode da se primjenom MQL tehnike postižu bolji rezultati hrapavosti obrađene površine pri glodanju legure AISI 1060 u odnosu na konvencionalno hlađenje. Bitan parametar tijekom obrade primjenom MQL tehnike je vrsta ulja koja se koristi kao medij za podmazivanje. S obzirom da MQL sustavi koriste vrlo male količine SHIP-a potrebno je da tijekom odlaganja budu biorazgradivi i kemijski stabilni. Svijest o očuvanju okoliša i zdravlja potiče primjenu biljnih ulja ili sintetskih eterskih ulja u MQL sustavima [88]. Nurul i ostali [89] su proučavali utjecaj četiri različita biljna ulja: palmino, sezamovo, maslinovo i kokosovo tijekom bušenja AISI 316 čelične legure primjenom MQL sustava. Autori navode da se kokosovo ulje pokazalo kao najbolji izbor s obzirom na kvalitetu obrađene površine. Tazehkandi i ostali [90] navode da biljna ulja mogu povećati produktivnost obrade i smanjiti troškove proizvodnje tijekom tokarenja Inocel 706 legure. Sharma i Sidhu [91] postižu bolju hrapavost obrađene površine s biljnim uljima tijekom tokarenja AISID2 legure u odnosu na suhu strojnu obradu. Autori navode smanjenje temperature u zoni rezanja do 50 % u odnosu na suhu strojnu obradu. Khan i suradnici [92] zaključuju da učinak biljnih ulja u MQL sustavu značajno smanjuju temperaturu u zoni rezanja u odnosu na konvencionalno hlađenje tijekom tokarenja čelične legure AISI 9310. Ovime su značajno smanjene mogućnosti razvoja temperaturno osjetljivih mehanizama, a što je rezultiralo manjim trošenjem alata i poboljšanom kvalitetom obrađene površine. Liao i ostali [93] tvrde da MQL tehnika daje bolje rezultate hrapavosti obrađene površine pri većim brzinama rezanja u odnosu na konvencionalnu i suhu obradu tijekom glodanja čelika povećane tvrdoće. Autori prednosti prepisuju biljnim uljima niske viskoznosti pri čemu se povećava učinak hlađenja, produljuje životni vijek alata i smanjuje hrapavost obrađene površine tijekom obrada pri visokim brzinama rezanja. Na temelju prethodnih studija može se zaključiti da MQL tehnika hlađenja može

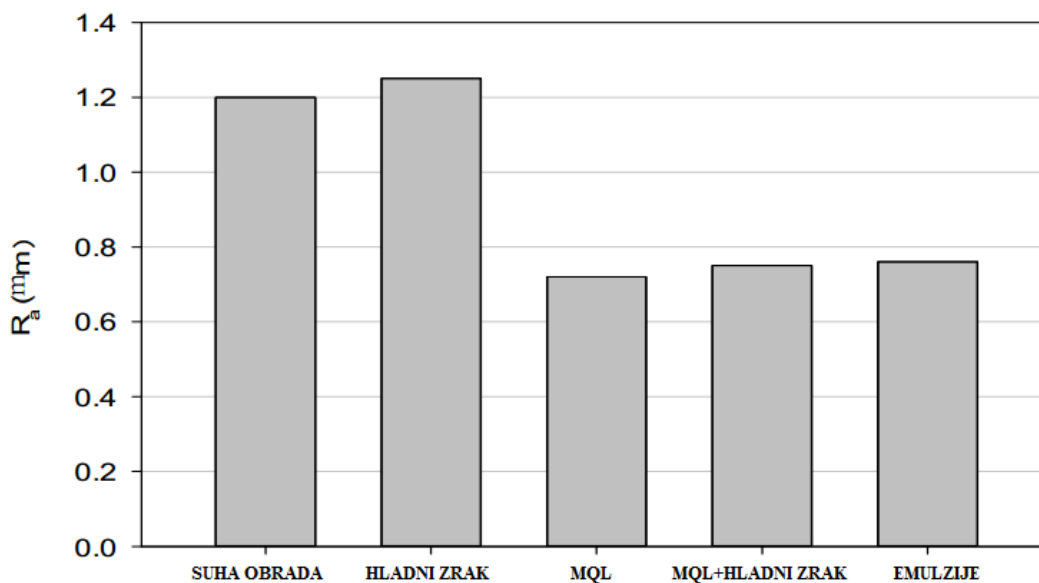
biti alternativa u odnosu na konvencionalnu primjenu SHIP-a, posebno tijekom glodanja pri velikim brzinama. Osnovne supstance konvencionalnog SHIP-a su mineralna ulja čija je biorazgradivost jako niska. Stoga bi im različiti sintetički esteri koji su po prirodi biorazgradivi bili odgovarajuća zamjena [94]. Troškovi investicije, primjene i održavanja navedeni su kao najveći nedostaci MQL sustava.

4.4. Primjena minimalnih količina ulja u kombinaciji sa hladnim komprimiranim zrakom

Komprimirani hladni zrak u kombinaciji s MQL sustavom u procesima obrade odvajanja čestica predstavlja alternativno rješenje s gledišta troškova strojne obrade, ekonomske i ekološke održivosti, te eliminacije negativnog utjecaja na okoliš i zdravlje čovjeka. Ginting i ostali [95] donose ekonomsku i ekološku analizu isplativosti primjene MQL tehnike hlađenja u odnosu na konvencionalnu primjenu SHIP-a. Autori navode da se pomoću MQL tehnike više od 21 % smanjuje negativni utjecaj emisije štetnih plinova u atmosferu i oko 87 % negativnog utjecaja na ljude u odnosu na konvencionalnu obradu, a što predstavlja značajnu prednost u pogledu sjedinjavanja hladnog komprimiranog zraka i MQL sustava. Boswell i Islam [96] u svom radu primjenjuju pet različitih uvjeta obrade: suha obrada, konvencionalna primjena SHIP-a, hladni komprimirani zrak, MQL, kombinacija MQL i hladnog komprimiranog zraka tijekom obodnog glodanja aluminijske legure A356. Hladni komprimirani zrak temperature $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, tlaka 6 bara isporučen je u zonu rezanja pomoću vrtložne cijevi. Rezultati ukazuju da kombinacija hladnog komprimiranog zraka i MQL daje bolje rezultate u odnosu na sve prethodno navedene tehnike u pogledu sila rezanja, utrošene energije i kvalitete obrađene površine izuzev rezultata koji su postignuti samo s MQL tehnikom, slika 11, slika 12.



Slika 11. Sile rezanja i utrošena snaga pri različitim uvjetima obrade [96]



Slika 12. Hrapavost obrađene površine pri različitim uvjetima obrade [96]

Boswell i suradnici [66] tvrde da kombinacija hladnog komprimiranog zraka i MQL tehnike može biti najbolja alternativna zamjena konvencionalnoj primjeni SHIP. Autori svoje tvrdnje zasnivaju na istraživanjima i primjeni inovativnih metoda u postupcima obrade odvajanja čestica za mala i srednja poduzeća u zapadnoj Australiji s ciljem postizanja konkurentne prednosti kroz

ekološki prihvatljivu proizvodnju. Deiad i ostali [97] u svom radu donose zaključak da hladni komprimirani zrak u kombinaciji s biljnim uljem tijekom tokarenja titanove legure Ti-6Al-4V daje dobre rezultate u pogledu trošenja alata uspoređujući sa suhom strojnom obradom, konvencionalnom obradom, MQL tehnikom, kriogenom obradom i hlađenja hladnim komprimiranim zrakom. Očito je da hladni komprimirani zrak ima dobra svojstva odvođenja topline, a biljno ulje omogućuje dobro podmazivanje zone između rezne oštrice i obratka. Singh i Sharma [98] navode da kombinacija hladnog komprimiranog zraka i MQL tehnike poboljšava kvalitetu gotovog proizvoda za 18 % u odnosu na MQL tehniku. Boswell i suradnici [99] navode da kombinacija hladnog komprimiranog zraka i MQL tehnike pruža tvrtkama učinkovito rješenje za zamjenu konvencionalnom SHIP-u. Poseban naglasak stavlja se na ispunjenje uvjeta održivosti strojne obrade. Autori ističu da navedena kombinacija ima potencijala i za primjenu u postupku obrade brušenjem. Saberi i ostali [100] su potvrdili da kombinacija hladnog komprimiranog zraka i MQL tehnike značajno smanjuju tangencijalne sile tijekom brušenja mekših materijala. Može se uočiti da kombinacija hladnog komprimiranog zraka i MQL tehnike nije dovoljno zastupljena u procesima obrade odvajanjem čestica. Ova kombinacija stvara mogućnost za daljnja istraživanja koja će omogućiti da se na temelju rezultata donesu konkretni zaključci za definirani problem. Navedena kombinacija veliki je poticaj poduzećima i proizvođačima da se usmjere prema ovoj alternativnoj kombinaciji koja je na temelju dosadašnjih oskudnih radova održiva te potiče razvoj zelene proizvodnje.

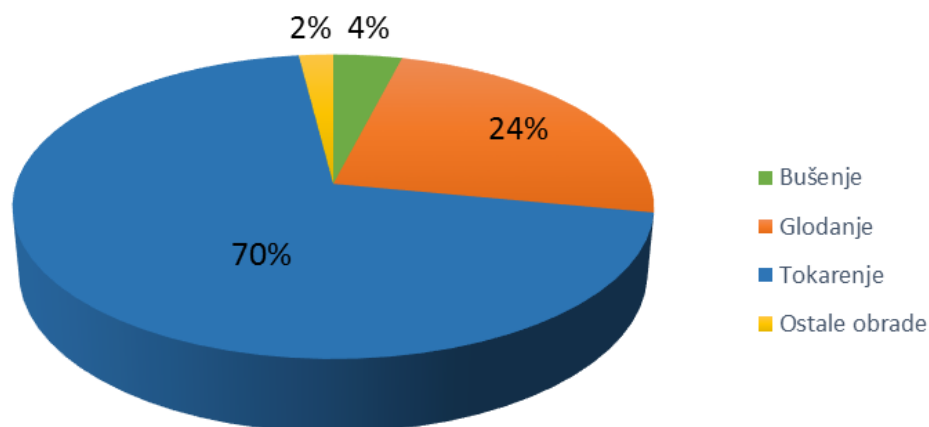
Svakodnevno unapređenje proizvodnih procesa i kontinuirano poboljšanje kvalitete gotovog proizvoda, potaknulo je primjenu naprednih računalnih rješenja u obradi odvajanjem čestica. Postojeće metode praćenja utjecajnih parametara na izlazne karakteristike procesa obrade, a koje se još uvijek temelje na iskustvu i sposobnosti operatera, vremenom gube utrku s razvojem i primjenom računalnih mogućnosti. Metoda konačnih elemenata postaje neizostavan alat u pogledu modeliranja i simuliranja procesa obrade odvajanjem čestica.

5. NUMERIČKO MODELIRANJE U OBRADI ODVAJANJEM ČESTICA

Određivanje utjecajnih parametara obrade pomoću računalnih simulacija, temeljenih na numeričkim metodama, štede vrijeme, materijal i novac, u odnosu na ekonomski neisplativa i dugotrajna eksperimentalna istraživanja [101]. Primjenom modela temeljenih na MKE uz uspješnu optimizaciju parametara obrade i geometrije alata dolazi se do željenih informacija o izlaznim karakteristikama procesa obrade [102], [103], [104].

5.1. Metoda konačnih elemenata

Modeli temeljeni na MKE predstavljaju diskretizaciju kontinuuma konačnih dimenzija na odgovarajući broj podkontinuumata odnosno konačnih elemenata (engl. Finite Elements) međusobno povezanih čvorovima (engl. Nodes) u mrežu (engl. Mesh). Cilj primjene MKE u obradi odvajanjem čestica je predviđanje različitih izlaznih karakteristika procesa obrade kao što su sile rezanja, raspodjela naprezanja, deformacije, temperature, geometrija odvojene čestice i druge. Tijekom analize MKE prvo se računaju karakteristične veličine u svakom konačnom elementu parcijalno, a zatim se određenim transformacijama računaju za cijeli model globalno. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, povećanje njihovog broja dovodi do povećanja gustoće mreže čime se stvara mogućnost da se dobije točnije rješenje traženih analiza. Rješavanje problema simulacijama pomoću MKE svodi se na rješavanje sustava algebarskih jednadžbi. Česti problemi simulacija kod obrade odvajanjem čestica vezani su uz distorziju (izobličenje) i generiranje (obnavljanje) mreže konačnih elemenata. Rezultat toga mogu biti različite vrijednosti izlaznih veličina koje se dobiju za iste uvjete procesa obrade [105]. U analizi obrade odvajanjem čestica MKE postaje jedna od najčešće korištenih metoda. Početkom proučavanja primjene MKE u obradi odvajanjem čestica smatra se rad Klameckog [106] iz 1973. u kojem se prvi put predlaže 3D model nastajanja odvojene čestice. Uskoro nakon toga Usui i Shirakashi [107] 1982. razvijaju prvi 2D model ortogonalnog rezanja. Od tada se MKE sve više primjenjuje u obradi odvajanjem čestica varirajući pri tome različite parametre obrade i postavke modela. Pop i Lobonțiu [108] donose analizu primjene MKE u različitim procesima obrade, a koja se temelji na više znanstvenih radova koji su objavljeni u periodu od 2000. do 2014., slika 13.

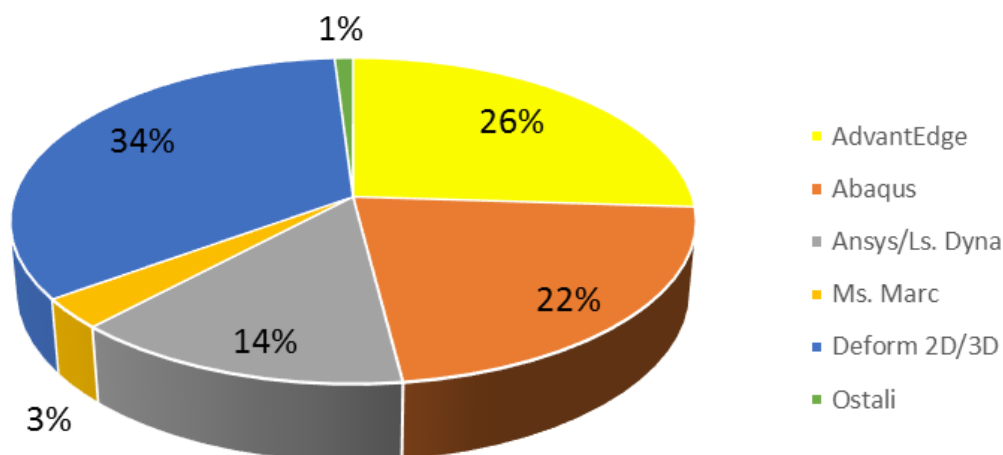


Slika 13. Pregled primjene MKE u različitim postupcima strojne obrade [108]

Mnogi istraživači navode da na rezultate simulacija temeljenih na MKE značajno utječu mnogi parametri poput načina generiranja i geometrije mreže, rubnih i dodirnih uvjeta, formulacije modela, vremenske integracije, materijalnih modela, koeficijenata trenja, kriterija nastajanja odvojene čestice [109], [110], [111].

5.2. Primjena softvera temeljenih na metodi konačnih elemenata

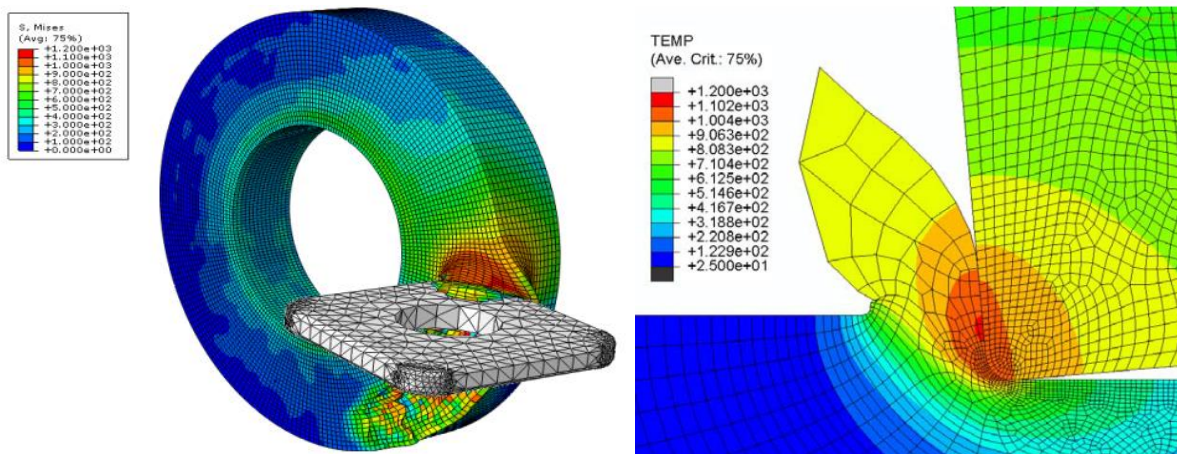
Svakodnevnim razvojem numeričkih metoda, dolazi do masovne primjene različitih računalnih softvera u području obrade odvajanjem čestica. Posljednjih 20 godina na tržištu je dostupan veliki broj softverskih paketa na bazi MKE. Najčešće korišteni računalni paketi za simulacije u području obrade odvajanjem čestica su: Abaqus/Explicit [112], Ansys/Explicit [113], Msc. Marc [114], Deform 2D/3D [115], AdvantEdge [7], Ls Dyna [116] i drugi. Ovi programi široko su prihvaćeni od strane istraživača. Pop i Lobončič [108] dali su prikaz najčešće primjenjivanih softverskih paketa za simulaciju obrada odvajanjem čestica korištenih u posljednjih petnaest godina, slika 14.



Slika 14. Zastupljenosti različitih softvera za simulaciju u obradi odvajanjem čestica [108]

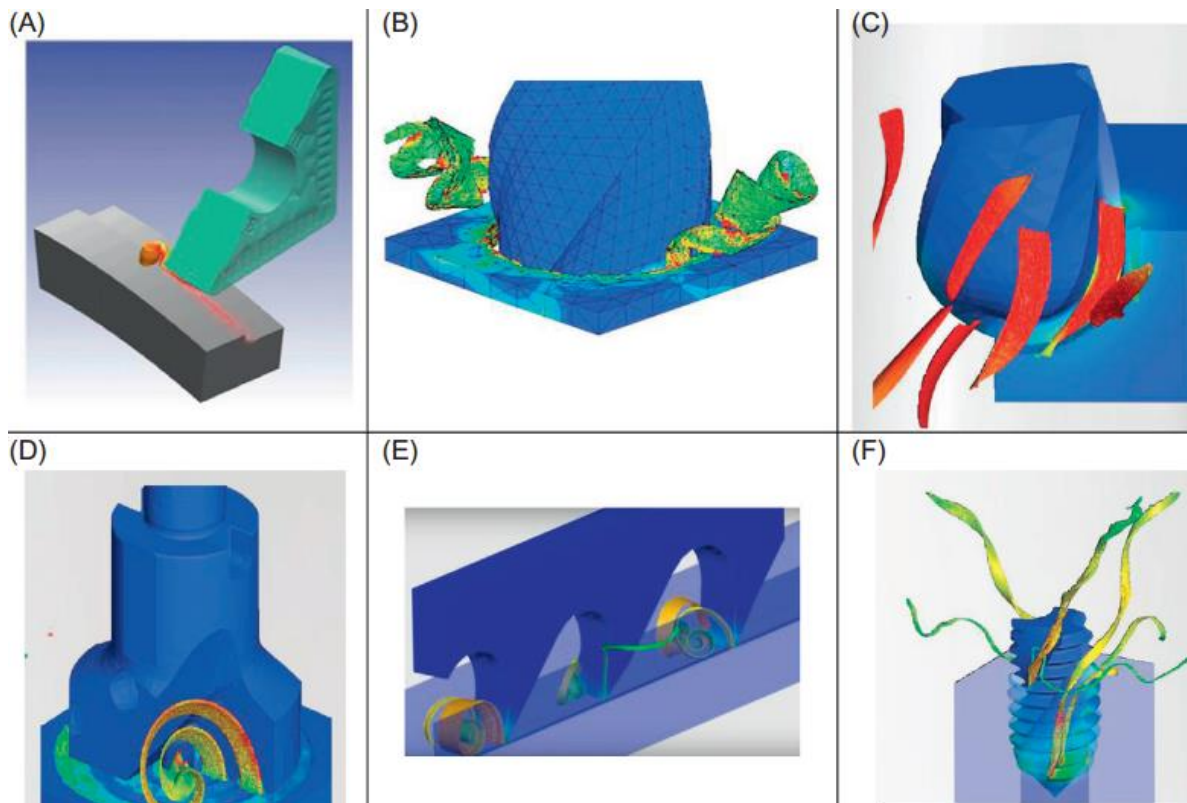
Većina navedenih paketa imaju jednostavne izbornike za definiranje graničnih uvjeta, algoritama za dodirne uvjete, automatsko umrežavanje te sadržajne baze podataka materijala. Tijekom istraživanja u literaturi uočena su ograničenja koja se mogu javiti u modelima poput toga da se problem u pojedinom modulu može riješiti samo implicitno (Deform 2D/3D) ili eksplicitno (AdvantEdge). Pravilan izbor softvera s ciljem postizanja realnih rezultata simulacije za navedene uvjete obrade podrazumijeva poznavanje prednosti i nedostataka jednog softverskog paketa u odnosu na druge. Ls Dyna ima pojedina ograničenja jer nije isključivo specijaliziran za obrade odvajanjem čestica. Prilagodljiv je i namjenski se može koristiti za obradu odvajanjem čestica, ali se najčešće primjenjuje za simulacije preoblikovanja limova. Tijekom predviđanja temperatura u zoni rezanja pomoću Ansys/Explicit najčešće se javljaju ograničenja u pogledu pravilnog umrežavanja obratka te preciznog umrežavanja reznog alata tijekom nastajanja odvojene čestice [117]. Povećanje broja konačnih elemenata s ciljem poboljšanja analize bitno utječe na povećanje vremena simulacije koje sa jako dobrim karakteristikama računala može biti i do nekoliko dana. Stoga je često analiza pomoću Ansys/Explicit paketa upitna s gledišta mogućnosti izvedivosti zadanog problema i točnosti rezultata simulacije. Softverski paket Abaqus/Explicit nema poseban modul za simulaciju obrade odvajanjem čestica pa stoga korisnik mora sam definirati alat i obradak, parametre obrade, rubne uvjete i geometriju mreže. Priprema modela za analizu zahtjeva

puno vremena i znanja od strane korisnika. U ovom slučaju omogućuje se modeliranje procesa s visokom razinom detalja rezultata simulacije, slika 15.



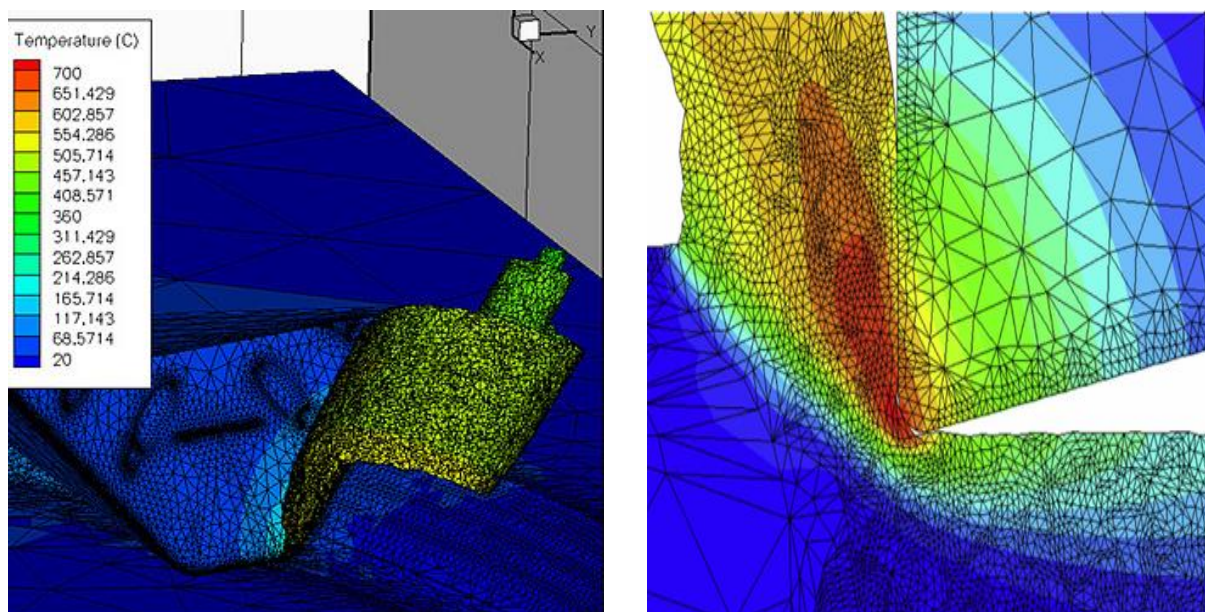
Slika 15. Primjeri 3D i 2D ABAQUS/Explicit simulacije obrade odvajanjem čestica [118],
[119]

Softverski paket AdvantEdge specijaliziran je za obrade odvajanjem čestica i može riješiti problem samo eksplicitno. Pomoću AdvantEdge-a moguće je provesti detaljnu termo-mehaničku analizu procesa obrade odvajanjem čestica. Omogućeno je adaptivno (prilagodljivo) generiranje mreže i automatsko ponovno generiranje nakon distorzije mreže uslijed nastajanja odvojene čestice. Nedostatak ovog softvera je koeficijent trenja koji je u sučelju alat/odvojena čestica konstantan i iznosi 0,5 te ga korisnik tijekom modeliranja ne može mijenjati. Nadalje, glavni nedostatak AdvantEdge softvera su pojedina ograničenja gdje korisnik ne može primijeniti samostalno definirane konstitutivne jednadžbe ili funkcije kao što je to slučaj kod Abaqus/Explicit programa koji ima veliku otvorenost ili Deform 2D/3D programa koji posjeduje određenu razinu ograničenosti. Zbog svoje otvorenosti prema korisniku AdvantEdge i Deform 2D/3D danas se često primjenjuju za analizu problema u industriji. Primjeri simulacije različitih procesa obrade odvajanjem čestica u AdvantEdge softveru prikazani su na slici 16 i slici 17.



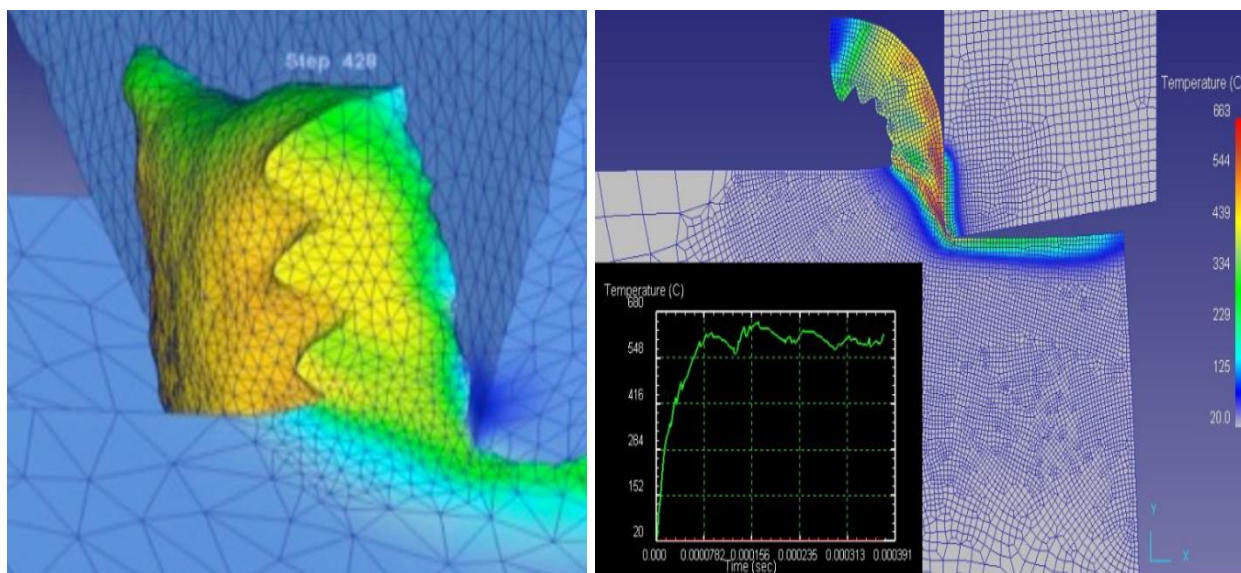
Slika 16. Primjeri 3D AdvantEdge simulacije obrada odvajanjem čestica:

- a) tokarenje, b), bušenje, c) glodanje, d) duboko bušenje, e) provlačenje, f) urezivanje navoja [120]



Slika 17. Primjeri 3D i 2D AdvantEdge simulacije obrade odvajanjem čestica [7], [121]

Deform 2D/3D je softverski paket koji sadrži modul za simulaciju obrade odvajanjem čestica. Moduli su prilagodljivi za obrade tokarenja, glodanja i bušenja. Nedostatak se ogleda u tome da softver može riješiti problem samo implicitno. Primjeri 3D i 2D DEFORM simulacije obrade odvajanjem čestica prikazani su na slici 18.



Slika 18. Primjeri 3D i 2D DEFORM simulacije obrade odvajanjem čestica [122], [123]

Sa znanstvenoistraživačke točke gledišta promatrane komercijalne softvere temeljene na MKE prati niz nedostataka koji mogu stvarati značajne prepreke i nedostatke za modeliranje procesa obrade odvajanjem čestica. Problemi mogu biti da korisnik nije u mogućnosti definirati samostalne konstitutivne jednačbe, te da baze podataka o svojstvima materijala budu ograničene i ne mogu se mijenjati. U tom pogledu korisnik nije u mogućnosti prilagođavati model s ciljem uklanjanja greške, provjere i usporedbe rezultata nastalih eksperimentalno i simuliranjem. S druge strane nedostatak se očituje kada se ukaže potreba za istraživanje i primjenu navedenih softvera za analizu novih materijala alata i obradaka. Također, jedan od nedostataka primjene navedenih softvera ogleda se u cijeni njihove licence. Pored toga 3D simulacije nastajanja odvojene čestice zahtijevaju posebnu pažnju jer značajno doprinose računalnom opterećenju i vremenu potrebnom za konačnu analizu.

5.3. Formulacija modela definiranjem graničnih uvjeta simulacije

Formulacija modela u numeričkom modeliranju predstavlja definiranje graničnih uvjeta simulacije u nekom od softverskih rješenja. Kako bi se omogućio što jasniji prikaz nastajanja odvojene čestice numerički model treba opisati niz fizikalnih pojava poput trenja, ekstremno

visokih temperatura i elastično-plastičnih deformacija u zoni rezanja. Točnost rezultata simulacija ovisi o točnosti izbora formulacije modela i kriterija nastajanja odvojene čestice. Kod simulacija temeljenih na MKE u obradi odvajanjem čestica osnovne formulacije za modeliranje kontinuuma su Eulerova, Lagrangeova i proizvoljna Lagrange-Eulerova (engl. Arbitrary Lagrange Euler ALE) formulacija, a koje povezuju mrežu konačnih elemenata i materijal obratka [124].

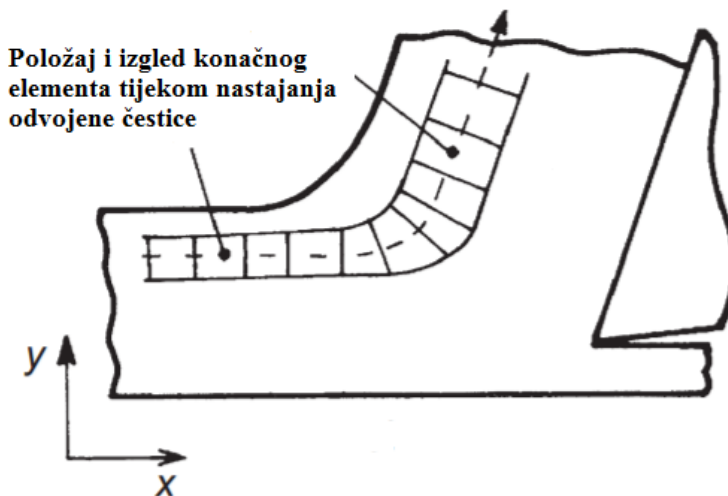
5.3.1. Eulerova formulacija modela

Eulerova formulacija podrazumijeva fiksiranu mrežu konačnih elemenata kroz koju se omogućuje tečenje materijala [125]. Eulerov pristup dozvoljava simulaciju bez unaprijed definiranog kriterija odvajanja čestice gdje se postavljaju zahtjevi za unaprijed definiran početni oblik odvojene čestice. Konačno elementna jednačba Eulerove formulacije glasi:

$$\mathbf{K}\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{R} \quad (1)$$

Gdje je: \mathbf{K} -globalna materica krutosti, $\dot{\mathbf{U}}$ - vektor brzine čvorova mreže, \mathbf{R} -vektor sila.

Prednost modela temeljenih na Eulerovoj formulaciji je nepostojanje problema distorzije konačnih elemenata budući da se njihov oblik ne mijenja tijekom simulacije i stoga nije potrebno dodatno regeneriranje mreže, slika 19.



Slika 19. Eulerova formulacija u primarnoj zoni smicanja [126]

S tog gledišta simulacije imaju znatno manji utjecaj na hardversku opterećenost sustava. Pojedini autori potvrđuju uspješnu primjenjuju Eulerove formulacije tijekom modeliranja procesa obrade odvajanjem čestica [127], [128]. Kao osnovni nedostatak navodi se primjena Eulerove

formulacije samo u slučajevima nastajanja kontinuirane odvojene čestice jer se debljina odvojene čestice, te uvjeti dodira u sučelju odvojena čestica/alat moraju zadržati konstantnima tijekom simulacije, a što isključuje mogućnost modeliranja prirodnog nastajanja odvojene čestice. Stoga su modeli temeljeni na čistoj Eulerovoj formulaciji nepogodni za realne uvjete koji se javljaju u obradi odvajanjem čestica.

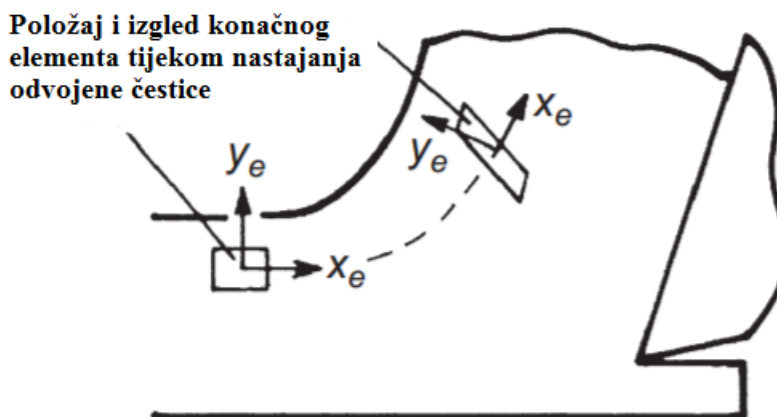
5.3.2. Lagrangeova formulacija modela

Lagrangeova formulacija podrazumijeva mrežu konačnih elemenata vezanu za materijal obratka. Tijekom nastajanja odvojene čestice konačni elementi se deformiraju zajedno s materijalom. Zbog prirodnijeg nastajanja odvojene čestice u obradi odvajanjem čestica Lagrangeova formulacija poželjnija je od Eulerove. Konačno elementna jednadžba Lagrangeove formulacije glasi:

$$\mathbf{Ku} = \mathbf{R} \quad (2)$$

Gdje je: \mathbf{K} -globalna materica krutosti, \mathbf{u} - vektor pomaka čvorova mreže, \mathbf{R} -vektor sila.

Nedostatak Lagrangeove formulacije nalazi se u ekstremnoj distorziji konačnih elemenata koja nastaje uslijed velike plastične deformacije, zbog čega je potrebno često ponovno regeneriranje kako nebi dolazilo do prekida simulacije, slika 20. Zbog toga se značajno povećava računaska složenost, i vrijeme obrade podataka, a što može negativno utjecati na točnost same analize.



Slika 20. Lagrangeova formulacija u primarnoj zoni smicanja [126]

Lagrangeova formulacija nastajanja odvojene čestice u početku se temeljila na razdvajanju čvorova ispred rezne oštrice alata uzduž unaprijed definirane linije koja predstavlja dubinu rezanja. Nedostatak u ovom pogledu može se očitovati kroz odstupanja u rezultatima simulacije ukoliko se ne ostvari pravilno razdvajanje čvorova duž zamišljene linije.

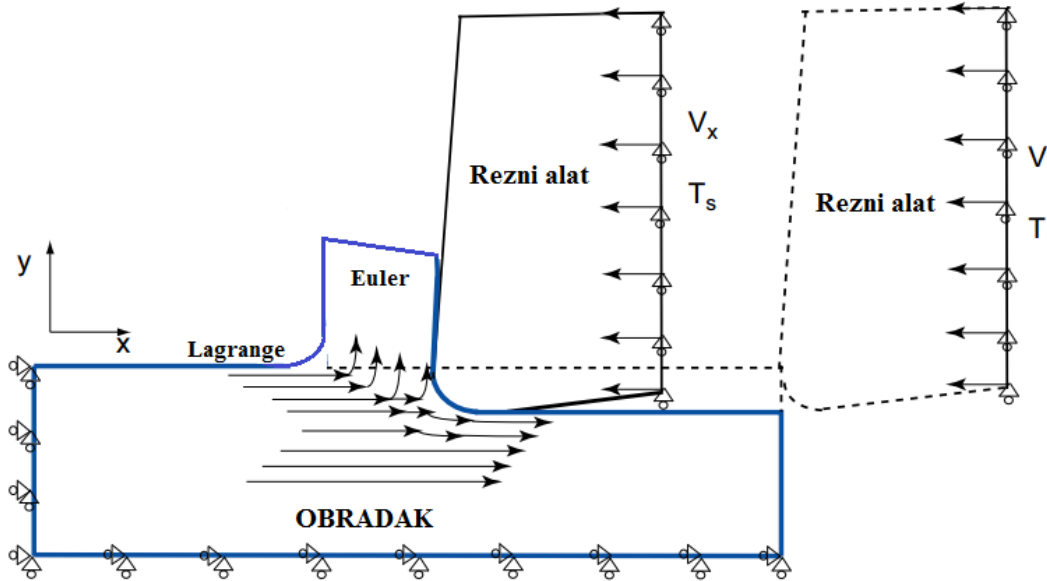
5.3.3. Proizvoljna Lagrange-Eulerova formulacija

ALE formulacija se može opisati kao pristup koji sjedinjuje Lagrangeovu i Eulerovu formulaciju kako bi se iskoristile njihove pojedinačne prednosti i eliminirali navedeni nedostaci. Konačno elementna jednadžba ALE formulacije glasi:

$$\mathbf{K}^m \mathbf{v} + \mathbf{K}^g \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{R} \quad (3)$$

Gdje je: \mathbf{K}^m - matrica krutosti brzine materijala, \mathbf{K}^g - matrica krutosti brzine mreže, \mathbf{v} - vektor brzine materijala u čvorovima, $\hat{\mathbf{v}}$ vektor brzine mreže u čvorovima, \mathbf{R} -vektor sila.

U ALE formulaciji, mreža konačnih elemenata se giba proizvoljno u odnosu na materijal, odnosno nije vezana prostorno za materijal obratka. Kriterij nastajanja odvojene čestice je izostavljen, a problem ekstremne distorzije konačnih elemenata odvija se bez potrebe za čestim regeneriranjem mreže. Za simulacije u obradi odvajanjem čestica, ALE formulacija podrazumijeva primjenu Eulerovog pristupa za modeliranje područja oko rezne oštrice alata s adaptivnom (prilagodljivom) mrežom, dok se Lagrangeov pristup koristi za modeliranje neprisilnog tečenja materijala na slobodnim granicama. ALE pristup nastajanja odvojene čestice prikazan je na slici 21.

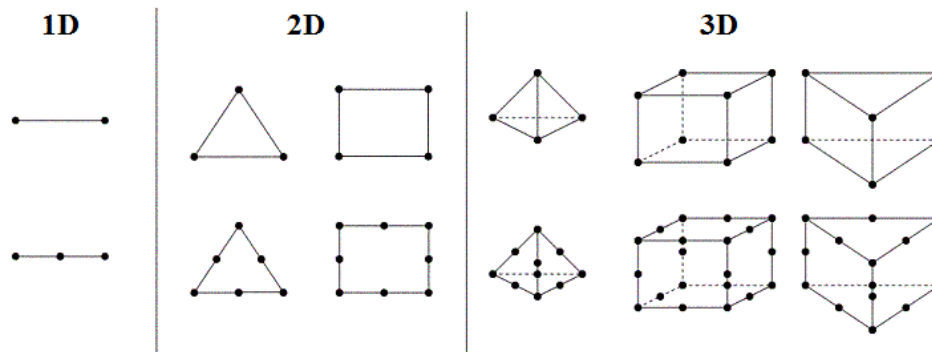


Slika 21. Eulerovi i Lagrangeovi granični uvjeti u ALE formulaciji modela [129]

U ovom slučaju odvojena čestica nastaje kao funkcija deformacije materijala, te su izbjegnute ozbiljne distorzije konačnih elemenata bez potrebe za ovim regeneriranjem mreže [130]. Vremenska integracija numeričkog modela predstavlja važan parametar koji je vezan uz izbor softverskog paketa i formulacije modela konačnim elementima. Za rješavanje problema simulacijama obrade odvajanjem čestica primjenjuju se implicitne i eksplicitne vremenske integracije. Primjena implicitne vremenske integracije podrazumijeva rješavanje problema skupa algebarskih jednadžbi ponavljanjem i usporedbom rješenja za svaki vremenski korak. Eksplicitna vremenska integracija podrazumijeva približno rješenje nastalo u prethodnom vremenskom koraku bez dodatnog ponavljanja za svaki naredni korak. Rezultat toga je da se implicitnom vremenskom integracijom mogu postići veće točnosti rješenja za pojedini vremenski korak u odnosu na eksplicitnu. Nedostatak implicitnih algoritama su problemi s usporedbom rješenja tijekom velikih deformacija i distorzije odvojene čestice pri čemu je potreban veliki broj ponavljanja rješenja za svaki naredni korak, a posebno u slučajevima kada je potrebna primjena ili izmjena različitih rubnih uvjeta simulacije. Nasuprot tome, pristupi temeljeni na eksplicitnim algoritmima vremenske integracije uspješno rješavaju navedene probleme tijekom nelinearnih uvjeta nastajanja odvojene čestice. Vremenski korak im je znatno manji od implicitnih te im se daje prednost s obzirom na manju računalnu opterećenost sustava tijekom simuliranja obrade odvajanjem čestica.

5.4. Adaptivnost i generiranje mreže

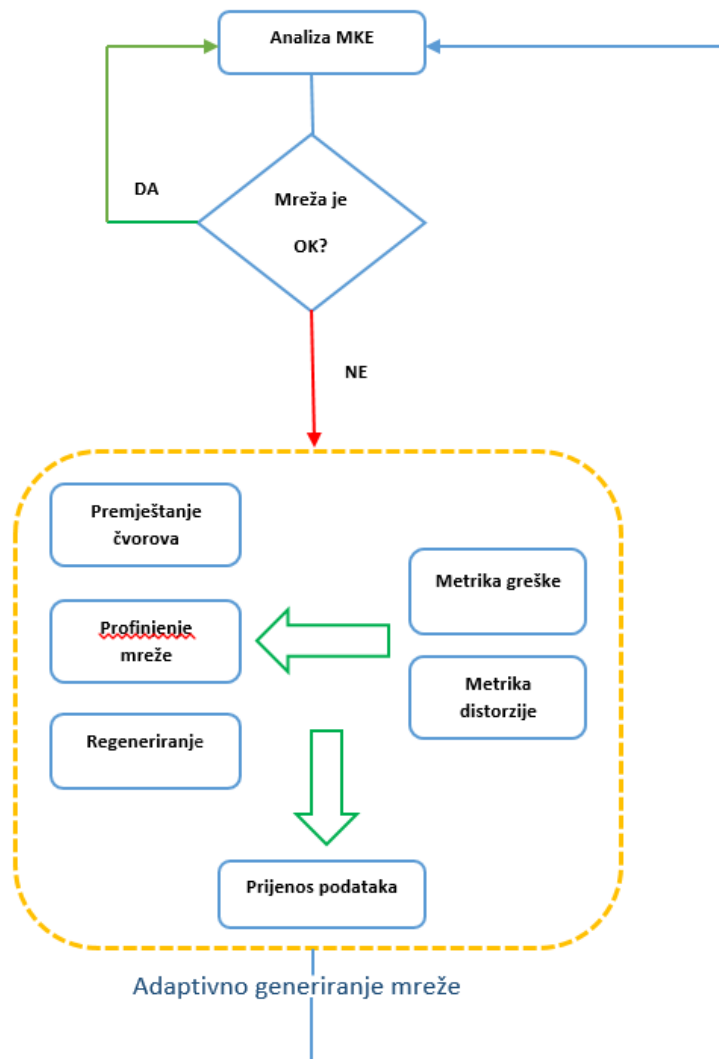
Prvi korak u analizi primjenom MKE je diskretizacija modela koja podrazumijeva podjelu modela s neograničenim brojem stupnjeva slobode na model koji će imati konačan broj elemenata, a samim tim i stupnjeva slobode. Vrsta konačnih elemenata se određuje zavisno od vrste problema koji se analizira i mogu se podijeliti u jednodimenzijske, dvodimenzijske i trodimenzijske konačne elemente. Pored toga, konačni elementi mogu biti različiti oblici, linije, površine ili volumeni, slika 22.



Slika 22. Različiti geometrijski oblici konačnih elemenata [131]

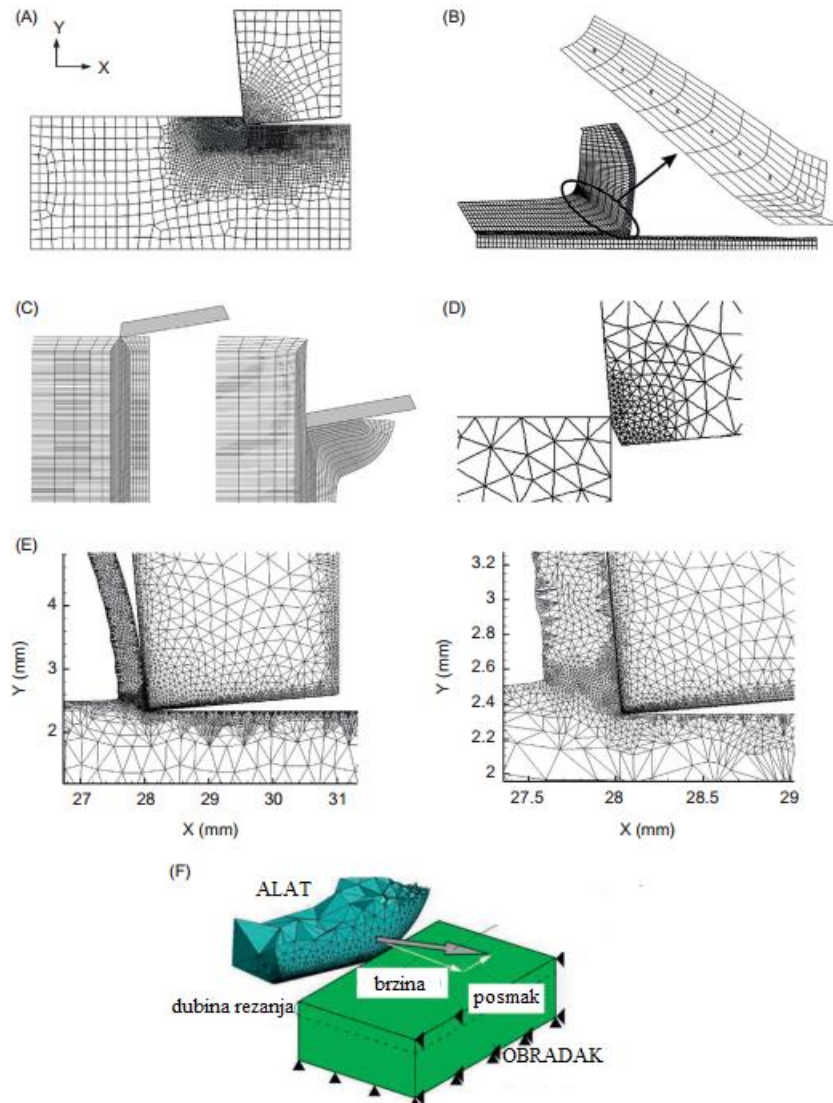
Distorzija konačnih elemenata koja se javlja zbog velike plastične deformacije materijala jedan je od osnovnih problema simulacije obrade odvajanjem čestica. Distorzija uzrokuje numeričke pogreške koje značajno utječu na točnost rezultata analize. Za poboljšanje kvalitete mreže koriste se različite tehnike: h-adaptivnost, p-adaptivnost i r-adaptivnost. H-adaptivnost, mijenja gustoću mreže profinjenjem ili razrjeđivanjem prema pokazatelju greške. Postojeći elementi se dijele ili spajaju po principu izvornog izgleda mreže. Kod novonastale mreže povezanost između čvorova je promijenjena jer dolazi do promjene broja konačnih elemenata. P-adaptivnost, povećava stupanj interpolacijskog polinoma konačnog elementa što omogućava točniji prikaz gradijenata u mreži odnosno povećava točnost rješenja. Nedostatak joj je što onemogućuje smanjenje distorzije mreže. Pomoću R-adaptivnosti, čvorovi mreže se premjeste u područje većih deformacija, odnosno u područje nastajanja odvojene čestice pri čemu povezanost između čvorova ostaje nepromijenjena. Nedostaci joj se ogledaju kroz ograničenja u pogledu poboljšanja mreže [109]. Razvoj računala omogućio je primjenu adaptivne mreže koja je od ključnog značaja za postizanje pouzdanih numeričkih rješenja. Adaptivna mreža definira se lokalnim izmjenama na postojećoj mreži ili nastajanjem nove mreže na definiranom modelu. Primjena adaptivne mreže omogućava simulaciju nastajanja oblika i veličine odvojene čestice pomoću plastičnog tečenja materijala bez potrebe

definiranja kriterija odvajanja i unaprijed definirane linije razdvajanja. Postupak adaptivnog generiranja mreže prikazan je na slici 23.



Slika 23. Postupak adaptivnog umrežavanja [109]

Adaptivno generiranje mreže može koristiti način generiranja gdje se postojeća distorzirana mreža zamjenjuje novom. Na slici 24. prikazane su mreže konačnih elemenata nastale generiranjem tijekom simuliranja postupaka obrade odvajanjem čestica u različitim softverskim paketima.



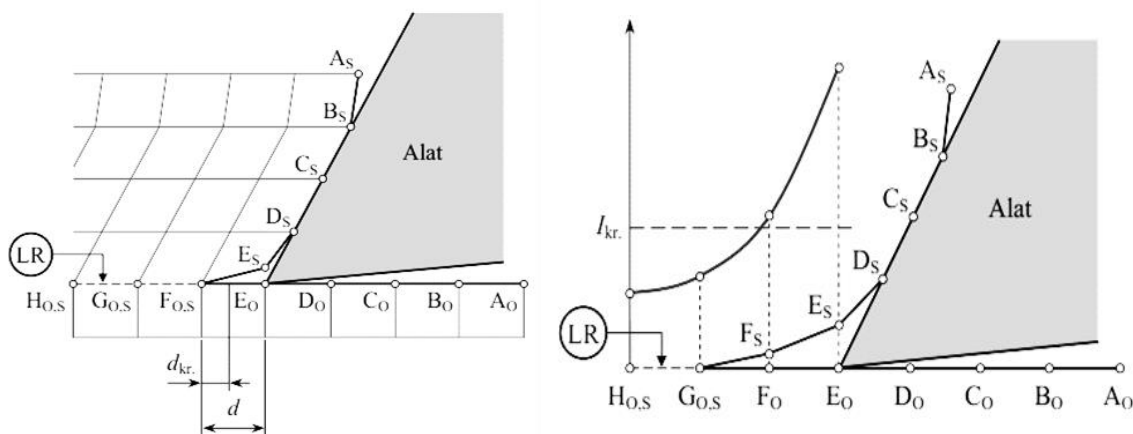
Slika 24. Mreže konačnih elemenata nastale u različitim softverima: a) Deform 2D [132], b) Abaqus [133], c) I-Form 2 [134], d) Forge 2 [135], e) i f) AdvantEdge [136]

Cherouat i suradnici [137] su uspješno koristili adaptivni postupak umrežavanja u 2D simulacijama pri tokarenju. Zhang i ostali [138] su predložili 3D model s naprednim postupkom adaptivnog umrežavanja koji je uspješno simulirao nastajanje odvojene čestice tijekom tokarenja. Ovakav pristup poboljšava točnost simulacije. Nedostatak se očituje u potrebi za boljim hardverskim rješenjem jer se povećava računaska složenosti i vrijeme trajanja simulacijske analize.

5.5. Kriterij nastajanja odvojene čestice

Proces nastajanja odvojene čestice ostvaruje se pri velikim lokalnim plastičnim deformacijama obratka. Uslijed velike količine generirane topline u zoni rezanja se javljaju složena naprezanja i

deformacije. Simulacije nastajanja odvojene čestice mogu biti s unaprijed definiranom linijom razdvajanja i bez nje. Postoje brojni kriteriji za predviđanje oblika odvojene čestice u numeričkim metodama koji se mogu podijeliti na geometrijske ili fizikalne. Odnosno mogu biti definirani s kriterijem odvajanja koji je vezan uz Lagrangeovu formulaciju i s modelskom realizacijom. Prema geometrijskom kriteriju nastajanje odvojene čestice počinje u trenutku kada vrh rezne oštrice alata prilazi čvoru duž linije razdvajanja unutar definirane kritične udaljenosti. Kada udaljenost između vrha oštrice alata i čvora postane jednaka ili manja od kritične nastaje novi čvor, a što je i pokazatelj nastajanja odvojene čestice. Kritična vrijednost definira se proizvoljno, a da bi se osigurali realni numerički rezultati moguće ju je kontrolirati. Nastajanje odvojene čestice temeljeno na fizikalnom kriteriju javlja se kada je dostignuta unaprijed definirana kritična vrijednost jednog od definiranih fizikalnih parametara. Najčešće su to deformacije ili naprezanja u čvoru ili konačnom elementu u zavisnosti od svojstava materijala obratka i parametara obrade. Fizikalni kriteriji nastajanja odvojene čestice su prihvatljiviji od geometrijski budući da se temelje na mjerljivim fizikalnim svojstvima materijala obratka. Osnovni problem fizikalnog kriterija je utvrditi stvarne kritične vrijednosti za promatrane uvjete. Ovaj kriterij često je predmet kritike zbog činjenice da se ponekad dogodi ranije izdvajanje čvora što dovodi do stvaranja velike pukotine ispred vrha oštrice alata. Geometrijski i fizikalni kriterij nastajanja odvojene čestice prikazani su na slici 25.



Slika 25. Nastajanje odvojene čestice temeljeno geometrijskom i fizikalnom kriteriju [139]

Vijayaraghavan i suradnici [140] pomoću Abaqus/Explicit programa uspješno primjenjuju simulacije temeljene na MKE s ciljem predviđanja sila i potrošnje energije tijekom tokarenja Inocel 718 legure. U radu je prikazano da odvojena čestica nastaje na principu unaprijed definirane linije razdvajanja koja predstavlja dubinu rezanja. Huang i Black [141] u svom radu su pokazali

da geometrijski kriteriji uzrokuju ranije razdvajanje čvorova u početnoj fazi, a fizikalni kriteriji rezultiraju kasnijim odvajanjem čvorova tijekom stabilnog stanja. Da bi riješili navedeni problem, autori su predložili algoritam koji bi kombinirao geometrijske i fizikalne kriterije za točniju simulaciju nastajanja odvojene čestice. U tablici 2 prikazana je nekolicina kriterija nastajanja odvojene čestice.

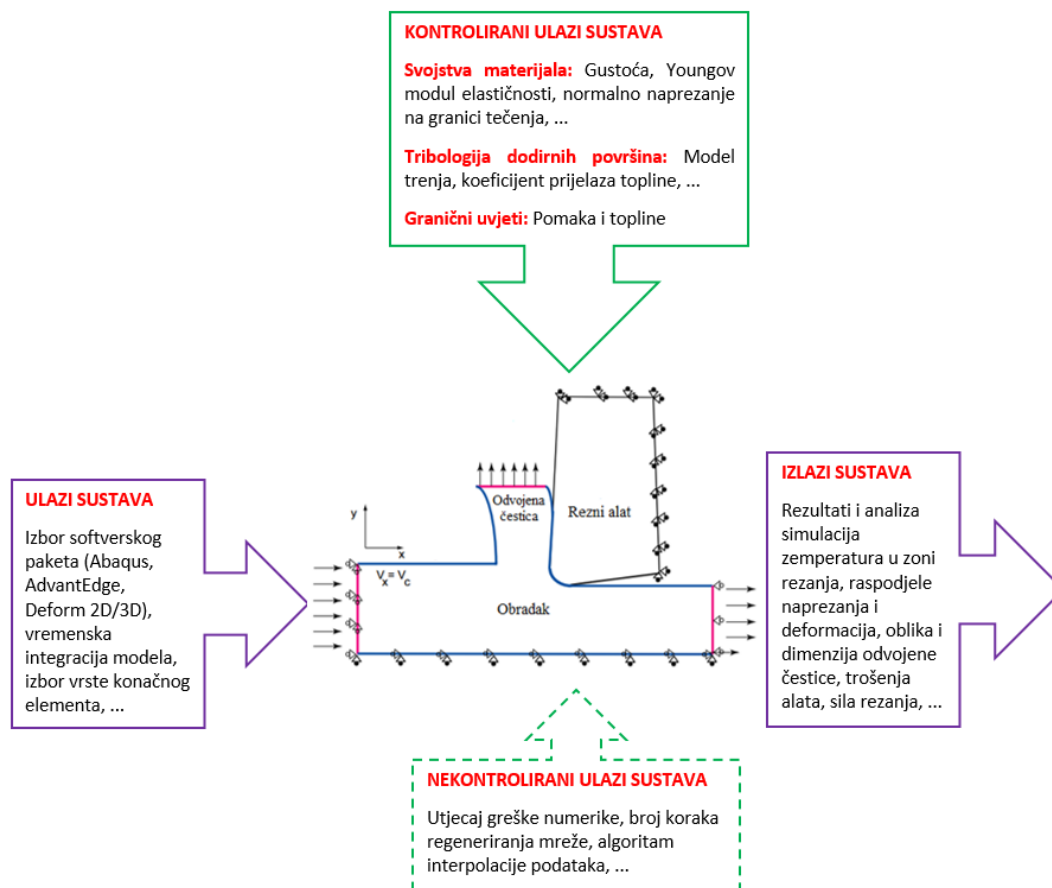
Tablica 2. Kriteriji nastajanja odvojene čestice.

Kriterij	Matematički opis	Izvor
<i>Razmak čvorova</i>	$d = d_{kr}$	[142], [143], [114]
<i>Ekvivalentna plastična deformacija</i>	$I_{kr} = \varepsilon$	[144], [145], [146]
<i>Gustoća energije deformacije</i>	$I_{kr} = \int \sigma d\varepsilon$	[147], [148], [149]
<i>Brozzo i ostali</i>	$I_{kr} = \int \left[\left(\frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_H)} \right) \right] d\varepsilon$	[150]
<i>Oskada i ostali</i>	$I_{kr} = \int (\varepsilon + b_1\sigma_H + b_2) d\varepsilon$	[151]
<i>Cockroft-Latham</i>	$I_{kr} = \int \frac{\sigma_1}{\sigma_T} d\varepsilon$	[152]

Bill i suradnici [153] su uspoređivali tri različita numerička modela u Msc. Marc, Deform 2D i AdvantEdge softveru tijekom tokarenja čeličnog obratka oznake C15. U simulacijama pomoću Msc.Marc i AdvantEdge-a softvera, nema definiranog kriterija razdvajanja jer tijekom simulacije odvojene čestice dolazi do kontinuiranog generiranja mreže konačnih elemenata. Tijekom simulacija pomoću Deform 2D primjenjen je Cockroft-Latham kriterij odvajanja čestice. Rezultati pokazuju da niti jedan model nije postigao zadovoljavajuću povezanost sa svim zadanim parametrima simulacije. Rezultat toga su značajna odstupanja jednih u odnosu na druge uspoređujući s eksperimentalnim vrijednostima. Pojedini softveri bazirani na MKE u svojim modulima ograničavaju mogućnost izbora kriterija nastajanja odvojene čestice te zahtijevaju da se napišu vlastiti algoritmi.

6. DEFINIRANJE NUMERIČKOG MODELA PROCESA OBRADE ODVAJANJEM ČESTICA

Pored ulaznih parametara obrade, vrste i geometrije materijala obratka i alata na rezultate numeričkih simulacija metodom konačnih elemenata značajno utječu mehaničke, toplinske i kemijske karakteristike materijala, uvjeti trenja na dodirnim površinama, kao i granični uvjeti pomaka i topline na temelju kojih se postižu pouzdaniji rezultati za navedene uvjete obrade, slika 26.



Slika 26. Utjecajni parametri na modeliranje procesa obrade odvajanjem čestica

Jedna od najbitnijih stavki u simulacijama obrade odvajanjem čestica jest modeliranje toka naprezanja materijala. Tijekom obrade materijal je pri uvjetima visokih naprezanja i temperatura izložen učestalim elastično-plastičnim deformacijama. Kako bi se dobili odgovarajući rezultati model materijala koji se koristi trebao bi na pravi način opisati ponašanje materijala tijekom nastajanja deformacije, odnosno odvojene čestice. Stoga od točnosti podataka za normalno naprezanje na granici tečenja σ_T materijala obratka značajno zavisi ishod rezultata simulacija. Ovi

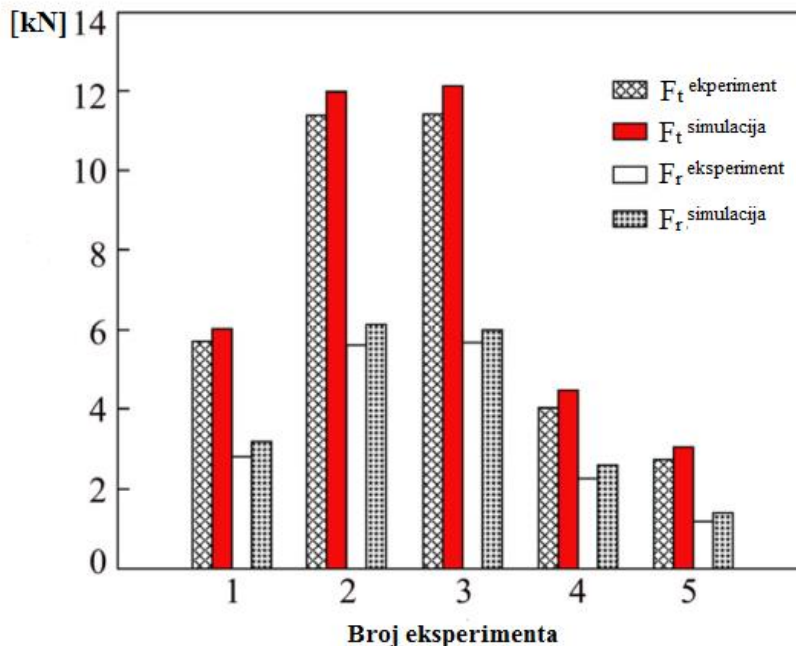
se podaci postižu u uvjetima velikih plastičnih deformacija $\epsilon \approx 10$ i brzina deformacije $\dot{\epsilon} \approx 10^6$ s⁻¹ te visokih temperatura θ čije vrijednosti dosežu do 1000 °C. Za provjeru podataka materijalnog modela najčešće se koriste SHPB (engl. Split-Hopkinson Pressure Bar) pokusi [34]. U istraživanjima u literaturi koriste se različiti materijalni modeli, a najčešće primjenjivani u simulaciji obrade odvajanjem čestica prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Materijalni konstitutivni modeli

Materijalni model	Matematički opis	Konstante	Izvor
<i>Usui i ostali</i>	$\sigma = B \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^M e^{-kT} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^m \left\{ \int_{Path} e^{KTjN} \left[\frac{\dot{\epsilon}}{1000} \right]^{-mjN} d\epsilon \right\}^N$	$M, j, N, m,$ T	[154]
<i>Oxley</i>	$\sigma = \sigma_1 \epsilon^n$	n	[155]
<i>Johnson-Cook</i>	$\sigma_T = (A + BC^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta - \theta_t} \right)^m \right]$	$A, B, C, m,$ n	[156]
<i>Zerilli-Armstrong</i>	$\sigma = C_0 + C_1 \exp[-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}] + C_5 \epsilon^n$ $\sigma = C_0 + C_2 \epsilon^n \exp[-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}]$	$C_0,$ $, C_1, C_3, C_4,$ C_5, n	[157]

Chandrasekaran i suradnici [158] navode da je SHPB test polazna točka za identifikaciju Johnson-Cookovih materijalnih parametara. Mnogi autori [132], [159], [124] navode da uspješno koriste Johnson-Cookovu konstitutivnu jednadžbu pri modeliranju materijala obratka. Childs [160] na temelju analize više znanstvenih radova donosi zaključak da konstitutivni materijalni modeli daju slične brojčane vrijednosti normalnog naprežanja u primarnoj zoni smicanja pri visokim temperaturama, uspoređujući sa sekundarnom zonom. Autor ističe da se razlika može pripisati činjenici da u sekundarnoj zoni postoji i dodatno vanjsko zagrijavanje zbog intenzivnog trenja na dodirnim površinama između alata i odvojene čestice. Jagadesh i Samuel [161] prikazuju modeliranje i simuliranje postupka obrade tokarenja Ti-6Al-4V legure koja se obrađuje tvrdim alatom s TiN/AlTiN prevlakama. Johnson-Cookov materijalni model izabran je za modeliranje nastajanja odvojene čestice. Simulacije sila i temperatura rezanja izvedene su pomoću Deform 3D softverkog paketa. Eksperimenti su provedeni varirajući ulazne parametre obrade brzine, dubine i posmaka. Autori navode da radijus vrha oštrice alata značajno utječe na rezultate sila rezanja. Pri visokim brzinama rezanja dominantan je utjecaj temperatura koje se zadržavaju na obratku pri čemu omekšavaju materijal. Fu i suradnici [162] kroz pet skupova različitih vrijednosti ulaznih

parametara obrade brzine, posmaka, dubine i kuta rezne oštrice testiraju Johnson-Cookov materijalni model. Parametri materijalnog modela odnose se na leguru aluminij/bronca/nikal i dobiveni su pomoću SHPB pokusa. Da bi se potvrdila točnost Johnson-Cookovog modela autori su simulirali postupak obrade tokarenjem u AdvantEdge softveru. Rezultati simulacije potvrđuju odstupanje vrijednosti sila rezanja u iznosu od 15 % u odnosu na eksperimentalne rezultate, slika 27.



Slika 27. Eksperimentalne i simulirane vrijednosti sila rezanja [162]

Autori tvrde da navedena razlika ukazuje da su parametri Johnson-Cookovog materijalnog modela za navedenu leguru prihvatljivi. Zebala i Słodki [163] simulacijama predviđaju naprezanja i temperature tijekom obrade Inocel 718 legure postupkom tokarenja. Rezultati simulacije u AdvantEdge-u su pokazali da utjecaj radijusa rezne oštrice značajno utječe na raspodjelu naprezanja i temperatura u reznom alatu. Autori navode da je razlika između simuliranih i izmjerenih vrijednosti sila rezanja bila ispod 21 % što prema zaključcima u dovoljnoj mjeri potvrđuje prihvatljivost simulacijskih rezultata. Calmaz i ostali [164] navode da je glavni razlog neusklađenosti između numeričkih i eksperimentalnih rezultata sila rezanja pravilan odabir parametara Johnson-Cookovog materijalnog modela. Autori primjenjuju izmijenjeni konstitutivni model i implementiraju ga u Forge 2D konačnu analizu nastajanja odvojene čestice prilikom obrade titanovih legura. Potvrđeno je da se predloženim materijalnim modelom postižu prihvatljivi

rezultati između izmjerenih i predviđenih vrijednosti geometrije odvojene čestice, temperatura i sila rezanja. Irfan [165] u svom radu uspoređuje sile rezanja, naprezanja i geometriju odvojene čestice dobivene numeričkim i eksperimentalnim putem pri bušenju obratka od Al7075-T6. Varirani parametri su tri različita posmaka 0,05 mm/o, 0,1 mm/o, 0,2 mm/o i četiri različite brzine rezanja 60 m/min, 90 m/min, 120 m/min, 150 m/min. 3D model konačnog elementa simuliran je u Deform 3D softveru. Materijalni model se temelji na Johnson-Cookovim parametrima. Rezultati pokazuju podudarnost od 80 % do 90 % između rezultata dobivenih eksperimentalno i simulacijama. Autor navodi da je postotak podudarnosti u pogledu geometrije odvojene čestice između 83 % i 93 %. Također, autor tvrdi da se povećanjem brzine rezanja značajno smanjuju sile rezanja. Umbrello i ostali [132] su proučavali pet različitih konstanti Johnson-Cookovog materijalnog modela, te ih primijenili tijekom tokarenja AISI 316L legure. Autori su uspješno predvidjeli sile rezanja, raspodjelu temperature i zaostalih naprezanja. Ucin i ostali [166] tvrde da se tijekom mikroglodanja Inocel 718 legure primjenom Deform 2D softvera i Johnson-Cookovog modela uspješno predviđaju sile, temperature i debljina odvojene čestice. Rezultati pokazuju da se najveće odstupanje između numeričkih i eksperimentalnih rezultata javlja kod predviđanja debljine odvojene čestice i to pri većim posmacima. Potvrđeno je da su predviđanja temperatura točna u iznosu od 92 % do 95 %, a sila rezanja između 77 % i 94 % u odnosu na eksperimentalne rezultate. Thepsonthi i Özel [167] razvijaju 3D numerički model čeonog mikroglodanja Ti-6Al-4V legure pomoću neobloženog WC/Co alata s tri različita radijusa vrha alata 3 μm , 6 μm , i 12 μm . Pomoću Deform 3D softvera predviđaju se oblik odvojene čestice, sile i temperature rezanja. Autori tvrde da su na temelju rezultata simulacije temperatura rezanja uspješno predvidjeli i područja gdje je rezna oštrica najviše izložena trošenju. Također, može se uočiti da se s velikom točnošću predviđa i oblik odvojene čestice za sva tri radijusa vrha alata, a što je teže izvedivo za slučaj 2D simulacija. Pored toga, autori ističu jako malu zastupljenost 3D numeričkog modeliranja mikroglodanja. Razlog se pripisuje složenosti 3D modeliranju odvojene čestice, detaljima vezanim uz materijalni model i načina generiranja mreže od kojih značajno ovisi točnost numeričkog modela.

Pored materijalnih modela na rezultate simulacije značajno utječe izbor modela trenja od kojeg zavisi iznos generirane topline u dodirnoj zoni i normalna naprezanja između alata i obratka u sekundarnoj zoni smicanja. Ono je važno kako bi model što prikladnije opisao proces i predvidio izlazne karakteristike procesa. Sedeh i ostali [168] su potvrdili da se Johnson-Cookovim modelom

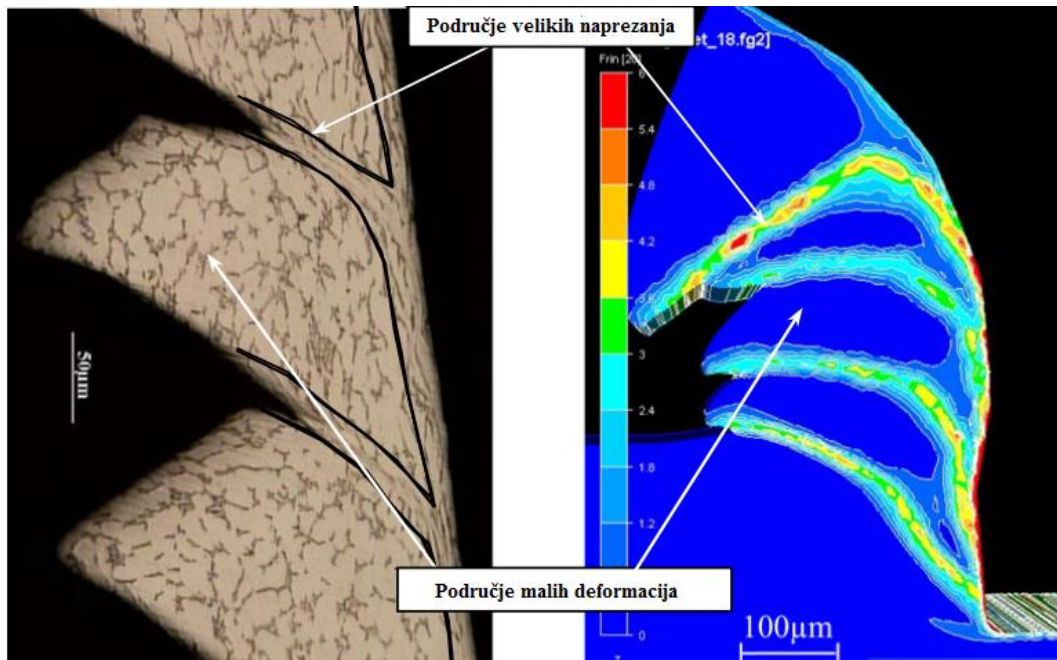
točnije predviđa debljina odvojene čestice, sile i temperature u zoni rezanja u usporedbi s Oxley modelom. Nekoliko različitih modela trenja predloženo od strane istraživača prikazano je u tablici 4.

Tablica 4. Modeli trenja u simulacijama obrada odvajanjem čestica

Model trenja	Matematički opis	Izvor
<i>Coulomb</i>	$\tau = \mu\sigma$	-
<i>Zorev</i>	$\tau = \begin{cases} k, 0 \leq l \leq l_c \\ \mu\sigma, l > l_c \end{cases}$	[169]
<i>Usui</i>	$\tau = k \left[1 - \exp - \frac{\mu\sigma}{k} \right]$	[170]
<i>Childs</i>	$\tau = mk \left[1 - \exp - \left(\frac{\mu\sigma}{k} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}$	[171]
<i>Yang i Liu</i>	$\tau = \sum_{k=0}^4 \mu_k \sigma^k$	[146]
<i>Iwata i ostali</i>	$\tau = \frac{H_V}{0.07} \tan \left(\frac{\mu\sigma}{\frac{H_V}{0.07}} \right)$	[151]

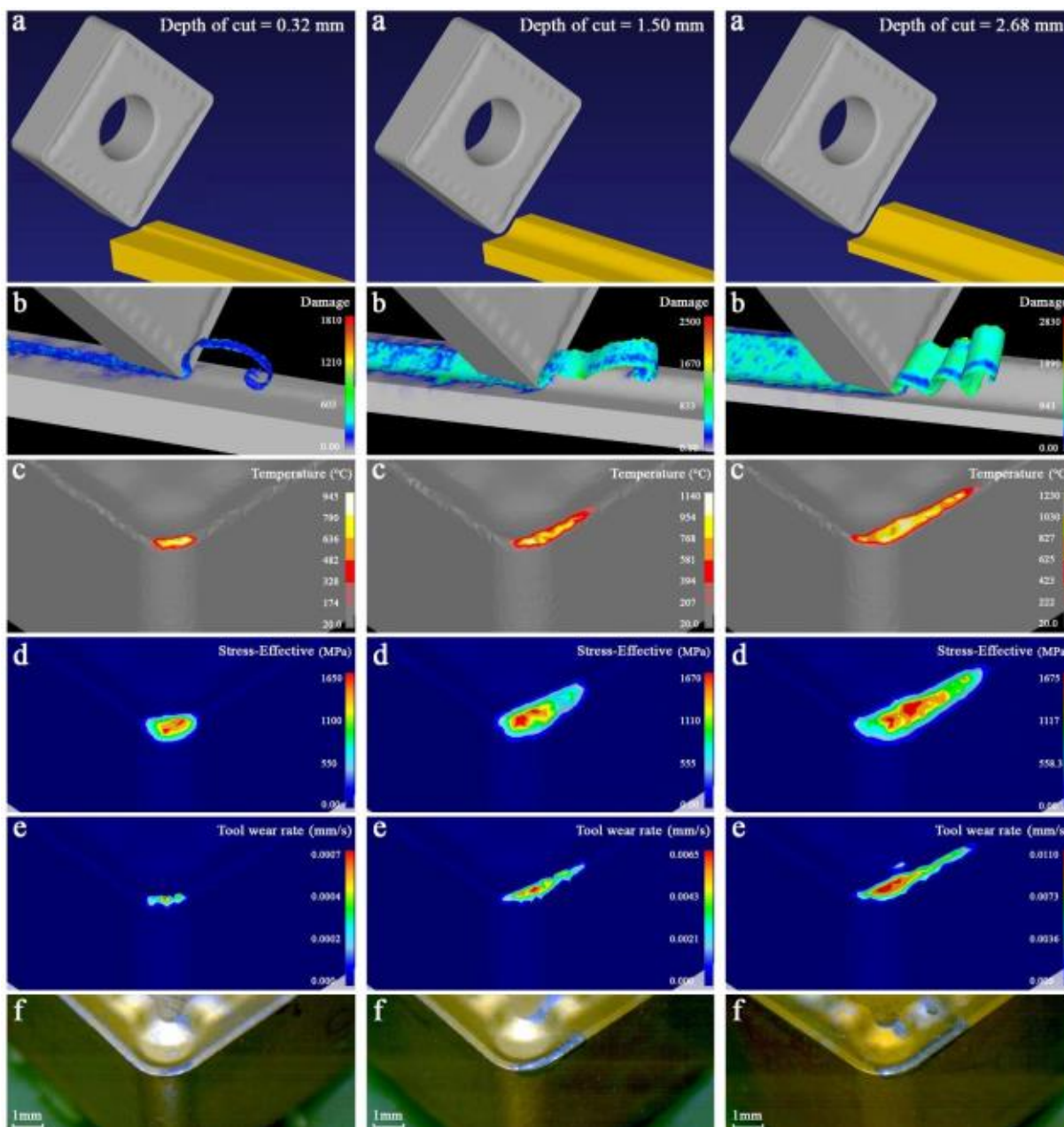
Nekoliko autora [172], [115], [173] prikazuje usporedbu odabranih modela trenja koji pokazuju njihov utjecaj na simulacije obrade tokarenjem AISI 1045 i AISI 4140 čelične legure. Shet i Deng [174] u svom radu donose zaključak da trenje između alata i odvojene čestice ima značajan utjecaj na naprezanje u dodirnoj zoni tijekom obrade tokarenjem. Agmell i suradnici [175] tvrde da problematika izbora modela trenja još uvijek ovisi o jednostavnosti i pristupu osobe koja modelira proces obrade odvajanjem čestica, jer mehanizmi koji čine ove modele trenja različitim još uvijek nisu u potpunosti objašnjeni. Filice i suradnici [172] tijekom analize svih navedenih modela trenja iz tablice 4. donose zaključak da tijekom 2D simulacije postupka obrade tokarenjem ne dolazi do značajnih odstupanja u rezultatima simulacije s obzirom na izbor modela trenja. Rezultati simulacije temperatura i sila rezanja nalaze se u beznačajnim granicama odstupanja jednih od drugih. Niesłony i suradnici [176] u svom radu primjenjuju programski paket AdvantEdge za modeliranje i simulaciju čeonog glodanja Ti-6Al-4V legure. Autori primjenjuju glodalo sa šest reznih oštrica od tvrdog metala obloženog troslojnom TiAlN prevlakom. Tijekom analize MKE primijenjeni su Oxley i Johnson-Cookov materijalni modeli. Simulacijama su dobivene i analizirane sile i temperature u zoni rezanja. Autori navode da su rezultati sila rezanja u skladu s

eksperimentalnim podacima kod simulacija sa Johnson-Cookovim modelom. Isto vrijedi za temperature u zoni rezanja koristeći Oxley model. Autori navode da se izbor prikladnijeg konstitutivnog modela može potvrditi širim rasponom ulaznih parametra obrade i većim brojem eksperimenata na temelju kojih bi se potvrdila točnost modela. Malakizadi i suradnici [177] su pomoću Deform 3D softvera uspješno razvili numerički model za predviđanje trošenja alata tijekom tokarenja otvrdnutog čelika 20MnCrS5 neprevučnim tvrdim alatom. Lazoglu i suradnici [178] uspješno razvijaju numeričko analitički model na temelju kojeg uspješno predviđaju temperature rezanja tijekom bušenja Ti-6Al-4V legure. Gok [179] tvrdi da je variranjem različitih koeficijenta prijenosa topline i koeficijenta trenja između alata i odvojene čestice dobio numerički model na temelju kojeg je potvrdio eksperimentalne podatke temperatura i sila rezanja tijekom tokarenja AISI 1045 legure tvrdim WC alatom. Simulacije su provedene u Deform 3D softveru. Mamedov i Lazoglu [180] uspješno primjenjuju 3D numerički model za predviđanje temperatura tijekom mikrogodanja Ti-6Al-4V legure. Na temelju rezultata simulacije autori zaključuju da pored temperatura u zoni rezanja na trošenje alata značajno utječu naprezanja i dimenzijska točnost alata i obratka. Rezultati pokazuju da predviđena temperatura u zoni rezanja odstupa samo 12 % od temperatura dobivenih eksperimentalnim putem. Calamaz i ostali [181] navode da su pravilan izbor materijalnog modela i koeficijenta trenja od ključnog značaja za točna predviđanja rezultata izlaznih karakteristika numeričkim simulacijama. Rezultati istraživanja su pokazali da vrijednosti sila rezanja ne ovise isključivo od trenja na dodirnim površinama kao što se odnosi na temperaturu i naprezanja u dodirnoj zoni. Autori svoje tvrdnje temelje na rezultatima analize morfologije odvojene čestice primjenjujući različite koeficijente trenja tijekom tokarenja Ti-6Al-4V legure neprevučnim alatom, slika 28.



Slika 28. Prikaz usporedbe rezultata napreznja i deformacija dobivenih eksperimentalno i simulacijama [181]

Različite pristupe numeričkog modeliranja predlažu Dinkina i suradnici [182], Klocke i ostali [183] te Laakso i Niemi [184]. Svaki od ovih pristupa temelji se na prilagođavanju parametra materijalnog modela i izmijenjenog Oxley modela trenja kako bi se simulacijama potvrdili podaci dobiveni eksperimentalnim putem. Laskao i Niemi koriste pet različitih skupova parametara Johnson-Cookovog materijalnog modela zajedno s izmjenjenim Oxley modelom prikazanog u radu Lalwani-ja i suradnika [185]. Rezultati dobiveni iz rada Laaske i Niemi-a, Klocke-a i suradnika, Lalwani-ja i suradnika uspoređeni su s eksperimentalnim podacima koje je dobio Iqbal i suradnici [186]. Pristup koji su predložili Laakso i Niemi u prosjeku ima pogrešku od 5 % u silama rezanja, pri čemu su isti rezultati s parametrima Klocke-a uzrokovali pogrešku od 13 %, a parametri Lalwani-ja i suradnika pogrešku od 20 %. Lotfi i ostali [187] su razvili 3D numerički model za predviđanje trošenja alata obloženog TiAlN prevlakom. Eksperimenti su provedeni tijekom tokarenja legure Inocel 625, a numerička analiza u Deform 3D softveru. Autori tvrde da su rezultati dobiveni eksperimentalno usporedivi i približni rezultatima koji su dobiveni simulacijama. Povećanje dubine rezanja predstavlja najutjecajniji faktor povećanja temperature na reznom alatu. Simulacije pokazuju da su trošenje alata i napreznja najveća u području najvećeg utjecaja temperature na reznom alatu, slika 29.



Slika 29. Prikaz eksperimentalnih rezultata potvrđenih simulacijama [187]

Parida i Maity [188] variraju tri različita radijusa 0,4 mm, 0,8 mm i 1,2 mm vrha reznog alata i analiziraju njihov utjecaj na sile, temperature, oblik i debljinu odvojene čestice te naprezanja tijekom tokarenja Inconel 718 legure. Rezultati simulacija provedenih u Deform 2D softveru pokazuju dobru podudarnost u odnosu na eksperimentalne podatke. Autori tvrde da je analiza metodom konačnih elemenata najbolji alat za predviđanje naprezanja i temperatura u obradi odvajanjem čestica. Constantin i ostali [6] modeliraju i simuliraju proces obrade tokarenja Ti-6Al-4V legure pomoću tri različita programska paketa Deform 2D, Forge 2D i AdvantEdge. Tijekom

obrade korišten je neprevučeni WC/Co rezni alat. U svakom od programskih paketa analizirane su četiri simulacije koristeći četiri različita radijusa vrha alata od 10 μm , 20 μm , 30 μm , i 40 μm . Analiza eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih simulacijom uspoređivane su u pogledu sila rezanja, oblika odvojene čestice i temperatura. Autori navode da se pomoću Forge 2D i AdvantEdge softvera mogu predvidjeti oblici odvojene čestice dok pomoću Deform 2D to nije slučaj. Razlog tomu se prepisuje izboru Johnson-Cookovog konstitutivnog modela kojeg autori ne smatraju pravim izborom za trenutne uvjete simulacije u Deform 2D softveru. Također, autori ističu nedostatke pojedinih softvera u pogledu potrebnog vremena trajanja simulacija za navedeni model. Zaključuje se da vrijeme trajanja jedne simulacije pomoću Deform 2D traje 5 do 7 sati, a oko 3 dana je potrebno da završi sve četiri simulacije. Nadalje, Forge 2D zahtjeva najmanje 10 do 14 dana da završi četiri paralelne simulacije dok AdvantEdge softver zahtjeva samo 3 sata za jednu simulaciju, a oko 2 dana za sve četiri simulacije. Pojedina ograničenja primjene MKE u obradi odvajanjem čestica mogu se promatrati u zavisnosti od prirode problema. Kao takva najčešće su vezana za utjecaj čovjeka, a koji je teško kontrolirati zbog subjektivnog pristupa i odnosa osobe prema načinu modeliranja procesa obrade odvajanjem čestica. Zatim ograničenja vezana uz strukturu modela koja predstavljaju pojedini nedostaci integrirani u softverski paket koji se primjenjuje. Takva ograničenja su najčešće nemogućnost izmjene pojedinih parametara i koeficijenata u pojedinim modulima. Pored toga postoje proceduralna ograničenja, odnosno nedostaci koji također većim dijelom ovise o utjecaju čovjeka. Rezultati temeljeni na dosadašnjim istraživanjima u literaturi u području primjene numeričkog modeliranja u obradi odvajanjem čestica od velikog su značaja za održivost strojne obrade. S ekonomske točke gledišta numerički model koji pouzdano predviđa izlazne karakteristike procesa obrade može biti prikladna zamjena eksperimentalnim istraživanjima. Pored toga, informacije dobivene simulacijama ukazivale bi na potrebu pravovremene izmjene alata i izbor optimalnih parametara obrade, a što će bitno utjecati na povećanje iskoristivosti reznog alata i smanjenje ukupnog vremena obrade. Stoga se u ovom području stvara prostor za dodatna istraživanja u cilju daljnjeg unaprjeđenja strojne obrade kroz prizmu održivog razvoja.

7. BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Buduća istraživanja bila bi usmjerena na poboljšanje održivosti strojne obrade spajanjem dviju alternativnih tehnika za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Navedeni prijedlog se temelji na analizi rezultata istraživanja u literaturi i najčešće primjenjivanih alternativnih tehnika u obradi odvajanjem čestica, a koje osiguravaju najmanje jedan uvjet održivosti strojne obrade. Razmatra se mogućnost povećanja učinkovitosti alternativnih tehnika uključivanjem MQL čestica ulja u struju hladnog komprimiranog zraka. Tehnika kombinacije komprimiranog hladnog zraka pomoću vrtložne cijevi i MQL čestica ulja nije aktivno zastupljena u procesima obrade odvajanjem čestica, a osobito ne kod obrade aluminijskih materijala i njihovih legura. Istraživanja su potvrdila da je hlađenje hladnim komprimiranim zrakom ekološki i sociološki isplativo rješenje. Pored hlađenja komprimiranim hladnim zrakom, MQL čestice omogućile bi podmazivanje zone rezanja. Na ovaj način nastoje se smanjiti negativni utjecaji temperatura u zoni rezanja, a koji se kroz različite mehanizme trošenja negativno odražavaju na trajnost alata, dimenzijsku točnost alata i obratka te kvalitetu obrađene površine. Rezultati istraživanja primjenom navedenih tehnika od velike su važnosti u pogledu održivosti strojne obrade.

Pregledom znanstvene literature uočeno je da u posljednjih nekoliko godina znanstvenici sve više primjenjuju numeričko modeliranje i simuliranje procesa obrade odvajanjem čestica s ciljem poboljšanja ekonomske održivosti strojne obrade kroz smanjenje skupih i dugotrajnih eksperimentalnih ispitivanja. Rezni alat kao najutjecajniji element procesa obrade podložan je ubrzanom trošenju posebno tijekom suhe strojne obrade, a što se u velikoj mjeri odražava na kvalitetu gotovog proizvoda. Zbog složenosti procesa obrade odvajanjem čestica, modeliranje se najčešće ograničava na 2D modeliranje obrade tokarenjem iako rješenja za trodimenzionalnu obradu također postoje u literaturi. Daljnja istraživanja predstavljala bi numeričko modeliranje i simuliranje procesa obrade odvajanjem čestica glodanjem s ciljem predviđanja izlaznih karakteristika procesa obrade. Točnija procjena razvoja temperatura i sila u zoni rezanja omogućila bi pronalaženje optimalnih uvjeta i parametara obrade pod kojima bi se dobili jasni pokazatelji nužne promjene varijabli unutar već započetog procesa strojne obrade s ciljem povećanja produktivnosti i kvalitete gotovog proizvoda. Primjenom alternativnih tehnika za hlađenje uz numeričku procjenu raspodjele temperaturnih opterećenja značajno bi se utjecalo na poboljšanje učinkovitosti strojne obrade. Posebnost ovog pristupa temelji se na ispunjavanju socioloških, ekoloških i ekonomskih uvjeta održivosti.

8. ZAKLJUČAK

Na temelju istraživanja u literaturi može se zaključiti da proizvodna industrija ulaže velike napore na području održivosti strojne obrade primjenom alternativnih tehnika za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Razlog tome je što konvencionalna upotreba SHIP-a ima negativan utjecaj na gotovo sva tri uvjeta održivosti strojne obrade. Ispunjenje ekološkog, ekonomskog i sociološkog uvjeta održivosti podrazumijeva potpuno napuštanje konvencionalnih sredstava iz strojne obrade. U tom pogledu pored svakodnevnog unapređenja reznih alata i njihovih prevlaka kombinacija navedenih alternativnih tehnika predstavlja značajan doprinos napuštanju konvencionalnih sredstava iz strojne obrade. Na temelju dosadašnjih istraživanja, najveći utjecaj na izlazne karakteristike procesa obrade odvajanjem čestica uz optimalne parametre i uvjete obrade ima temperatura u zoni rezanja. Porastom temperature razvijaju se različiti mehanizmi trošenja koji negativno utječu na rezni alat, a što se posljedično odražava na kvalitetu obrađene površine. Stoga su zahtjevi za poboljšanje strojne obrade kroz predviđanje izlaznih karakteristika procesa sve više prisutni u proizvodnoj industriji. Svaka nova spoznaja o naprezanjima, silama i temperaturama koje se javljaju tijekom obrade može značajno utjecati na produljenje životnog vijeka alata te tako uštedjeti novac proizvođačima. Stoga se značajno poboljšanje učinkovitosti obrade odvajanjem čestica postiže numeričkim modelima temeljenih na metodi konačnih elemenata. Takve analize nalaze sve veću primjenu kako u znanosti tako i u industriji. Softveri na bazi MKE sadrže veliki broj nedostataka, kao takvi i dalje predstavljaju veliki izazov znanstvenicima na području različitih istraživanja u obradi odvajanjem čestica. Mnogobrojni autori ove nedostatke rješavaju na različite načine i time dodatno stvaraju prostor za daljnja istraživanja i poboljšanja strojne obrade.

LITERATURA

- [1] Yildiz, Y.; Nalbant, M.: "A review of cryogenic cooling in machining processes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 9, pp. 947–964, 2008.
- [2] Daoud, M.; Chatelain, J. F.; Bouzid, A.: "Effect of rake angle on Johnson-Cook material constants and their impact on cutting process parameters of Al2024-T3 alloy machining simulation", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.*, vol. 81, no. 9–12, pp. 1987–1997, 2015.
- [3] Astakhov, V. P.; Outerio, J. C.: "Metal Cutting Mechanics, Finite Element Modelling", Springer, pp. 1–27, 2008.
- [4] Mabrouki, T.; Deshayes, L.; Ivester, R.; Rigal, J. F.; Jurrens, K.: "Material modelling and experimental study of serrated chip morphology", *Proceedings of the 7th CIRP, Clunney, France.* pp. 53–66, 2004.
- [5] Arrazola, P. J.; Ugarte, D.; Montoya, J.; Villar. A.; Marya, S.: "Finite element modeling of chip formation process with Abaqus/Explicit 6.3.", *VIII International Conference on Computational Plasticity, Barcelona*, pp. 1-4, 2005.
- [6] Constantin, C.; Croitoru, S. M.; Constantin, G.; Străjescu, E.: "Fem Tools for Cutting Process Modelling and Simulation", *UPB Scientific Bulletin., Series D*, vol. 74, no. 4, 2012.
- [7] Maranhão, C.; Davim, P. J.: "Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: Numerical simulation and experimental validation", *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 18, no. 2, pp. 139–156, 2010.
- [8] Brinksmeier, E.; Meyer, D.; Huesmann-Cordes, A. G.; Herrmann, C.: "Metalworking fluids - Mechanisms and performance", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 605–628, 2015.
- [9] Spikes, H.: "The history and mechanisms of ZDDP", *Tribology Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 469–489, 2004.
- [10] Byres, J. P.: "Metalworking fluids (second edition)", *CRC Press/Taylor & Francis Group*, pp. 2-15, 2006.
- [11] Veleva, V.; Hart, M.; Greiner, T.; Crumbley, C.: "Indicators of sustainable production", *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, no. 5, pp. 447–452, 2001.

- [12] Dixit, U. S.; Sarma, D. K.; Paulo D. J.: "Environmentally Friendly Machining", Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 2012.
- [13] Kuram, E.; Ozelik, B.; Demirbas, E.; Şik, E.; Tansel, I. N.: "Evaluation of New Vegetable-Based Cutting Fluids on Thrust Force and Surface Roughness in Drilling of AISI 304 Using Taguchi Method", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 9, pp. 1136–1146, 2011.
- [14] Nedić, B.; Lazić, M.: "Obrada metala rezanjem", *Proizvodne tehnologije-Skripta*, Kragujevac, pp. 1–73, 2007.
- [15] Luka, C.: "Održivost strojne obrade uz korištenje alternativnih vrsta hlađenja", *Kvalifikacijski doktorski ispit*, pp. 1–51, 2012.
- [16] Šavar, Š.: "Obrada metala odvajanjem čestica", *Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Školska knjiga*, 1990.
- [17] Brockhoff, T.; Walter, A.: "Fluid minimization in cutting and grinding abrasive", *Journal Abrasive Engineering Society*, pp. 38–42, 1998.
- [18] Rabiei, F.; Rahimi, A. R.; Hadad, M. J.; Ashrafijou, M.: "Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization", *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, pp. 447–460, 2015.
- [19] Byrne, G.; Dornfeld, D.; Denkena, B.: "Advancing Cutting Technology", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 483–507, 2003.
- [20] NIOSH.: "Criteria for a Recommended Standard-Occupational Exposure to Metalworking Fluids", *U.S. Department of Health and Human Services*, vol. 21–24, 1998.
- [21] Lawal, S. A.: "A review of application of vegetable oil-based cutting fluids in machining non-ferrous metals", *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 3951–3956, 2013.
- [22] Zhang, S.; Li, J. F.; Wang, Y. W.: "Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions", *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, pp. 81–87, 2012.
- [23] Tai, B. L.; Stephenson, D. A.; Furness, R. J.; Shih, A. J.: "Minimum quantity lubrication (MQL) in automotive powertrain machining", *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 523–528, 2014.
- [24] Koné, F.; Czarnota, C.; Haddag, B.; Nouari, M.: "Modeling of velocity-dependent chip flow angle and experimental analysis when machining 304L austenitic stainless steel with

- groove coated-carbide tools", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 7, pp. 1166–1178, 2013.
- [25] Pusavec, F.; Kramar, D.; Krajnik, P.; Kopac, J.: "Transitioning to sustainable production- Part II: Evaluation of sustainable machining technologies", *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 12, pp. 1211–1221, 2010.
- [26] European Commission.: "EU REACH Directive", 2006.
- [27] Canter, N.: "The Possibilities and Limitations of Dry Machining", *Tribology & Lubrication Technology*, pp. 40–44, 2009.
- [28] Sreejith, P. S.; Ngoi, B. K. A.: "Dry machining: Machining of the future", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 101, no. 1, pp. 287–291, 2000.
- [29] Kundrák, J.; Varga, G.: "Use of Coolants and Lubricants in Hard Machining", *Technical gazette* vol. 20, pp. 1081–1086, 2013.
- [30] Weinert, K.; Inasaki, I.; Sutherland, J. W.; Wakabayashi, T.: "Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 511–537, 2004.
- [31] Hosseini, A.; Hossam A. K.: "Cutting Tool Materials and Tool Wear", Springer, *Machining of titanium alloys*, pp. 31–56, 2014.
- [32] Porat, R.; Nahariya.; Ber, A.; Haifa.: "New Approach of Cutting Tool Materials - CERMET (Titanium Carbonitride-Based Material) for Machining Steels", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 71–75, 1990.
- [33] Ettmayer, P.; Kolaska, H.; Lengauer, W.; Dreyer, K.: "Ti(C,N) cermets - Metallurgy and properties", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 13, no. 6, pp. 343-351, 1995.
- [34] Davim, J. P.: "Diamond tool performance in machining metal-matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, no. 1–3, pp. 100–105, 2002.
- [35] Narasimha, M.; Kumar, R. R.; Kassie, A.: "Performance of Coated Carbide Tools", *The International Journal of Engineering and Science*. Vol.2, pp. 47–54, 2013.
- [36] Epshteyn, Y.; Risdon, T.: "Molybdenum disulfide in lubricant applications—a review". *12 Lubrication Grease Conference*, pp. 1-12, 2010.

- [37] Lee, C. G.; Hwang, Y. J.; Choi, Y. M.; Lee, J. K.; Choi, C.; Oh, J. M.: "A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 10, no. 1, pp. 85–90, 2009.
- [38] Singh, R.; Kuram, E.; Simsek, B. T.: "Comparison of Dry and Wet End Milling of AISI 316 Stainless Steel", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 8, pp. 1041-1049, 2015.
- [39] Ciftci, I.: "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools", *Tribology International*, vol. 39, no. 6, pp. 565–569, 2006.
- [40] Mohanty, A.; Gangopadhyay, S.; Thakur, A.: "On Applicability of Multilayer Coated Tool in Dry Machining of Aerospace Grade Stainless Steel", *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, pp. 1–11, 2015.
- [41] Çelik, Y. H.; Kilickap, E.; Güney, M.: "Investigation of cutting parameters affecting on tool wear and surface roughness in dry turning of Ti-6Al-4V using CVD and PVD coated tools", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, pp. 1–9, 2016.
- [42] Thakur, A.; Gangopadhyay, S.; Mohanty, A.; Maity, K.: "Experimental assessment on performance of TiN/TiCN/Al₂O₃/ZrCN coated tool during dry machining of Nimonic C-263", *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 18, DOI: 10.1504/IJMMM.2016.078985.
- [43] Polini, W.; Turchetta, S.: "Cutting force, tool life and surface integrity in milling of titanium alloy Ti-6Al-4V with coated carbide tools", *Journal of Engineering Manufacture* vol. 231, no. 4, pp. 694–700, 2016.
- [44] Ginting, A.; Nouari, M.: "Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 7–8, pp. 758–768, 2006.
- [45] Young, P.; Byrne, G.; Cotterell, M.: "Manufacturing and the environment", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 488–493, 1997.
- [46] Kalidas, S.; DeVor, R. E.; Kapoor, S. G.: "Experimental investigation of the effect of drill coatings on hole quality under dry and wet drilling conditions", *Surface and Coatings Technology*, vol. 148, no. 2–3, pp. 117–128, 2001.

- [47] Yang, W.; Xiong, J.; Guo, Z.; Du, H.; Ynag, T.; Tang, J.; Wen, B.: "Structure and properties of PVD TiAlN and TiAlN/CrAlN coated Ti(C, N)-based cermets", *Ceramics International*, Volume 43, pp.1911-1915, 2017.
- [48] Roy, P.; Sarangi, S. K.; Ghosh, A.; Chattopadhyay, A. K.: "Machinability study of pure aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol.27, PP. 535–544, 2009.
- [49] Derflinger, V.; Brändle, H.; Zimmermann, H.: "New hard/lubricant coating for dry machining", *Surface and Coatings Technology*, vol. 113, no. 3, pp. 286–292, 1999.
- [50] Sharif, M. N.; Pervaiz, S.; Deiab, I.: "Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, pp. 2447–2479, 2016.
- [51] Rubio, E. M.; Agustina, B.; Marín, M.; Bericua, A.: "Cooling Systems Based on Cold Compressed Air: A Review of the Applications in Machining Processes", *Procedia Engineering*, vol. 132, pp. 413–418, 2015.
- [52] Podgorkov, V.: "Method of cutting in application", Patent of USSR #1549721 MCIB23Q, Rusia, 1992.
- [53] Godlevski, V. A.: "Water steam lubrication during machining", *Tribologia*, vol. 162, pp. 11, 1998.
- [54] Liu, J.; Han, R.; Zhang, L.; Guo, H.: "Study on lubricating characteristic and tool wear with water vapor as coolant and lubricant in green cutting", *Wear*, vol. 262, pp. 442–452, 2007.
- [55] Ball, S. N.; Mishra, K.; Dutta, A. K.; Sen, P.: "Recent Trends in Physics", *Journal of Physics: Conference Series* 365, vol. 365, 2012.
- [56] Bolewar, A. B.: "Effect of Cryogenic Cooling Environment Using CO₂ on Cutting Temperature in Turning Process", vol. 3, no. 6, pp. 38–44, 2016.
- [57] Sharma, V. S.; Dogra, M.; Suri, N. M.: "Cooling techniques for improved productivity in turning", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 6, pp. 435–453, 2009.
- [58] Jayal, A. D.; Balaji, A. K.: "Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: Interactions with tool-coatings and tool surface features", *Wear*, vol. 267, no. 9–10, pp. 1723–1730, 2009.

- [59] Uehara, K.; Kumagai, S.: "Chip formation, surface roughness and cutting force in cryogenic machining", *Annals of CIRP*. vol. 17(1): pp. 409-416, 1968.
- [60] Hong, S. Y.; Zhao, Z.: "Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 1, pp. 107–116, 1999.
- [61] Dhananchezian, M.; Kumar, M. P.: "Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts", *Cryogenics*, vol. 51, no. 1, pp. 34-40, 2011.
- [62] Jerold, B. D.; Kumar, M. P.: "Experimental investigation of turning AISI 1045 steel using cryogenic carbon dioxide as the cutting fluid", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 13, no. 2, pp. 113-119, 2011.
- [63] Musfirah, A. K.; Ghani, A.; Che Haron C. H.; Kasim, M. S.: "Effect of cutting parameters on cutting zone in cryogenic high speed milling of inconel 718 alloy", *Jurnal Teknologi*, vol. 77, pp. 1-7, 2015.
- [64] Ezugwu, E. O.: "High speed machining of aero-engine alloys", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 1–11, 2004.
- [65] Kumar, K.; Choudhury, S. K.: "Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 203, pp. 95–101, 2008.
- [66] Ginting, Y. R.; Boswell, B.; Biswas, W.; Islam, M. N.: "Investigation into Alternative Cooling Methods for Achieving Environmentally Friendly Machining Process", *Procedia CIRP*, vol. 29, pp. 645–650, 2015.
- [67] Gupta, U. S.; Joshi, M. K.; Pawar, C. B.: "Experimental Performance Evaluation of Counter Flow Vortex Tube", *Journal of Environmental Research And Development*, vol. 7, no. 1, pp. 496–502, 2012.
- [68] Saidi, M. H.; Valipour, M. S.: "Experimental modeling of vortex tube refrigerator", *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 15, pp. 1971–1980, 2003.
- [69] Kurosaka, M.: "Acoustic streaming in swirling flows", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 124, pp.139–172, 1982.
- [70] Liu, N. M.; Chiang, K. T.; Hung, C. M.: "Modeling and analyzing the effects of air-cooled turning on the machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy using the cold air gun coolant

- system", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, no. 5–8, pp. 1053–1066, 2013.
- [71] Vera, G.: "The Ranque-Hilsch Vortex Tube", Available: <http://docplayer.net/26185420-The-ranque-hilsch-vortextube.html>, 2010. (pristupio 15.3.2017.)
- [72] Subudhi, S.; Sen, M.: "Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 172–178, 2015.
- [73] Boswell, B., Chandratilleke, T. T.: "Air-cooling used for metal cutting", *American Journal of Applied Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 251–262, 2009.
- [74] Ekinović, S.; Begović, E.; Fakić, B.; Burić, A.; Čeliković, A.: "Cold air dry machining Part 1: Experimental setup", *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 39–42, 2014.
- [75] Ekinović, S.; Begović, E.; Fakić, B.; Burić, A.; Čeliković, A.: "Cold air dry machining Part 2: SEM and Metallographic analysis of the chip", *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, vol. 18, pp. 21–24, 2014.
- [76] Liu, J.; Kevin Chou, Y.: "On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al-Si alloys with vortex-tube cooling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3–4, pp. 635–645, 2007.
- [77] Celent, L.; Jozić, S.; Bajić, D.: "Effect of cooling with cold compressed air using vortex tube on tool performance in milling process", *Computer integrated manufacturing and high speed machining*, pp.87–92, 2013.
- [78] Choi, H. Z.; Lee, S. W.; Do Jeong, H.: "The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 127, no. 2, pp. 155–158, 2002.
- [79] Jozić, S.; Bajić, D.; Celent, L.: "Application of compressed cold air cooling: achieving multiple performance characteristics in end milling process", *Journal of Cleaner Production*, vol. 100, pp. 325–332, 2015.
- [80] Nandy, A. K.; Gowrishankar, M. C.; Paul, S.: "Some studies on high-pressure cooling in turning of Ti-6Al-4V", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 2, pp. 182–198, 2009.

- [81] Sarma, D. K.; Dixit, U. S.: "A comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 190, no. 1–3, pp. 160–172, 2007.
- [82] Treurnicht I, N. F.; Joubert, H. J.; Oosthuizen, G. A.; Akdogan, G.: "Investigating of eco- and energy-efficient lubrication strategies for the drilling of light metal alloys", *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 25–38, 2010.
- [83] Joshua, O. S.; David, M. O.; Sikiru, I. O.: "Experimental Investigation of Cutting Parameters on Surface Roughness Prediction during End Milling of Aluminium 6061 under MQL (Minimum Quantity Lubrication) ", *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 5, no. 1, pp. 1–13, 2015.
- [84] Murthy, K. S.; Rajendran, I.: "A study on optimisation of cutting parameters and prediction of surface roughness in end milling of aluminium under MQL machining", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 7, no. 1/2, p. 112, 2010.
- [85] Heisel, U.; Lutz, M.; Spath, D.; Wassmer, R.; Walter, U.: "Application of Minimum Quantity Cooling Lubrication Technology in Cutting Processes", *Journal of Industrial and Production Engineering*, pp. 49–54, 1994.
- [86] Zeilmann, R. P.; Weingaertner, W. L.: "Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 179, no. 1–3, pp. 124–127, 2006.
- [87] Shahrom, M. S.; Yahya, N. M.; Yusoff, A. R.: "Taguchi method approach on effect of lubrication condition on surface roughness in milling operation", *Procedia Engineering*, vol. 53, pp. 594–599, 2013.
- [88] Wakabayashi, T.; Inasaki, I.; Suda, S.: "Tribological Action and Optimal Performance: Research Activities Regarding MQL Machining Fluids", *Machining Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 59–85, 2006.
- [89] Adlina, M. J.; Kamaleshwaran T.; Fairuz A. M.; Azwan I. A.: "A Study of Surface Roughness & Surface Integrity in Drilling Process Using Various Vegetable – Oil Based Lubricants In Minimum Quantity Lubrication", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(15), pp. 191-197, 2014.

- [90] Tazehkandi, A. H.; Shabgard, M.; Pilehvarian, F.: "On the feasibility of reduction in cutting fluid consumption via spray of biodegradable vegetable oil with compressed air in machining Inconel 706," *Journal of Cleaner Production*, vol. 104, pp. 422–435, 2015.
- [91] Sharma, J.; Sidhu, B. S.: "Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil", *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 619–623, 2014.
- [92] Khan, M. M. A.; Mithu, M. A. H.; Dhar, N. R.: "Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 15–16, pp. 5573–5583, 2009.
- [93] 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*, vol. 47, no. 11, pp. 1667–1676, 2007.
- [94] Sidik, N. A. C.; Samion, S.; Ghaderian, J.; Yazid, M. N. A. W.: "Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining: A review", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.108, Part A, pp.79–89, 2017.
- [95] Ginting, Y. R.; Boswell, B.; Biswas, W.; Islam, N.: "Advancing environmentally conscious machining", *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 391–396, 2015.
- [96] Boswell, B.; Islam, M. N.: "Feasibility Study of Adopting Minimal Quantities of Lubrication for End Milling Aluminium", *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 229, pp. 713–724, 2013.
- [97] Deiab, I.; Raza, S. W.; Pervaiz, S.: "Analysis of lubrication strategies for sustainable machining during turning of titanium Ti-6Al-4V alloy", *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 766–771, 2014.
- [98] Singh, G. R.; Sharma, V. S.: "Analyzing machining parameters for commercially pure titanium (Grade 2), cooled using minimum quantity lubrication assisted by a Ranque-Hilsch vortex tube", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, pp 2921–2928, 2017.
- [99] Ginting, Y. R.; Boswell, B.; Biswas, W. K.; Islam, M. N.: "Environmental Generation of Cold Air for Machining", *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 649–653, 2016.
- [100] Saberi, A.; Rahimi, A. R.; Parsa, H.; Ashrafi Jou, M.; Rabiei, F.: "Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL)

- technique using compressed cold air jet from vortex tube", *Journal of Cleaner Production*, vol. 131, pp. 728–738, 2016.
- [101] Arrazola, P. J.; Özel, T.; Umbrello, D.; Davies, M.; Jawahire, I. S.: "Recent advances in modelling of metal machining processes", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, VOL. 62, pp. 695–718, 2013.
- [102] Stalin John, M. R.; Shrivastava, K.; Banerjee, N.; Madhukar, P. D.; Vinayagam, B. K.: "Finite Element Method-Based Machining Simulation for Analyzing Surface Roughness During Turning Operation with HSS and Carbide Insert Tool", *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 38, no. 6, pp. 1615–1623, 2013.
- [103] Wu, H. B.; Zhang, S. J.: "3D FEM simulation of milling process for titanium alloy Ti6Al4V", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, no. 5–8, pp. 1319–1326, 2014.
- [104] Tamizharasan, T.; Senthil Kumar, N.: "Optimization of cutting insert geometry using DEFORM-3D: Numerical simulation and experimental validation", *International Journal of Simulation and Process Modelling*, vol. 11, no. 2, pp. 65–76, 2012.
- [105] Zanger, F.; Boev, N.; Schulze, V.: "Novel approach for 3D Simulation of a Cutting Process with Adaptive Remeshing Technique", *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 88–93, 2015.
- [106] Klamecki, B. E.: "Incipient Chip Formation in Metal Cutting - A Three Dimension Finite Element Analysis", Illinois at Urbana-Champaign, 1973.
- [107] Usui, T.; Shirakashi, E.: "Mechanics of Machining - from 'Descriptive' to 'Predictive' Theory", *ASME PED*, vol. 7, pp. 13–35, 1982.
- [108] Pop, A. B.; Lobonțiu, M.: "The finite element analysis approach in metal cutting", *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 13, pp. 12–17, 2015.
- [109] Vaz, M.; Owen, D. R. J.; Kalhori, V.; Lundblad, M.; Lindgren, M. E.: "Modelling and simulation of machining processes", *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 173–204, 2007.
- [110] Saffar, R. J., Razfar, M. R., Zarei, O.; Ghassemieh, E.: "Simulation of threedimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method", *Journal Simulation Modelling Practice and Theory* vol. 16, no. 10, pp. 1677–1688, 2008.

- [111] Zhang, Y.; Outeiro, J. C.; Mabrouki, T.: "On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting", *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 112–117, 2015.
- [112] Mabrouki, T.; Rigal, J. F.: "A contribution to a qualitative understanding of thermo-mechanical effects during chip formation in hard turning", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 176, no. 1–3, pp. 214–221, 2006.
- [113] Ku, K. K.; Srinivas, N.: "Optimization and Process Control in Small Diameter End Mill", vol. 6, no. 8, pp. 2581–2585, 2016.
- [114] Mamalis, A. G.; Horváth, M.; Branis, A. S.; Manolakos, D. E.: "Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, no. 1, pp. 19–27, 2001.
- [115] Özel, T.: "The influence of friction models on finite element simulations of machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 5, pp. 518–530, 2006.
- [116] Ambati, S.; Rega, R.: "Simulation of Cutting Stresses and Temperatures on tool geometry at the onset of Turning operation by Finite Element Method", *Indian Journal of Research*, vol. 2, no. 3, pp. 123–125, 2013.
- [117] Evdokimov, D. V.; Fedorov, D. G.; Skuratov, D. L.: "Thermal stress research of processing and formation of residual stress when end milling of a workpiece", *World Applied Sciences Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 51–55, 2014.
- [118] Prasad, C. S.: "Finite element modeling to verify residual stress in orthogonal machining", MS Thesis, Department of Mechanical Engineering, Karlskrona, Sweden, 2009.
- [119] Zeren, E.; Özel, T.: "Finite Element Method Simulation of Machining of AISI 1045 Steel With A Round Edge Cutting Tool", *Procedia CIRP*, pp. 533--542, 2005.
- [120] AdvantEdge: "Finite Element Analysis", 2016. Available: www.thirdwavesys.com (pristupio 28.4.2017.).
- [121] Marusich, S.: "Modeling and analysis of five-axis tool paths", *Manufacturnig*, 2009. Available: <http://articles.sae.org/8553/> (pristupio 28.4.2017.).
- [122] Rui, T.; Li, H.; Qi, Z.; Bo, Z.: "Cutting Properties Analysis of Titanium Alloy (Ti6Al4V) Base on Cryogenic Cooling", *Materials Science Journal*, pp. 122–126, 2014.

- [123] Pervaiz, S.; Deiab, I.; Ibrahim, E. M.; Rashid, A.; Nicolescu, M.: "A coupled FE and CFD approach to predict the cutting tool temperature profile in machining", *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 750–754, 2014.
- [124] Li, R.; Shih, A. J.: "Finite element modeling of 3D turning of titanium", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 29, pp. 253–261, 2006.
- [125] Strenkowski, J. S.; Moon, K. J.: "Finite Element Prediction of Chip Geometry and Tool/Workpiece Temperature Distributions in Orthogonal Metal Cutting", *Journal of Industrial Engineering*, vol. 112, no. 4, p. 313, 1990.
- [126] Childs, T.; Maekawa, K.; Obikawa, T.; Yamane, Y.: "Metal machining: Theory and Applications", *British Library Cataloguing in Publication Data*, 2004. Available: [http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/Childs T., Maekawa K., Obikawa T. Metal Machining\[c\] Theory and Applications \(2000\)\(en\)\(408s\) 0.pdf](http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/Childs_T.,_Maekawa_K.,_Obikawa_T._Metal_Machining[c]_Theory_and_Applications_(2000)(en)(408s)_0.pdf), pristupio (1.5.2017.).
- [127] Benson, D. J.; Okazawa, S.: "Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 193, pp. 4277–4298, 2004.
- [128] Akarca, S. S.; Song, X.; Altenhof, W. J.; Alpas, T.: "Deformation behaviour of aluminium during machining: modelling by Eulerian and smoothed-particle hydrodynamics methods", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 222, pp. 209–221, 2008.
- [129] Özel, T.; Zeren, E.: "Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, no. 3–4, pp. 255–267, 2007.
- [130] Movahhedy, M. R.; Altintas, Y.; Gadala, M. S.: "Numerical Analysis of Metal Cutting With Chamfered and Blunt Tools", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 124, no. 2, p. 178, 2002.
- [131] Yazdizadeh, B.: "Comparison of Different Plane Models in Finite Element Software in Structural Mechanics", *Physical and Mathematical Science*, vol. 3, pp. 44–50, 2010.
- [132] Umbrello, D.; M'Saoubi, R.; Outeiro, J. C.: "The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3–4, pp. 462–470, 2007.

- [133] Lei, S.; Shin, Y. C.; Incropera, F. P.: "Thermo-mechanical modeling of orthogonal machining process by finite element analysis", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 39, pp. 731–750, 1999.
- [134] Rosa, P. A. R.; Martins, P. A. F.; Atkins, A. G.: "Revisiting the fundamentals of metal cutting by means of finite elements and ductile fracture mechanics", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3–4, pp. 607–617, 2007.
- [135] Ng, E. G.; Aspinwall, D. K.; Brazil, D.; Monaghan, J.: "Modelling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 39, pp. 885–903, 1999.
- [136] Imayasu, S.; Röthlin, M.; Akbari, M.; Schaal, N.; Wegener, K.: "Predicting the Springback of Metal Cutting Operations Using Mesh Free Methods", *International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, pp. 2–5, 2015.
- [137] Cherouat, A.; Moreau, L.; Borouchaki, H.: "Advanced Numerical Simulation of Metal Forming Processes Using Adaptive Remeshing Procedure", *Materials Science Forum*, vol. 614, pp. 27–33, 2009.
- [138] Zhang, J.; Cherouat, A.; Borouchaki, H.: "3D Adaptive Remeshing Procedure and its Application to Large Deformation Problems", *Key Engineering Materials*, vol. 498, pp. 199–209, 2012.
- [139] Vaz, M.: "On the Numerical Simulation of Machining Processes", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 179–188, 2000.
- [140] Vijayaraghavan, V.; Garg, A.; Gao, L.; Vijayaraghavan, R.; Lu, G.: "A finite element based data analytics approach for modeling turning process of Inconel 718 alloys", *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1619–1627, 2016.
- [141] Huang, J. M.; Black, J. T.: "An Evaluation of Chip Separation Criteria for the FEM Simulation of Machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 118, no. 4, p. 545, 1996.
- [142] Lo, S. P.: "An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105, no. 1–2, pp. 143–151, 2000.
- [143] McClain, B.; Batzer, S. A.; Maldonado, G. I.: "A numeric investigation of the rake face stress distribution in orthogonal machining", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, no. 1, pp. 114–119, 2002.

- [144] Kishawy, H. A.; Rogers, R. J.; Balihodzic, N.: "A Numerical Investigation of the Chip Tool Interface in Orthogonal Machining", *Machining Science and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 397–414, 2002.
- [145] Xie, J. Q.; Bayoumi, A. E.; Zbib, H. M.: "FEA modeling and simulation of shear localized chip formation in metal cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, no. 9, pp. 1067–1087, 1998.
- [146] Yang, X.; Liu, C. R.: "A new stress-based model of friction behavior in machining and its significant impact on residual stresses computed by finite element method" *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 44, no. 4, pp. 703–723, 2002.
- [147] Lin, Z. C.; Lin, Y. Y.: "Three-dimensional elastic-plastic finite element analysis for orthogonal cutting with discontinuous chip of 6-4 brass", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 35, no. 2, pp. 137–153, 2001.
- [148] Lin, Z. C.; Lo, S. P.: "2-D discontinuous chip cutting model by using strain energy density theory and elastic-plastic finite element method", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, no. 2, pp. 381–398, 2001.
- [149] Zhang, L.: "On the separation criteria in the simulation of orthogonal metal cutting using the finite element method", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 89–90, no. 1999, pp. 273–278, 1999.
- [150] Umbrello, D.; Hua, J.; Shivpuri, R.: "Hardness-based flow stress and fracture models for numerical simulation of hard machining AISI 52100 bearing steel", *Materials Science and Engineering*, vol. 374, no. 1–2, pp. 90–100, 2004.
- [151] Iwata, K.; Osakada, K.; Terasaka, Y.: "Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid-Plastic Finite Element Method", *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 106, no. 2, pp. 132–138, 1984.
- [152] Ko, D. C.; Ko, S. L.; Kim, B. M.: "Rigid-thermoviscoplastic finite element simulation of non-steady-state orthogonal cutting", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 130–131, pp. 345–350, 2002.
- [153] Bil, H.; Kiliç, S. E.; Tekkaya, A. E.: "A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, no. 9, pp. 933–944, 2004.

- [154] Shirakashi, T.; Maekawa, K; Usui, E.: "Flow Stress of Low Carbon Steel at High Temperature and Strain Rate (1st Report)," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, vol. 44, no. 527, pp. 1393–1398, 1978.
- [155] Oxley, P. L. B.: "The mechanics of machining : an analytical approach to assessing machinability", Ellis Horwood series in mechanical engineering, pp. 228-238., 1989.
- [156] Johnson, G. R.; Cook, W. H.: "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", 7th International Symposium on Ballistics. pp. 541–547, 1983.
- [157] Zerilli, F. J.; Armstrong, R. W.: "Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations", Journal of Applied Physics, vol. 61, no. 5, pp. 1816– 1825, 1987.
- [158] Chandrasekaran, H.; M'Saoubi, R.; Chazal, H.: "Modelling of Material Flow Stress in Chip Formation Process From Orthogonal Milling and Split Hopkinson Bar Tests", Machining Science and Technology, vol. 9, no. 1, pp. 131–145, 2005.
- [159] Özel, T.; Zeren, E.: "A Methodology to Determine Work Material Flow Stress and Tool-Chip Interfacial Friction Properties by Using Analysis of Machining", Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 128, no. 1, p. 119, 2006.
- [160] Childs, T. H. C.: "Material Property Needs in Modeling Metal Machining", Machining Science and Technology, vol. 2, no. 2, pp. 303–316, 1998.
- [161] Jagadesh, T.; Samuel, G. L.: "Finite Element Modeling for Prediction of Cutting Forces during Micro Turning of Titanium Alloy", India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, pp. 6–11, 2014.
- [162] Fu, Z. T.; Yang, W. Y.; Zeng, S. Q.; Guo, B. P.; Hu, S. B.: "Identification of constitutive model parameters for nickel aluminum bronze in machining", Transactions of Nonferrous Metals Societ, vol. 26, no. 4, pp. 1105–1111, 2016.
- [163] Zębala, W.; Słodki, B.: "Cutting data correction in Inconel 718 turning", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 65, no. 5–8, pp. 881–893, 2013.
- [164] Calamaz, M.; Coupard, D.; Girot, F.: "A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 48, no. 3–4, pp. 275–288, 2008.

- [165] Uçun, I.: "3D finite element modelling of drilling process of Al7075-T6 alloy and experimental validation", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 4, pp. 1843–1850, 2016.
- [166] Uçun, I.; Aslantas, K.; Bedir, F.: "Finite element modeling of micro-milling: Numerical simulation and experimental validation", *Machining Science and Technology*, vol. 20, no. 1, pp. 148–172, 2016.
- [167] Thepsonthi, T.; Özel, T.: "3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Experimental validations on chip flow and tool wear", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 221, pp. 128–145, 2015.
- [168] Adibi-Sedeh, A.; Vaziri, M.; Pednekar, V.: "Investigation of the effect of using different material models on finite element simulations of machining", *CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*, 2005.
- [169] Zorev, N. N.: "Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting", *International Research in Production Engineering*, New York, pp. 42-49, 1963.
- [170] Usui, E.; Maekawa, K.; Shirakashi, T.: "Simulation analysis of built-up edge formation in machining low carbon steels", *Japan Society for Precision Engineering*, vol. 15, pp. 237–242, 1981.
- [171] Childs, T. H. C.; Maekawa, K.: "Computer-aided simulation and experimental studies of chip flow and tool wear in the turning of low alloy steels by cemented carbide tools", *Wear*, vol. 139, no. 2, pp. 235–250, 1990.
- [172] Filice, L.; Micari, F.; Rizzuti, S.; Umbrello, D.: "A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, no. 3–4, pp. 709–714, 2007.
- [173] Haglund, A. J.; Kishawy, H. A.; Rogers, R. J.: "An exploration of friction models for the chip-tool interface using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element model", *Wear*, vol. 265, no. 3–4, pp. 452–460, 2008.
- [174] Shet, C.; Deng, X.: "Residual stresses and strains in orthogonal metal cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, no. 6, pp. 573–587, 2003.
- [175] Agmell, M.; Ahadi, A.; Ståhl, J. E.: "The link between plasticity parameters and process parameters in orthogonal cutting", *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 224–229, 2013.

- [176] Niesłony, P.; Grzesik, W.; Habrat, W.: "Experimental and simulation investigations of face milling process of Ti6Al4V titanium alloy", *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Vol. 39, pp. 40-50, 2015.
- [177] Malakizadi, A.; Gruber, H.; Sadik, I.; Nyborg, L.: "An FEM-based approach for tool wear estimation in machining", *Wear*, vol. 368–369, pp. 10–24, 2016.
- [178] Lazoglu, I.; Poulachon, G.; Ramirez, C.; Akmala, M.; Marcon, B.; Rossi, F.; Outeiro, J.; Krebs, M.: "Thermal analysis in Ti-6Al-4V drilling", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Available online: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.020>, 2017.
- [179] Gok, K.: "Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations", *Measurement*, vol. 75, pp. 57–68, 2015.
- [180] Mamedov, A.; Lazoglu, I.: "Thermal analysis of micro milling titanium alloy Ti-6Al-4V", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 229, pp. 659–667, 2016.
- [181] Calamaz, M.; Coupard, D.; Nouari, M.; Girot, F.: "Numerical analysis of chip formation and shear localisation processes in machining the Ti-6Al-4V titanium alloy", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 9–12, pp. 887–895, 2011.
- [182] Denkena, B.; Grove, T.; Dittrich, M. A.; Niederwestberg, D.; Lahres, M.: "Inverse Determination of Constitutive Equations and Cutting Force Modelling for Complex Tools Using Oxley's Predictive Machining Theory", *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 405–410, 2015.
- [183] Klocke, F.; Lung, D.; Buchkremer, S.: "Inverse identification of the constitutive equation of inconel 718 and AISI 1045 from FE machining simulations", *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 212–217, 2013.
- [184] Laakso, S.; Niemi, E.: "Using FEM simulations of cutting for evaluating the performance of different johnson cook parameter sets acquired with inverse methods", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 47, pp. 95–101, 2017.
- [185] Lalwani, D. I.; Mehta, N. K.; Jain, P. K.: "Extension of Oxley's predictive machining theory for Johnson and Cook flow stress model", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 12–13, pp. 5305–5312, 2009.
- [186] Iqbal, S. A.; Mativenga, P. T.; Sheikh, M. A.: "Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 2: Evaluation of flow stress models and interface friction distribution schemes", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 221, pp. 917–926, 2007.

- [187] Lotfi, M.; Jahanbakhsh, M.; Farid, A.: "Wear estimation of ceramic and coated carbide tools in turning of Inconel 625: 3D FE analysis", *Tribology International*, vol. 99, pp. 107–116, 2016.
- [188] Parida, A. K.; Maity, K.: "Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 687–693, 2016.

SAŽETAK

Pregledom znanstvene literature dobiven je uvid u problematiku strojne obrade gdje se poseban naglasak stavlja na ispunjavanje ekonomskih, socijalnih i ekoloških uvjeta održivosti u procesima obrade odvajanjem čestica. Negativan utjecaj konvencionalnih sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje na održivost strojne obrade doveo je do potrebe razvoja alternativnih tehnika hlađenja, ispiranja i podmazivanja. Održiva strojna obrada temeljena na alternativnim tehnikama teži uravnoteženom sustavu između ekološke i sociološke prihvatljivosti te ekonomske učinkovitosti. Trenutna istraživanja usmjerena su na povećanje učinkovitosti strojne obrade primjenom alternativnih tehnika hladnog komprimiranog zraka i minimalnih količina za podmazivanje, te njihove moguće kombinacije. Kombinacija navedenih alternativnih tehnika predstavlja značajan doprinos napuštanju konvencionalnih sredstava iz strojne obrade, a pomoću kojih se smanjenjem generirane topline u zoni rezanja pozitivno utječe na povećanje produktivnosti, radni vijek alata i kvalitetu gotovog proizvoda. Primjena numeričkog modeliranja i simuliranja temeljeno na metodi konačnih elemenata omogućuje predviđanje izlaznih karakteristika procesa obrade odvajanjem čestica. Navedeni pristup doprinosi ekonomskom segmentu održivosti strojne obrade kroz smanjenje obima i složenosti eksperimentalnih ispitivanja koja značajno utječu na ekonomsku održivost proizvodnje.

Ključne riječi

održiva strojna obrada, alternativne tehnike za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, numeričko modeliranje, metoda konačnih elemenata