

Katedra za menedžment obdelovalnih tehnologij

Katedra za menedžment obdelovalnih tehnologij je bila ustanovljena leta 2000. Razvojnoraziskovalno in pedagoško delo teče neprekinjeno že več kot 30 let v okviru Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani pod okriljem Laboratorija za odrezavanje in odrezovalne stroje. V raziskovalno skupino Laboratorija za odrezavanje (LABOD) je poleg vodje prof. dr. Janeza Kopača vključenih še 12 raziskovalcev, od tega 5 doktorjev znanosti. Skupino zaokrožuje 6 mladih raziskovalcev, od tega trije iz proizvodnje. LABOD poleg laboratorijske delavnice s stroji in merilno opremo vsebuje še oddelek za vzratno inženirstvo z opremo za dotično in optično skeniranje objektov.



Slika 1. Člani Katedre za menedžment obdelovalnih tehnologij

Poslanstvo in področja dela

Področja, na katerih pedagoško in razvojnoraziskovalno deluje Katedra za menedžment obdelovalnih tehnologij, so: obdelava z velikimi hitrostmi, načrtovanje tehnologij in izdelkov, zagotavljanje kakovosti in menedžment kakovosti, konstruiranje modulov za odrezovalne stroje, raziskave natančnosti obdelovalnih strojev, uvajanje sensorike za nadzor odrezovalnih procesov (spremljanje in nadzor procesov, raziskave rezalne cone, analiza dinamike procesov s frekvenčnim analizatorjem),

obdelava lesa z odrezavanjem, menedžment proizvodnje in operacij (TQM – Total Quality Management), menedžment tehnologij in inovacij, vzratno inženirstvo (RE – Reverse Engineering) in hitra izdelava prototipov (RP – Rapid Prototyping), vse s poudarkom na trajnostnem razvoju obdelovalnih postopkov. S temi smernicami sta bili v zadnjih dveh letih razviti dve sodobni hibridni tehnologiji: visokotlačno in kriogeno odrezavanje.

Raziskovalna skupina pri svojem delu in raziskavah upošteva smer-

nice na področju hitre proizvodnje (RM – Rapid Manufacturing) in menedžmenta izdelovalnih tehnologij s stališči trajnostnega razvoja obdelovalnih postopkov. Te so sposobnost oblikovanja novih izdelkov, pridobivanje novih idej, inovativnost in kreativnost. Disciplino, ki povezuje tako tehnološko napovedovanje, posredovanje, prenos tehnologij ter analizo sposobnosti sprejemanja inovativnih tehnologij, imenujemo menedžment tehnologij in je temeljna ideja raziskovalne skupine.

Pedagoško delo

Predmeti, ki jih vodijo ali pri njih sodelujejo člani katedre oz. laboratorija LABOD na dodiplomskem študiju oz. I. stopnji študija strojništva, so Proizvodno inženirstvo, Tehnologija odrezavanja, Obdelovalni stroji, Izdelovalne tehnologije, Načrtovanje tehnologij in izdelkov, Računalniško integrirana proizvodnja ter Zagotavljanje kakovosti. Na podiplomskem študiju na II. stopnji člani katedre vodijo naslednje predmete: Odrezavanje, Odrezovalni stroji in naprave, CAM, Optimalna izbira strojev in opreme, Optimiranje izdelovalnih procesov ter Načrtovanje in obvla-



**KATEDRA ZA
MENEDŽMENT
OBDELOVALNIH
TEHNOLOGIJ**



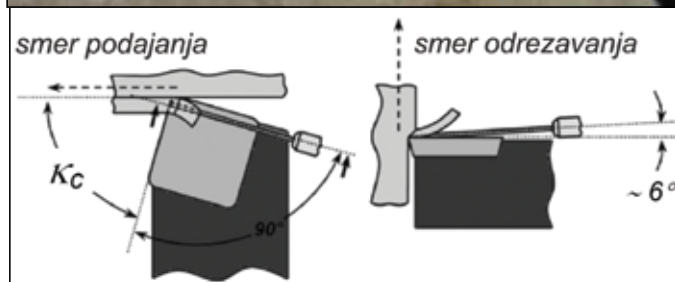
Slika 2. Laboratorij za odrezavanje (LABOD) katedre za menedžment obdelovalnih tehnologij

dovanje kakovosti. Na doktorskem študiju oz. III. stopnji pa vodijo oz. sodelujejo pri naslednjih predmetih: Procesi odrezavanja, Obdelovalni stroji, Optimiranje obdelovalnih tehnologij, Sočasno inženirstvo ter Intelligentni strežni in montažni sistemi. Prof. dr. Janez Kopač in prof. dr. Mirko Soković sta razen pri diplomah tudi mentorja magistrskih in doktorskih del.

Raziskovalno delo

Za prehod k družbi, ki temelji na trajnostnem razvoju, se zahtevata postavitev in razvoj novih oblik proizvodnje in porabništva. Koncept hitre proizvodnje s stališči trajnostnega razvoja obdelovalnih postopkov je trenutno oblikovan kot ključno raziskovalno področje, saj je od razvoja postopkov RM in njihove praktične uporabe odvisna bodoča

konkurenčna prednost proizvodnih podjetij. To je vsekakor eden od najbolj ambicioznih pristopov za prihodnost, ki bo odjemalcem neposredno omogočal, da bodo oblikovali in kupovali kompleksne izdelke po svoji meri z upoštevanjem evropskih in slovenskih standardov za

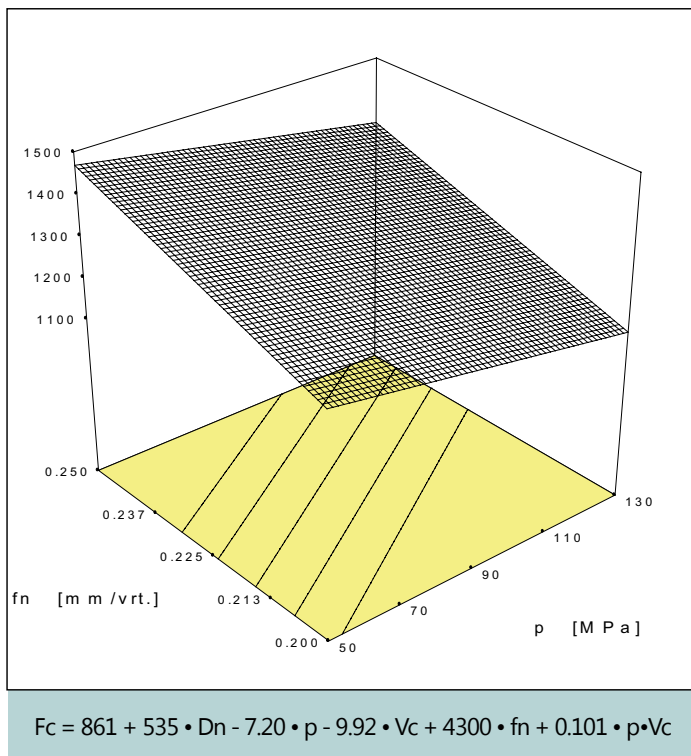


Slika 3. Princip visokotlačnega struženja (tlaki do 150 MPa)

varovanje zdravja in okolja ter doseganja kakovosti.

Tako je raziskovalna skupina Katedre za menedžment obdelovalnih tehnologij vključena v raziskovalni program Menedžment izdelovalnih tehnologij za trajnostni razvoj. Cilj raziskovalnega programa je v podpori raziskav in razvoja dopolnjujočih se tehnologij in metodologij za hitro proizvodnjo izdelkov in njihovih podpornih storitev. Pri tem so potrebne inovacije na področju že obstoječih procesov hitre proizvodnje, materialov, novih procesov, inteligentnih senzorjev za kontrolo procesov, oblikovanja za proizvodnjo, logistike in standardizacije procesov za implementacijo v industriji. Raziskovalni program je usmerjen v tehnologije, inženirske metodologije, nova orodja, metode in delovno okolje, ki podpira sodelovanje, kreativnost ter učinkovito uporabo virov za proizvodnjo izdelkov. Raziskave se nanašajo na dodajanje vrednosti izdelkom od njihovega oblikovanja s poudarkom na izdelavi. Glavne smernice raziskovalnega programa so nadgradnje obstoječih in razvoj novih modernih obdelovalnih procesov in tehnologij, njihova industrijska aplikacija ter na podlagi analitičnega in empiričnega prediktivnega modeliranja izboljšanje: a) vpliva na okolje, b) izrabe energije, c) varnosti osebja, č) zdravja osebja ter zmanjšanje: a) potratnosti in b) proizvodnih stroškov preko principov trajnostnega razvoja.

Raziskave in razvoj na področju interakcij stroj-orodje-obdelovanec med obdelovalnimi procesi so pripeljali do inovacij, ki so močno povečale tako produktivnost kakor tudi kakovost obdelanih površin obdelovancev. Trenutni trend visoke produktivnosti in obdelovanja z visokimi hitrostmi neizogibno prinaša prisotnost visokih temperatur v obdelovalnih conah, tako v orodju kakor v obdelovancu, in s tem negativno vpliva na mehčanje orodja in posledično na njegovo obstojnost. V industrijskih aplikacijah se za zmanjšanje ekstremnih toplotnih vplivov široko uporabljajo konvencionalne emulzije, ki bazirajo na oljnih osnovah.



Slika 4. Empirično modeliranje za primer rezalne sile v odvisnosti od procesnih parametrov

Vendar pa zavestno širjenje ideje trajnostnega razvoja v obdelovalnih procesih, ki postavlja konvencionalna hladilno-mazalna sredstva na mesto najbolj netrajnostnih elementov procesa, postavlja v ospredje iskanje novih alternativnih metod hlajenja oz. mazanja. Poleg tega se pojavljajo tudi potrebe po povečanju produktivnosti in učinkovitosti obdelav konvencionalnih in modernih težko obdelovalnih materialov (sodobna jekla, titanove in nikljeve zlitine itd.), ki se vse bolj pogosto uporabljajo v medicinski, vesoljski, letalski in avtomobilski industriji. Vsa ta dejstva vodijo do potreb po raziskovanju alternativnih metod hladilno-mazalnih mehanizmov, torej trajnostnega razvoja obdelovalnih postopkov. **Odrezavanje z visokotlačnim hlajenjem** na vodni osnovi je hibridni odrezovalni postopek, ki je v LABOD-u razvit z načeli trajnostnega razvoja obdelovalnih postopkov (slika 3). Visokotlačno odrezavanje (VTO) se uveljavlja kot metoda za bistveno povečanje odvzema materiala in produktivnosti v kovinskopredelovalni industriji. Hlajenje in mazanje z visokimi tlaki pri operacijah struženja je v primerjavi s klasičnim obliva-

stveno znižamo stroške izdelave, povezane s porabo HMT. Poleg povišanja učinkovitosti in fleksibilnosti odrezavanja tako princip VTO prispeva tudi k naravovarstvenim vidikom.

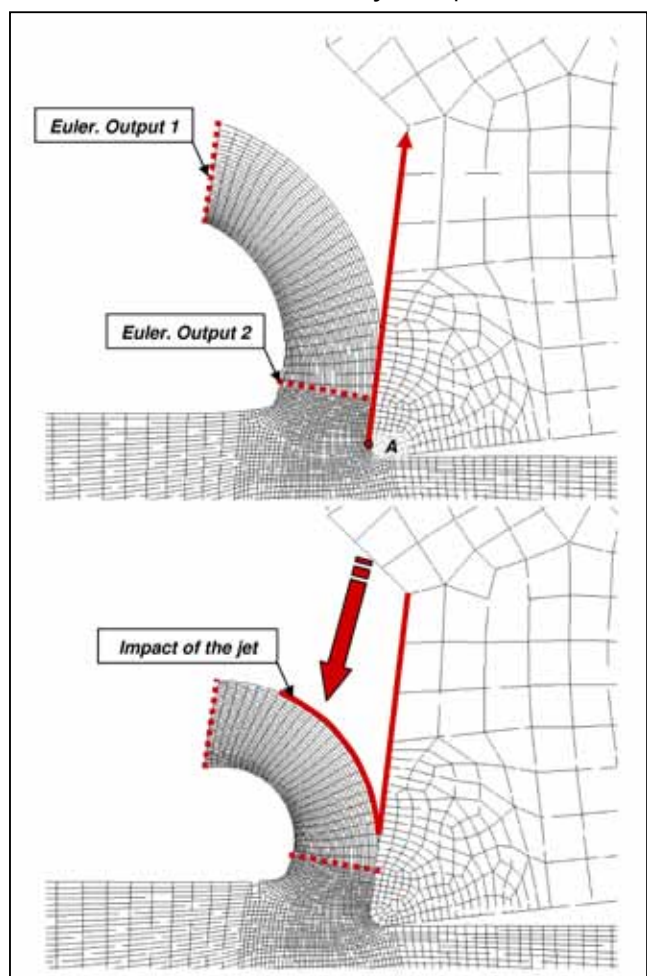
VTO je relativno nov proces, zato je potrebno poiskati območja obdelovalnosti (tehnološka okna) za vsako kombinacijo orodje-obdelovanec. Proizvajalci orodij za to tehnologijo ne dajejo priporočil. V LABOD-u se za določanje vplivnih procesnih parametrov in njihovo optimizacijo uporablja regresijsko mo-

njem učinkovita metoda, ki omogoča višjo produktivnost, zmanjševanje temperature v rezalni coni in izboljšano kontrolo oblikovanja odrezkov pri nekajkrat nižjem pretoku hladilno-mazalne tekočine (HMT). Poleg tega imajo HMT neposreden vpliv na okolje in ekonomiko izdelave. Z opustitvijo klasičnega oblivanja in uporabo VTO lahko bi-

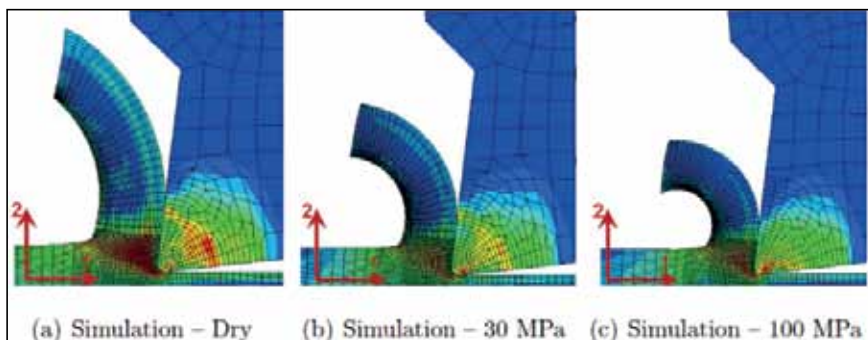
deliranje. Pridobljeni **empirični modeli** v obliki enačb in 3D-diagramov kažejo vpliv procesnih parametrov na odziv sistema (rezalne sile, obraba in obstojnost orodja, integriteta obdelane površine, ...), kar je prikazano na *sliki 4*.

Za boljše razumevanje mehanizmov odrezavanja se poleg empiričnega uporablja tudi **numerično modeliranje**. Le-to poteka v sodelovanju z LTDS ENISE iz Francije. V ta namen se uporablja programska oprema Abaqus/Explicit© (v6.6) in numerični model Arbitrary-Lagrangian-Eulerian. Rezultati so spodbudni (*slika 5 in 6*) in kažejo skladnost z empiričnimi modeli oz. eksperimenti.

Ena od potencialnih alternativ, ki v veliki meri zagotavlja idejo trajnostnega razvoja, je tudi aplikacija **kriogenega odrezavanja**. V tem primeru kriogeni medij predstavlja primarno hladilno-mazalno sredstvo. Kot kriogeni mediji so tretirani fluidi, ki imajo temperaturo vrelišča



Slika 5. Numerično modeliranje VTO – robni pogoji



Slika 6. Numerično modeliranje VTO – rezultati simulacije

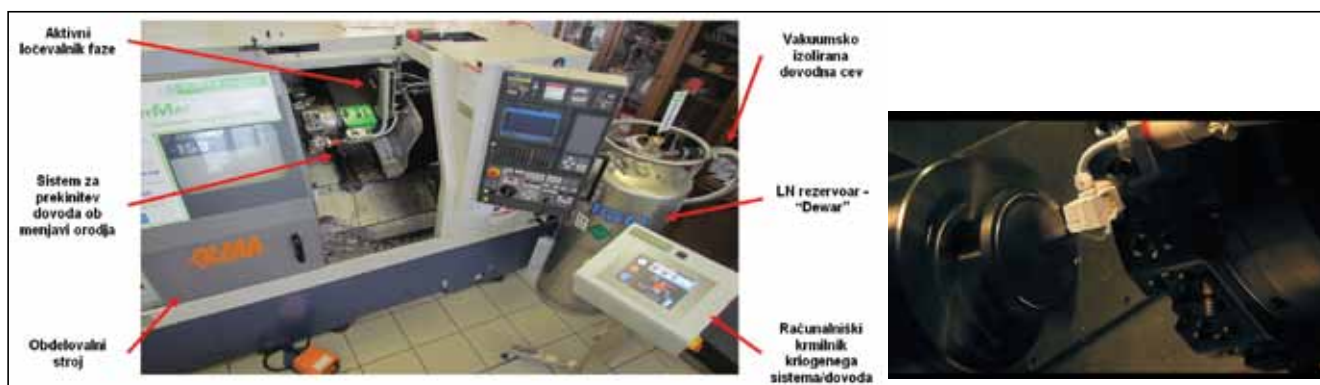
nizjo od $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Taki fluidi so na primer: utekočinjeni dušik, helij, vodik itd., medtem ko je najpogosteje uporabljen utekočinjeni dušik (LN) zaradi njegove učinkovitosti, inertnega obnašanja in razmeroma nizkih stroškov. Kriogeno odrezavanje predstavlja metodo hlajenja rezalnega orodja med odrezovalnim procesom pri nizkih (kriogenih) temperaturah. Bolj praktično se ideja nanaša na dovajanje kriogenega hladilnega medija v lokalno območje na rezalnem orodju, kjer je temperatura med odrezovalnim procesom največja. V LABOD-u je razvit sistem za kriogeno struženje. Za kriogeni medij se uporablja utekočinjeni dušik (LN), ki ima vrelišče pri $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ in je varen, negorljiv in inert. Poleg tega predstavlja LN 79-odstotni delež v zraku, ki ga dihamo, in je tako s tega stališča neproblematičen. Je brezbarven, brez vonja, brez okusa in "inerten" plin, ki se ob dovodu hitro upari in vrne v atmosfero. Tako ne pušča sledi na obdelovancu, orodju, odrezkih, operaterju itd. in predstavlja čist proces brez reciklažnih potreb v nasprotju s HMT na oljni osnovi. Primer aplikacije LN v LABOD-u je prikazan na *sliki 7*.

Naslednje področje raziskav sta razvoj in izdelava sodobnih **medicinskih implantatov**. Področje raziskav je podprto z uporabo naprednih RP in obdelovalnih tehnologij ter sodobnih biokompatibilnih materialov, da se izdelajo implantati po meri pacienta. S tem zagotovimo ustrezno funkcionalnost izdelka ob hkratnem upoštevanju vseh standardov in zahtev, ki veljajo za to področje izdelkov. Na osnovi 3D-rentgenske slike poškodovanega dela telesa se z rekonstrukcijo slike izdelava 3D-model, ki je osnova za izdelavo implantata s sodobno tehnologijo praškastega navarjanja (LENS). Tak izdelek se po potrebi še fino obdela s končnimi postopki odrezavanja in namenski implantat je pripravljen za vsaditev (*slika 8*). Poleg dobrega poznavanja konstrukcijsko-razvojnega procesa je potrebno pri razvoju in izdelavi sodobnih medicinskih implantatov dobro poznati tudi materiale, njihove mehanske, metalurške in obdelovalne lastnosti.

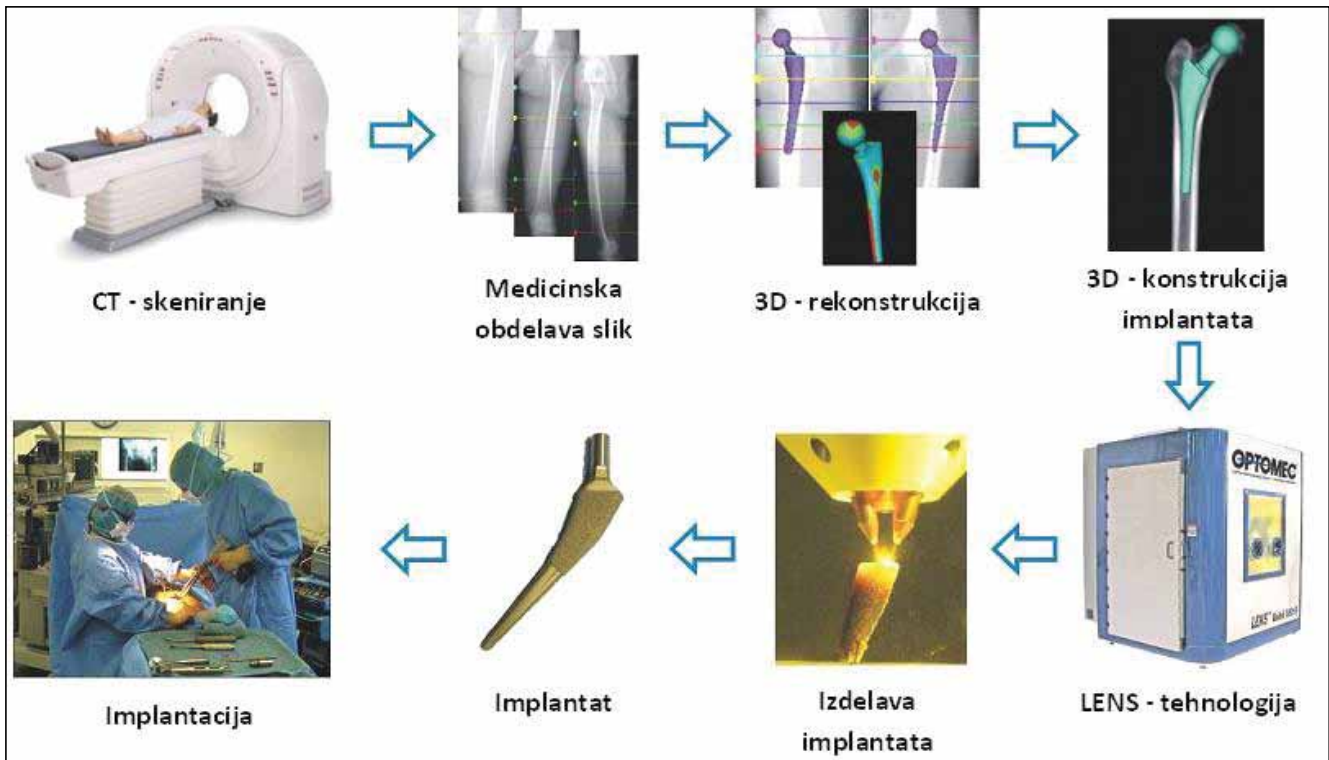
Od marca 2011 je LABOD opremljen z visokohitroostnim obdelovalnim strojem MC 430L, ki združuje linearne pogone na vseh oseh in visoke vrtljaje glavnega vretena (40.000 vrt/

min). To omogoča visoko dinamično odzivnost stroja (pospeški do 10 m/s^2) in visoko stopnjo preciznosti obdelave (ponovljivost $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$). Obdelovalni stroj je namenjen raziskavam na področju **mikrofrezanja**, kjer se uporabljajo orodja s premerom, manjšim od 1 mm. S tem postopkom se izdelujejo miniaturni izdelki s 3D-mikrooblikami, ki dosegajo visoko dimenzijsko natančnost in kakovost obdelane površine. Glavna prednost teh izdelkov je: manjša poraba materiala, manj porabljene energije za izdelavo in večja funkcionalnost. Glavne omejitve tehnologije predstavljajo delovna natančnost obdelovalnega stroja, toleranca izdelave, napaka krožnega teka mikrofrezal in elastična deformacija mikrofrezal v procesu odrezavanja. Tako so predvidene raziskave, ki bodo omogočale karakterizacijo mikrofrezanja in podrobnejši vpogled in razumevanje mehanizmov odrezavanja na mikronivoju.

LABOD je s svojim razvojnoraziskovalnim delom in aplikativnimi projekti delno prispeval k temu, da se prej našete tehnologije v slovenski industriji že obvladujejo. Zaradi močnega tehnološkega razvoja v praksi se člani LABOD-a strokovno izobražujejo in izpopolnjujejo na področju novih tehnologij in s tem nudijo stalno raziskovalno podporo podjetjem, ki sama niso sposobna spremljati in osvajati novitet. Vsi ti problemi so izzivi za raziskovalno okolje, hkrati pa so osnova za oblikovanje bazičnih raziskav. Katedra za menedžment obdelovalnih tehnologij na ta način sodeluje s številnimi priznanimi slovenskimi podjetji: EMO – orodjarna, d. o. o., Celje; EMO - TECH, d. o. o.,



Slika 7. CNC-stružnica, nadgrajena v sistem za kriogeno odrezavanje (levo) in proces kriogenega odrezavanja (desno)



Slika 8. Postopek izdelave medicinskega implantata po meri pacienta

Celje; Gorenje orodjarna, Velenje; UNIOR Strojna oprema, Zreče; Valji, d. o. o., Štore; CIMOS, d. d., Koper; BTS Company, d. o. o., Ljubljana; RLS, d. o. o., Ljubljana - Dobrunje; ISTRABENZ plini, Koper; Kolektor, d. o. o., Idrija; Hidria Rotomatika, d. o. o, Spodnja Idrija; Hidria AET, d. o. o., Tolmin; Titan, d. d., Kamnik; Krka, d. d., Novo mesto idr.

LABOD sodeluje s slovensko industrijo tudi na strokovnem področju. To je delo, povezano z meritvami geometrijske natančnosti in kalibracijo obdelovalnih strojev, vzvratnim inženirstvom ter analizo rezalne

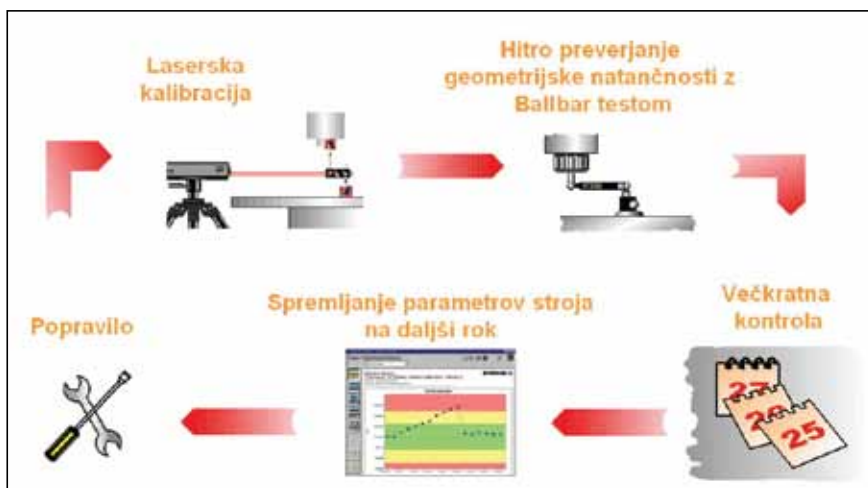
cone z napravo QSD. Zahteve sodobne industrije po vse ožjih tolerancah ter visoki kakovosti izdelkov so pripeljale do točke, ko postajajo karakteristike obdelovalnih strojev vse bolj pomembne. Kakovost obdelave na CNC-stroju je močno odvisna od njegove geometrične natančnosti. Identifikacija odstopkov na CNC-strojih ne izboljšuje le produktivnega časa stroja, temveč je lahko osnova za racionalnejše načrtovanje proizvodnje, razvrščanje strojev po obdelovalnih sposobnostih ter navsezadnje osnova za redna ali preventivna vzdrževalna dela na obdelovalnih strojih. **Geometrijsko**

natančnost strojev lahko ugotovimo na več načinov. Hitro preverjanje geometrijske natančnosti strojev poteka z uporabo naprave Ballbar QC10 (Quick Check 10 min – hitri test v 10 min), natančna kalibracija oz. korekcija parametrov v krmilniku pa na podlagi rezultatov natančnih meritev z vrhunsko lasersko napravo ML10Gold.

Sodobni inženirski postopki snovanja izdelka, podprti s tehnikami CAD (Computer Aided Design) in CAE (Computer Aided Engineering), omogočajo optimiranje koncepta izdelka že pred obdelavo z uporabo



Slika 9. Visokohitrostna precizna obdelava: grafitna elektroda za EDM s tankimi rebri (levo) in bakrena pečatna plošča za blisterje



Slika 10. Preverjanje geometrijske natančnosti in kalibriranje obdelovalnih strojev

postopkov CAM (Computer Aided Manufacturing). Tržne zahteve pa narekujejo estetske in ergonomsko oblikovane izdelke, ki so čedalje bolj kompleksni. Tak trend izdelave nedvomno zahteva od proizvajalcev visoko stopnjo fleksibilnosti, ki jo je moč doseči z uporabo tehnologije **vzvratnega inženirstva** (Reverse Engineering – RE). Proces RE omogoča pretvorbo fizičnih modelov v

računalniške numerične modele za njihovo nadaljnjo uporabo.

Novi postopki RM nastajajo večinoma v močnih, specializiranih tujih podjetjih ali kot rezultat široke, povezane mreže raziskovalcev. Del slednje je tudi LABOD, kar je razvidno iz številnih povezav, ki so nastale kot posledica evropskih, bilateralnih in ostalih projektov ter sodelav raziskovalne skupine.

Tako raziskovalna skupina sodeluje s številnimi uglednimi univerzami s celega sveta: University of Kentucky, ZDA; Purdue University, ZDA; WZ RWTH Aachen, Nemčija; TU Chemnitz, Nemčija; ENISE, Saint-Etienne, Francija; TU Dunaj, Avstrija; ETH Zürich, Švica; Campinas University, Brazilija; UPC, Barcelona, Španija; Suleyman Demirel University, Isparta, Turčija idr. Katedra za menedžment obdelovalnih tehnologij se preko med-

narodnih projektov v kombinaciji s specifičnim znanjem vključuje v skupen razvoj ali testiranje uporabnosti novih tehnologij in poskrbi za čim hitrejši prenos znanja in tehnologij v slovensko proizvodnjo. Dosežke posredujejo domačim strokovnjakom iz proizvodnje s strokovno literaturo, na konferencah in predstavitev podjetjih. Prispevek se kaže v uveljavljanju novih tehnologij, kot sta VHO (visoko hitrostno odrezavanje) in VHB (visoko hitrostno brušenje), v skrajšanju obdelovalnih časov, stroškov in s tem posledično tudi dvigu konkurenčnosti podjetij. Na področju obdelave zahtevnih sodobnih materialov pa sta svoje mesto našla postopka kriogenega in visokotlačnega odrezavanja. K razvoju teh idej je pomembno prispevala tudi raziskovalna skupina Katedre za menedžment obdelovalnih tehnologij.

*Doc. dr. Davorin Kramar
UL, Fakulteta za strojništvo*



Slika 11. Vzvratno inženirstvo: brezdotično skeniranje srednjeveškega meča

VENTIL
REVIA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO

telefon: + (0) 1 4771-704
 telefaks: + (0) 1 4771-761
<http://www.fs.uni-lj.si/ventil/>
 e-mail: ventil@fs.uni-lj.si