

# Numerična analiza izvedljivosti in učinkovitosti uporabe toplotnih cevi pri steblastih rezkarjih

Yong-Bin Liu<sup>1,3</sup> – Lin Zhu<sup>1,2\*</sup> – Tien-Chien Jen<sup>2</sup> – Ji-Wen Zhao<sup>1</sup> – Yi-Hsin Yen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Šola za elektrotehniko in avtomatizacijo, Univerza Anhui, Kitajska

<sup>2</sup> Oddelek za strojništvo, Univerza v Wisconsinu, ZDA

<sup>3</sup> Oddelek za natančne stroje in instrumente, Znanstveno-tehnična univerza, Kitajska

Za odvajanje toplote, ki nastaja med procesom steblastega rezkanja na stiku orodja in obdelovanca, je uporabljena nova tehnologija vdolane toplotne cevi. Občasno se pojavljajo tudi poročila o uporabi toplotnih cevi za odvod toplote pri obdelavi z odrezavanjem. Judd et al. so raziskovali struženje jekla z orodjem s toplotno cevjo, vdolano v držalu. Ugotovili so, da lahko toplotna cev zmanjša temperaturo orodnega držala za 30 %. Chiou et al. so opravili analizo po metodi končnih elementov in eksperimentalno študijo hlajenja s toplotno cevjo pri obdelavi jekla s trdokovinskimi orodji. Avtorji so zaključili, da lahko toplotna cev v rezalni ploščici zmanjša temperaturo in obrabo rezalnega orodja ter podaljša življenjsko dobo orodja. Jen et al. so opravili numerično in eksperimentalno primerjavo hlajenja s toplotno cevjo pri operacijah suhega vrtnja in poročajo, da lahko toplotna cev zmanjša temperaturo svedra za 30 do 50 %. Kolikor je znano avtorjem tega prispevka, pa je le malo objavljenih raziskav o različnih pogojih hlajenja pri praktičnih procesih vrtnja.

Predmet tega članka je izvedljivost in učinkovitost hlajenja s toplotno cevjo pri operacijah steblastega rezkanja. Numerične študije vključujejo štiri primere, vključno s suhim rezkanjem, dovodom hladilne tekočine, hlajenjem s toplotno cevjo, ter hlajenjem s toplotno cevjo in dovodom hladilne tekočine. Raziskava termičnih, statičnih in dinamičnih strukturnih značilnosti steblastega rezkarja je bila opravljena z numeričnimi izračuni po hitri metodi končnih elementov (FFE) s programsko opremo za eksplicitno analizo po MKE.

V tej študiji je bila za doseganje natančnih rezultatov numerične simulacije uporabljena strategija mreže visoke gostote, kjer ima v območjih, kjer je potrebna visoka ločljivost, vsak element po 10 vozlišč. Za mrežo celotnega orodja in še zlasti za fino mrežo na konici orodja je bila uporabljena štiritočkovna Jacobijeva kontrola za stopnjo deformiranosti tetraedričnih elementov. Rezultati numeričnih simulacij kažejo, da se največja temperatura na konici orodja pri enakem vnosu toplotne energije zmanjša za 29 %, oz. s 1027 °C pri polnem steblastem rezkarju na 737 °C pri steblastem rezkarju s toplotno cevjo. Prav tako se zmanjšajo največje toplotne napetosti, s 650 MPa pri suhem rezkanju na 480 MPa pri hlajenju s toplotno cevjo, oziroma za 1,4-krat pri enakih pogojih hlajenja. Hlajenje s toplotno cevjo je zato lahko učinkovit pristop za upravljanje s toploto pri procesih steblastega rezkanja, primerljivo s sicer prevladujočim tekočinskim hlajenjem.

Uporaba toplotne cevi, vdolane v polni steblasti rezkar, pa lahko zaradi votle sredice poveča statične napetosti in deformacije pri vrhu rezkarja. Vgradnja toplotne cevi v polno orodje namreč zmanjša vztrajnostni moment orodja, s tem pa se povečajo upogibne deformacije in upogibne napetosti. Največja upogibna trdnost trde zlitine, iz katere je izdelan steblasti rezkar, je 1470 MPa, zato orodje s toplotno cevjo izpolnjuje zahteve operacij rezkanja. Zaradi večjih statičnih napetosti in deformacij orodja s toplotno cevjo bi bilo trdnost in togost v glavni rezalni coni, zlasti pri vrhu orodja, mogoče izboljšati z optimizacijo geometrijske oblike in konfiguracije steblastega rezkarja. Pri realnih aplikacijah je tveganje resonance oz. drdranja rezkarja mogoče zmanjšati z optimizacijo vpenjalne dolžine orodja, s tem pa se zmanjšajo tudi upogibne deformacije in upogibne napetosti.

Primerjava zvrsti vibracij polnih steblastih rezkarjev in steblastih rezkarjev s toplotno cevjo vodi do sklepa, da so vibracijske zvrsti polnih orodij nekoliko višje kot zvrsti orodij s toplotno cevjo. Razlog je v deformacijah polnega steblastega rezkarja, ki so pri dejanskih aplikacijah manjše kot pri steblastih rezkarjih s toplotno cevjo. Višja frekvenca steblastega rezkarja pri operacijah obdelave torej vodi do večje togosti. Signifikantne vibracije orodja s toplotno cevjo imajo lahko škodljiv vpliv na dimenzijsko natančnost izdelka in na stabilnost sistema za obdelavo s steblastim rezkanjem. Vse to je mogoče izboljšati z optimizacijo hitrosti rezkanja. Z optimizacijo vpenjalne dolžine steblastega rezkarja pri industrijskih aplikacijah se zmanjša število močnih vibracijskih zvrsti v operacijah steblastega rezkanja, s čimer se zmanjša verjetnost resonance rezkarja, predvsem drdranja. Rezultati numerične simulacije v tej študiji kažejo, da je uporaba vdolane toplotne cevi v končnem rezkarju izvedljiva in učinkovita, ter da je suho steblasto rezkanje dosegljivo tudi pri realnih operacijah obdelave.

**Ključne besede:** hlajenje s toplotno cevjo, izvedljivost in učinkovitost, steblasti rezkar, termična in strukturna analiza