

# Prikaz poteka razvoja naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji nožev

## *Development of an advanced tool steel for the most demanding applications in the knife industry*

Izr. prof. dr. Rebeka Rudolf<sup>1</sup>, mag. Tilen Ravlan<sup>2</sup>, dipl. inž. doc. dr.  
Gorazd Lojen<sup>1</sup>, dr. Peter Majerič<sup>1</sup> in Egidij Hudrap<sup>2</sup>, dipl. inž.

<sup>1</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

<sup>2</sup> SIJ Ravne Systems d. o. o., Ravne na Koroškem

---

**Povzetek:** V prispevku predstavljamo izhodišča in smernice poteka razvoja naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji nožev, ki se izvaja v podjetju SIJ Ravne Systems v povezavi z Univerzo v Mariboru Fakulteto za strojništvo. Razvoj je na eni strani povezan z identifikacijo ključnih lastnosti orodnega jekla, ki predstavljajo konkurenčno prednost v primerjavi z ostalimi konvencionalnimi jekli in to so: žilavost, trdota, trdnost in rezilna sposobnost. Po drugi strani pa razvoj predstavlja tudi vpeljavo ustrezne tehnologije izdelave in naknadne toplotne oziroma mehanske obdelave orodnega jekla, kar omogoča doseganje ključnih lastnosti izdelka – nožev.

**Ključne besede:** razvoj, orodno jeklo za delo v hladnem, lastnosti, toplotna in mehanska obdelava, karakterizacija.

**Abstract:** This paper presents the starting points and an approach for the development of an advanced tool steel for the most demanding applications in the knife industry, which is carried out by SIJ Ravne Systems in collaboration with the University of Maribor Faculty of Mechanical Engineering. On one hand, the development is related to the identification of key features of tool steels that present a competitive advantage over other conventional steels, such as toughness, hardness, strength and cutting ability. On the other hand, the development also represents the implementation of appropriate technologies for the production and subsequent thermal or mechanical treatment of tool steels, in order to achieve key properties of the final products - knives.

**Key words:** development, tool steel for cold work, properties, thermal and mechanical treatment, characterization.

---

## 1. Uvod

Osnovni cilj razvoja naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji je doseganje bolj-  
ših lastnosti napram tistim, ki jih ima obstoječe orodno jeklo. Podjetje SIJ Ravne Systems (SRS) izdeluje orodno jeklo, kjer je mikrostruktura sestavljena iz popuščenega martenzita in nekaterih vključkov. To orodno jeklo ima gostoto  $7,74 \text{ g/cm}^3$ . S sedanjo tehnologijo izdelave in z razpoložljivo infrastrukturo, doseže SRS pri tem orodnem jeklu naslednje lastnosti: trdota  $58-60 \text{ HRC}$ , udarna žilavost  $25 \text{ J (SBJ)}$ , natezna trdnost okoli  $1900 \text{ MPa}$ . To orodno jeklo ima nekatere pomanjkljivosti: v primeru uporabe tega jekla za izdelavo industrijskih nožev, imajo noži življenjsko dobo le 6 ur, nože pa je možno uporabiti samo pri nižjih rezilnih hitrostih t.j. do  $190 \text{ m/min}$ . Navedeni pomanjkljivosti omejujeta širšo uporabo tega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji, kjer so zahteve glede življenjske dobe tovrstnih izdelkov (preko 10 ur) in potreba po doseganju rezilnih hitrostih pa okoli  $400 \text{ m/min}$ . Glavni razvojni izziv je tako **razviti novo napredno orodno jeklo**, kjer se bodo s korekcijo kemijske sestave → t. j. z določitvijo zlitinskih elementov in njihovih količin, ter z ustrezno tehnologijo izdelave in naknadne toplotne in mehanske obdelave bistveno spremenila fazna ravnotežja v sistemih Fe-C in Fe<sub>3</sub>C in s tem posledično lastnosti novega jekla. Novo razvito jeklo bi moralo imeti mikrostrukturo na osnovi popuščenega martenzita z minimalno vsebnostjo nečistoč in ostalih neustreznih vključkov.

## 2. Predstavitev problematike

Podjetje SRS je eno izmed vodilnih svetovnih podjetij na področju proizvodnje industrijskih nožev (slika 1), kjer se odvija velika tekma za prevlado na trgu orodnih jekel.



Slika 1: Prikaz industrijskih nožev proizvajalca Ravne Systems

Vodstvo podjetja SRS je v preteklosti pristopilo k strateški odločitvi, ki naj bi zagotovila podjetju dolgoročen obstoj na trgu in konkurenčno prednost, da z novim naprednim orodnim jeklom oz. inovativnimi orodji vstopi na zahteven trg lesno predelovalne industrije. Ena izmed pomembnih tržnih niš je industrija furnirja. Podjetje SRS že danes izdeluje za furnirsko industrijo nože za rezanje, luščenje ter obrezovanje furnirja. S kvaliteto obstoječih orodnih jekel ter s pomočjo tehnologije, ki smo jo razvili sami z lastnim kadrom in znanjem, obvladujemo praktično vse branže v furnirski industriji, razen področja rezanja mehkega lesa. Za to področje tudi ostala svetovna konkurenca nima tehnoloških rešitev oziroma znanj za takšno orodno hitrorežno jeklo, ki bi imelo kombinacijo lastnosti, ki je nasprotna s fiziko stanja (visoka trdota in udarna žilavost hkrati). Zato ta razvoj predstavlja zahtevno

področje, ki ga bo potrebno reševati na več nivojih in sicer od določitve nove kemijske sestave, izdelavne tehnologije jekla (z inovativnimi in naprednimi pristopi), karakterizacije mikrostrukture in identifikacije lastnosti, do razvoja tehnoloških postopkov obdelave, ki bodo omogočala izdelovanje nožev iz novega orodnega jekla. Zahteve, ki narekujejo daljšo življenjsko dobo nožev in uporabo teh nožev pri visokih rezilnih hitrostih, so povezane z ustrezno mikrostrukturno, ki jo morajo imeti noži v kontaktni delovni površini (oziroma na rezalni liniji). Prav tako morajo imeti ta noži visoko in konstantno trdoto, z ustrezno visokimi mehanskimi lastnostmi (trdnost, žilavost) ter visoko obrabno obstojnostjo. Pri tem je potrebno upoštevati tudi geometrijske zahteve nožev, med katere spada zagotavljanje ničelne ukrivljenosti rezalne površine ( $\pm 0,01\%$  na 1 m), kar pomeni, da mora imeti rezalna linija 99,99% ravnost. Ta pogoj je zelo zahteven, saj so noži izredno dolgi (1. skupina  $L < 1 \text{ m}$ , 2. skupina  $L > 1 \text{ m}$ ).

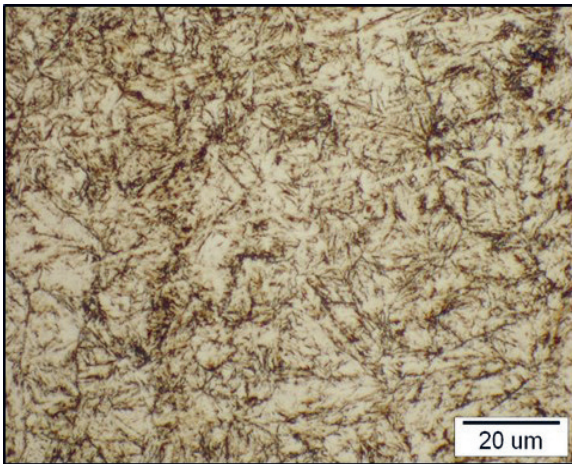
Razvoj naprednega orodnega jekla je tesno povezan z razvojem tehnologije izdelave, zato bo za realizacijo cilja potrebno uporabiti različne tehnike karakterizacije, ki bodo vzpostavile most med na kemijsko sestavo, tehnologijo izdelave in končnimi lastnostmi, ki jih mora imeti novo orodno jeklo. Prvi sklop karakterizacij bo tako osredotočen na identifikacijo kemijske sestave, mikrostrukture in posameznih faz, vključkov, po posamezni stopnji izdelavi, drugi sklop pa na določitev lastnosti prav tako po vsaki fazi izdelave orodnega jekla. Namen teh testiranj je dobiti vpogled v poznavanje odnosa: material - izdelava - lastnosti - končna aplikacija - in je nujno potreben, če želimo dinamično spremljati in ciljno usmerjati nastanek mikrostrukture in s tem zagotavljati lastnosti novega orodnega jekla tekom izdelave in kasnejše uporabe za najzahtevnejše in različne aplikacije v industriji.

Razvoj temelji na izdelavi povsem novega noža iz naprednega orodnega jekla, ki se bo lahko uporabil za najzahtevnejše aplikacije na raznih področjih (lesna industrija, obdelava plastike in multikomponentnih materialov, itd.). To temelji na razvoju novega materiala - orodnega jekla, na določitvi izdelovalne tehnologije, na karakterizaciji mikrostrukture ter lastnosti tega jekla, ter na ciljni uporabi tega jekla za nože, ki naj bi se koristili za mehek les.

## 3. Dosedanji rezultati razvojno raziskovalnega dela

V začetni fazi raziskovalnega dela smo pričeli z zbiranjem literature<sup>1-23</sup>, ki obravnava sodobna orodna jekla. Pripravili smo navodila za ustrezno odkrivanje mikrostruktur - pregled primernih jedkal, ustreznih orodij in priprava smernic za ASTM analizo. Preučil se je fazni diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C. V prvi stopnji smo izdelali razvojno orodno jeklo s kombinacijo vakuumskega indukcijskega pretaljevanja (VIM), kateremu je sledilo elektro pretaljevanje pod žlindro (EPŽ). Kombinacija obeh postopkov nam je zagotavljala doseganje vrhunske čistoče orodnega jekla ter izotropijo mehanskih in ostalih lastnosti. Testne vzorce orodnega jekla smo razrezali z elektro-erozijo v dimenzije primerne za nadaljnjo metalografsko pripravo. Po ustrezni pripravi

smo vzorce jedkali z jedkalom za orodna jekla (3% nital, pikrinska kislina) in pregledali mikrostrukturo, ter določali osnovne sestavine (mikrostrukturne elemente) na svetlobnem mikroskopu (slika 2). Velikost zrn smo določili po ASTM standardu. V nadaljevanju smo izvedli definiranje kemijske sestave in faz v mikrostrukturi z vrstično elektronsko mikroskopijo (SEM) in mikrokemično analizo (EDX) vzorcev orodnega jekla. Izmerili smo mikrotrdote na posameznih testnih vzorcih, na mestih osnovnega materiala in rezila.



Slika 2: Mikrostruktura materiala nožev, sestavljena iz: kaljenega martenzita + zadržanega avstenita (manj kot 1 vol.%)

V nadaljevanju razvojnega dela smo pristopili k optimiranju procesa izdelave orodnega jekla, ki je sestavljen iz 3 sklopov (slika 3).



Slika 3: Obstoječa kalilna linija v podjetju: predgreвна peč, peč za avstenitizacijo, kalilni sistem

### 3.1 Razvoj predgrevne peči

V razvoj predgrevne peči smo se vključili na področju CFD simulacij dinamike fluidov v peči ter toplotnih in ventilacijskih izgub skozi ovoj peči in odprtine. Izdelali smo masno in energijsko bilanco gledano na ogrevanje vložka v peči. Analizirali in določili smo najustreznejše materiale za izolacijo peči. Prav tako smo naredili idejno zasnovo merjenja in kontrole zaščitne atmosfere v peči. Izdelali smo CAD model notranje komore peči in predlagali ustrezno geometrijo notranjih sten in stropov za optimalno porazdelitev temperature.

### 3.2 Razvoj peči za avstenitizacijo

Izdelali smo termične preračune, CFD simulacije dinamike fluidov v peči in simulacije kinematike pomika vložka po peči in prehod le-tega na kalilni sistem. Pomembno je bilo upoštevanje dejstva, da mora biti vložek tik pred izhodom iz peči na kalilni sistem ogret na zahtevano temperaturo. Preračunali smo pomike vrat, prevzema vložka in transport le-tega v kalilni medij. Izdelali smo CAD model transportne mize za prevzem in pomik vložka med pečo in kalilnim bazenom ter izvedli analizo ohlajanja in upogibanja noža v tem času. Zaradi visokih temperatur obstaja nevarnost povesa vložka v peči in kalilnem sistemu zato smo sprejeli ustrezne konstrukcijske ukrepe da do tega ne pride. Predlagali smo sistem za pozicioniranje vložka v peči in na kalilnem sistemu.

### 3.3 Razvoj naprednega kalilnega sistema

Izdelali smo Bazni inženiring kalilnega sistema ter masno in energijsko bilanco sistema. Načrtovali in optimizirali smo procesne sheme ter na podlage teh izdelali idejni CAD model naprednega kalilnega sistema. Razvili smo inovativni namenski sistem za kaljenje nožev v olju. Sistem vpetja in pomika vložka je elektro-hidravlični. Sile vpetja smo izmerili na trenutno delujočem sistemu. Olje v stiku z vložkom zagori, kar je potrebno pogasiti z inertnim plinom in hlape odsesati iz delovnega okolja. Pred izpustom v okolje je potrebno organske hlape termično razgraditi v sežigalni komori in nato ne-nevarne emisije izpustiti v okolje. Olje je potrebno pred pričetkom kaljenja ogreti na delovno temperaturo, med samim procesom kaljenja pa ga je potrebno ohlajati. Zato smo razvili krožni obtočni sistem olja, ki ob enem povečuje turbulencijo olja v kalilnem bazenu in s tem povečuje hitrost ohlajanja vložka, hkrati pa preko grelno/hladilnega sistema vzdržujemo delovno temperaturo olja.

V okviru sklopa Raziskava tehnoloških parametrov za postavitev inovativne kalilne linije za obdelavo naprednega orodnega jekla, smo izvedli analizo deformacije materiala pri temperaturah predgrevanja (750°C) in pri temperaturi avstenitizacije (1050°C), analizo materialov za izolacijo za predgrevno peč oz. pri peči za avstenitizacijo, analizo in razvoj konstrukcijskih materialov za ognjišče obeh peči, analizo in ustrezne zaščitne atmosfere, itd. Na osnovi vseh opravljenih raziskav in ugotovljenih dejstev smo pristopili k razvoju naprednega kalilnega sistema in k razvoju tehnologije mehanske in toplotne obdelave, kar bo predmet nadaljnjih raziskav.

## 4. Zaključek – nadaljevanje razvojnih aktivnosti

V nadaljevanju razvojno raziskovalnega dela se bomo ukvarjali z definiranjem mikrostrukture in vpliva le-te na končne lastnosti orodnega jekla, kjer posebej izstopajo zahteve po visoki udarni žilavosti, natezni trdnosti in trdoti. Za ta namen bodo izvedeni preizkusi udarne žilavosti po Charpyju. Izvedli bomo tudi simulacijo toplotne in mehanske obdelave preizkušancev iz orodnega jekla v obliki nožev. Na osnovi tega bomo



izdelali prve industrijsko-laboratorijske šarže, kjer bomo uporabili kombinacijo tehnologij VIM in EPŽ.

Raziskave so bile izvedene v okviru projekta Rano@steel (OP20.03523), kjer je koordinator podjetje Ravne Systems in ga sofinancira Evropski sklad za regionalni razvoj in Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport Republike Slovenije.

## Literatura

- Istiroyah, D. W. Septi in Suhana: The Effect of Quenching Media on Hardness and Carbon Content in Carburized Steel, 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 546 042014.
- Sarah Jalal Mosa: Effect of different quenching media on mechanical properties of AISI 1018 low carbon steel, *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42 (3), pp. 81-83 DOI: 10.26480/jmerd.03.2019.81.83.
- A A Zainulabdeen, N. Y. Mahmood in J. H. Mohammed: The effect of polymeric quenching media on mechanical properties of medium carbon steel, 2018 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 454 012053.
- P.P.Ikubanni, O.O.Agboola, A.A.Adediran, A.A.Adeleke, B.T.Ogunsemi, T.S.Olabamiji, D.C.Uguru-Okorie, C.O. Osueke: Experimental data on mechanical properties evaluation of medium carbon steel quenched in different waste media, P.P.Ikubannietal./DatainBrief 20 (2018) 1224–1228.
- F. Lenzia, G. Campanaa, A. Lopatrielloa, M. Melea, A. Zanottib: About the use of mineral and vegetable oils to improve the sustainability of steel quenching, *Procedia Manufacturing* 33 (2019) 701–708.
- Lyu, S.K., *Characteristic of quenching refrigerant for heat treatment deformation control of SM45C steel.* KSME International Journal, 2002. 16: p. 647-654.
- Troell, E., et al., 12.04 - *Controlling the Cooling Process – Measurement, Analysis, and Quality Assurance*, in *Comprehensive Materials Processing*, S. Hashmi, et al., Editors. 2014, Elsevier: Oxford. p. 99-121.
- Hou, L., et al., *Study on the Cooling Capacity of Different Quenchant.* Procedia Engineering, 2012. 31: p. 515-519.
- Chen, X., et al., *Quenching characteristics of glycerol solution as a potential new quenchant.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017. 109: p. 209-214.
- Ramesh, G. and N.K. Prabhu, *Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment.* Nanoscale research letters, 2011. 6(1): p. 334-334.
- T V Shveyyova, G F Muhametzyanova, V I Astashchenko, N N Zapadnova and E A Zapadnova: Characteristic features of the cooling capacity of aqueous polymer solutions, 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 570 012098.
- Z. Koudil, R. Ikkene, in M. Mouzali: *Cooling Capacity Optimization: Calculation of Hardening Power of Aqueous Solution Based on Poly(N-Vinyl-2-Pyrrolidone)*, M. J. of Materi Eng and Perform (2014) 23: 551. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0775-9>.
- Lijun Hou, Heming Chenga, Jianyun Li, Ziliang Li, Baodong Shaoa, Jie Hou: *Study on the Cooling Capacity of Different Quenchant*, *Procedia Engineering* 31 (2012) 515 – 519.
- Svetlana Yu. Shevchenko, Yury A. Melnik, Andrey E. Smirnov, and Wai Yan Min Htet: *Comparative evaluation of methods for the determination of heat transfer coefficients of liquid and gaseous quenching media*, *Mechanics & Industry* 18, 703 (2017).
- Ching-Kao, C. and H.S. Lu, *The optimal cutting-parameter selection of heavy cutting process in side milling for SUS304 stainless steel.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007. 34(5): p. 440-447.
- Chi-Hsiang, C., *The effect of surface roughness of end-mills on optimal cutting performance for high-speed machining*, W. Yung-Cheng, Editor., Association of Mechanical Engineers and Technicians of Slovenia et al.
- Wang, L., et al., *Fabrication of TiC-TiB2 composite ceramic tool and its cutting performance in turning austenitic stainless steel.* *Advances in Applied Ceramics*, 2019. 118(8): p. 473-483.
- Saravanan, M., C. Thiagarajan, and S. Somasundaram, *Enhancing the tool die steel profile cutting performance in WEDM process.* *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019. 9(1): p. 2626-2636.
- Sonawane, S.A. and M.L. Kulkarni, *Optimization of machining parameters of WEDM for Nimonic-75 alloy using principal component analysis integrated with Taguchi method.* *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2018. 30(3): p. 250-258.
- Kumar, Y., *Cutting Parameters Optimization in Milling Of P – 20 Tool Steel And EN31B.* *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2013. 8: p. 38-47.
- Anil Raj, K.L.D.W.a.A.S.V., *Cutting Parameters Optimization during Hard Turning of AISI H13 Tool Steel.* *International Journal of Research in Mechanical Engineering*, 2016. 4(3): p. 33-38.

22. Murat Sarýkaya, H.D., Akýn Gezgin, *OPTIMIZATION OF THE PROCESS PARAMETERS FOR SURFACE ROUGHNESS AND TOOL LIFE IN FACE MILLING USING THE TAGUCHI ANALYSIS*. Materials and technology 2015. 49 (1): p. 139–147.

23. Chauhan, S., N. Verma, and R. Kumar, *Study on Optimization of Turning Parameters on Various Steel Grades: A Review*. 2018.