

## Ocena trajnosti naprednih tehnologij odrezavanja

Luka Sterle – Damir Grguraš – Matjaž Kern – Franci Pušavec\*  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

Kriogeno odrezavanje z asistenco kapljevitega CO<sub>2</sub> in odrezavanje z asistenco pulzirajočega visokotlačnega dovoda hladilno mazalne tekočine predstavljata trajnostno alternativo konvencionalnim odrezovalnim procesom, saj ponujata učinkovitejše hlajenje in mazanje rezalne cone pri odrezavanju težko obdelovalnih materialov, hkrati pa zagotavljata nižje stroške obdelave pri manjšem vplivu na okolje in delavca.

V tej raziskavi sta predstavljeni napredni tehnologiji odrezavanja: (i) kriogeno odrezavanje (ang. *Cryogenic Machining*) z asistenco kapljevitega CO<sub>2</sub> - LCO<sub>2</sub> (ang. *Liquid Carbod Dioxide*) v kombinaciji z minimalno količino olja in (ii) odrezavanje z asistenco pulzirajočega visokotlačnega dovajanja hladilno mazalne tekočine – Pulsating HPJAM (ang. *Pulsating High Pressure Jet Assisted Machining*). Obe tehnologiji sta bili vpeljani v proces odrezavanja težko obdelovalnega materiala s ciljem raziskati njun vpliv na stroške in varnost izbrane tehnologije v primerjavi s konvencionalnim načinom odrezavanja.

Eksperimenti kriogenega odrezavanja z asistenco LCO<sub>2</sub> so bili izvedeni na težko obdelovalni titanovi zlitini Ti-6Al-4V. Pri kriogenem frezanju se je tako v rezalno cono dovajalo mazalni kapljeviti CO<sub>2</sub>, t.j. enokanalni dovod LCO<sub>2</sub> + olja, kjer je bil masni pretok CO<sub>2</sub> 12 kg/h in volumski pretok olja 60 mL/h. Mešanica CO<sub>2</sub> in olja se je v rezalno cono dovajala s pomočjo lastniškega sistema enokanalnega kriogenega dovoda. Pri frezanju so se uporabljala standardna 4-rezilna stebelna frezala premera 8 mm z naslednjimi rezalnimi parametri:  $v_c = 60$  m/min,  $f_z = 0,08$  mm/zob,  $a_p = 8$  mm,  $a_e = 2,4$  mm. Med kriogenim frezanjem se je spremljalo obrabo frezala in obliko odrezkov. Merili smo tudi koncentracijo CO<sub>2</sub> v zraku v neposredni bližini CNC obdelovalnega centra in rabo električne energije, potrebne za delovanje kriogenega sistema. Referenca kriogenemu frezanju glede obstojnosti orodja je bilo konvencionalno frezanje z uporabo emulzije Blazer B-Cool 9665 s 7 % koncentracijo.

Eksperimenti struženja z asistenco pulzirajočega dovajanja hladilno mazalnega sredstva so bili izvedeni na težko obdelovalni nikljevi zlitini Inconel 718. Uporabljalo se je emulzijo Blazer B-Cool 9665 s 7 % koncentracijo, katero se je v rezalno cono pulzirajoče dovajalo s pomočjo lastniškega sistema, ki omogoča popoln nadzor nad dovodom emulzije v smislu trajanja pulza in tlaka emulzije. Frekvenca pulziranja curka emulzije je znašala 5 Hz, kjer je visokotlačni del pulza trajal 60 ms pri 200 bar (20 MPa), nizkotlačni del pa 140 ms pri tlaku 1 bar (0,1 MPa). Pri struženju se je uporabljalo standardne rezalne ploščice z naslednjimi rezalnimi parametri:  $v_c = 50$  m/min,  $f_n = 0,28$  mm/vrt,  $a_p = 0,5$  mm. Med struženjem se je spremljalo obrabo rezalnih ploščic in obliko odrezkov ter rabo električne energije, potrebne za nadzor pulzirajočega dovoda emulzije. Rezultate se je primerjalo z referenčnim konvencionalnim načinom obdelave in visokotlačnim načinom obdelave s konstantnim tlakom dovoda emulzije 200 bar (20 MPa).

Rezultati kažejo, da predstavljeni napredni tehnologiji obdelave težko obdelovalnih zlitin ponujata daljšo obstojnost rezalnega orodja v primerjavi s konvencionalnim načinom odrezavanja, ugotovilo se je 169 % (LCO<sub>2</sub> + olje) in 33 % (Pulsating HPJAM) daljšo obstojnost orodja. Pri kriogenem odrezavanju značilne razlike v obliki odrezkov ni bilo moč zaznati, medtem ko je uporaba pulzirajočega dovajanja hladilno mazalnega sredstva zagotovila idealno dolžino odrezkov. Stroškovna analiza je pokazala, da obe predstavljeni tehnologiji predstavljata stroškovno ugodnejšo tehnologijo v primerjavi s konvencionalno tehnologijo odrezavanja, saj smo zasledili 44,7 % znižanje stroškov pri kriogenem odrezavanju in 5,2 % znižanje pri pulzirajočem načinu dovoda emulzije. Hkrati obe tehnologiji nimata negativnega odtisa na operaterja in delovno okolje. Iz meritev koncentracije CO<sub>2</sub> prisotnega v zraku okolice obdelovalnega centra zaključujemo, da koncentracija CO<sub>2</sub> v zraku ne presega zakonsko predpisanih mejnih vrednosti. Pulzirajoči način dovajanja emulzije pa omogoča 30 % hitrejši dostop do delovnega prostora znotraj CNC obdelovalnega centra na račun značilno manjšega meglenja v primerjavi z običajnim visokotlačnim dovodom emulzije. Nadaljnje delo bo usmerjeno v detajlno analizo ozračja v delovnem prostoru (velikost kapljic olja v zraku in njihova porazdelitev).

**Ključne besede:** kriogeno odrezavanje, visokotlačno odrezavanje, trajnost, stroškovna analiza, analiza varnosti