

Nova eksperimentalna metoda za določevanje obrabe orodij v laboratoriju

New Experimental Method for Laboratory Testing of Wear

V. Nardin¹, M. Terčelj, R. Turk, T. Rodič, Oddelek za materiale in metalurgijo, NTF, Univerza v Ljubljani

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

Razvili smo računalniško vodeno delovno celico za preizkušanje obrabe orodij pri vročem utopnem kovanju. Testna naprava je bila konstruirana tako, da jo lahko vgradimo v fizikalni simulator Gleeble 1500. Delovno celico sestavlja indukcijski sistem za segrevanje vzorcev z avtomatsko kontrolo temperature ter pnevmatski sistem za vodenje vzorcev iz vročega šaržerja skozi čeljusti z orodjem v zbiralno posodo. Sistem zagotavlja konstantne razmere za več tisoč ciklov, hkrati pa natančno in selektivno kontrolo vseh parametrov, kot so: sila, hitrost naraščanja sile, stopnja deformacije in hitrost deformacije ter temperatura vzorcev in orodja za vsak udarec čeljusti v podajane vzorce. Predstavljen je sistem za testiranje obrabe in meritve obrabe orodij za nekatere laboratorijske pogoje.

Ključne besede: obraba orodij, laboratorijsko preizkušanje obrabe orodij, fizikalna simulacija utopnega kovanja

The computer controlled equipment for testing wear of tool in warm and hot forging dies has been developed. Wear testing set up has been designed for the update Gleeble 1500 physical simulator. Testing equipment consisted of an external induction heating system and a new working cell with computer controlled pneumatic sample manipulating system. Laboratory testing of wear using different tools and different testing parameters is presented.

Key words: wear of tool, wear test, physical simulation of hot die forging

1 Uvod

Obraba orodij pri vročem utopnem kovanju vpliva na trajnost orodij, s tem pa posredno na produktivnost, kvaliteto ter ceno kovanih izdelkov. Zaradi tega je velik interes industrije, da se razvije primerna eksperimentalna metoda, s katero bi lahko ugotavljali vpliv tehnoloških parametrov na obrabo orodij, hkrati pa bi bila testna metoda primerna tudi za študij kinetike obrabe. S selektivnim spreminjanjem vplivnih parametrov pri konstantnih laboratorijskih razmerah, lahko ugotovimo zvezo med obrabo orodij in termomehanskimi parametri.

Fenomenološko ozadje obrabe je v literaturi¹⁻⁵ dobro opisano, medtem ko so testne metode bolj ali manj pomanjkljive. Še najbolj se je fizikalni simulaciji utopnega kovanja približal Schliephake¹. Kljub dobri sistematiki in spreminjanju nekaterih osnovnih parametrov, ki vplivajo na obrabo orodij, pa omenjeni avtor ni mogel spreminjati preoblikovalne sile, hitrosti sile ter kontaktnega časa. Zaradi različnih načinov laboratorijskega testiranja obrabe orodij, rezultati različnih avtorjev niso primerljivi, še manj pa lahko na osnovi le-teh napovedujemo trajnost orodij pri različnih industrijskih procesih. Pač pa vsak od omenjenih avtorjev prispeva k razumevanju nekaterih procesov obrabe in usmerja raziskovalce k primernejšim eksperimentalnim rešitvam.

Na našem oddelku smo razvili popolnoma avtomatiziran in računalniško voden preizkus za določevanje obrabe orodij pri toplem utopnem kovanju, s katerim lahko kontroliramo in spreminjamo vse osnovne parametre,

ki vplivajo na obrabo orodij. Ta trenutek smo po zmogljivostih in uporabnosti našega sistema presegli vse v evropski literaturi nam znane sisteme za laboratorijsko testiranje obrabe orodij¹⁻⁷. Naša osnovna ideja je bila, da izkoristimo kapacitete fizikalnega simulatorja Gleeble 1500 in ga nadgradimo z indukcijskim sistemom za hitro ter kontinuirano segrevanje velikega števila vzorcev ter sistemom za avtomatsko manipulacijo vzorcev od vročega šaržerja, skozi čeljusti z orodjem do zbiralne posode za deformirane vzorce.

2 Mehanizmi obrabe in zahtevani pogoji, ki smo jih upoštevali pri načrtovanju laboratorijske naprave

Osnovne mehanizme obrabe orodja pri toplem utopnem kovanju lahko razdelimo v naslednje skupine¹:

- adhezija
- abrazija
- tribokemične reakcije ali korozija
- utrujenost

Adhezija in abrazija (ter manjši del obrabe zaradi utrujenosti) sta pogojeni s plastično deformacijo^{1,2}. Adhezija je razložena z zvarjenjem hribočkov neravnih površin orodja in kovanega materiala, ki se kasneje zaradi drsenja lahko odlomijo. Obrabo zaradi abrazije povzroči odrezavanje mehkejših delčkov površine orodja s tršimi delci kovanega materiala, z že odlomljenimi delci orodja ali s trdimi delci oksidov. Večja kot je drsna dolžina, več časa trši delci odrezavajo izpostavljene dele orodja in hitrejša je obraba. Orodju se spreminja hrpačnost površine in po večjem številu udarcev dimenzije orodja več ne ustrezajo zahtevanim tolerancam. Zaradi izmeničnih termičnih in mehanskih obremenitev prihaja

¹ Vladimir NARDIN, dipl. inž. met. NTF-OMM, Univerza v Ljubljani Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

do utrujenosti materiala. Pri udarcih hladnega orodja v vroč kovani material je orodje izpostavljeno velikim termičnim obremenitvam, hkrati pa je orodje obremenjeno z velikimi tlačnimi in nateznimi obremenitvami. Na površini orodja se po določenem številu udarcev orodja v vroče vzorce pojavijo termične razpoke, ki se širijo in lahko povzročijo večje lokalne porušitve materiala. Zaradi visokih temperatur se na najbolj obremenjenih mestih orodja spreminja mikrostruktura in trdota, zaradi oksidacije pa tudi sestava površine. Če so orodja prevlečena z zaščitnimi oksidnimi plastmi, le-te sčasoma razpokajo in se začnejo luščiti, na novo nastali delci pa sodelujejo pri uničevanju površine orodja.

Večina avtorjev (Schliephake¹, Mroz in Stupkiewitz², Hansen³) meni, da je pri industrijskih razmerah utopnega kovanja abrazija glavni mehanizem obrabe orodja. S stališča eksperimentalne tehnike in laboratorijskih meritev velja poudariti, da je zelo težko ali skoraj nemogoče spremljati in meriti delež obrabe, ki ga povzroči samo en izmed glavnih mehanizmov. Adhezija, abrazija, korozija in tribokemične reakcije se pri visokih temperaturah in velikih mehanskih obremenitvah med sabo prekrivajo. Naš osnovni namen je bil razviti tako testno metodo, s

katero bomo lahko selektivno spreminjali parametre, ki vplivajo na obrabo orodij in določevali vpliv posameznih parametrov na hitrost celotne obrabe.

3 Eksperimentalna tehnika

Sistem za določevanje obrabe v laboratoriju sestavljajo naslednje naprave:

- fizikalni simulator Gleeble 1500, ki je osnovna testna naprava, hkrati pa določa konstrukcijo vseh drugih enot
- delovna celica z vodili za avtomatsko vodenje vzorcev, ki jih poganja pnevmatski sistem
- indukcijski sistem za kontinuirano segrevanje vzorcev z avtomatsko regulacijo temperature
- sistem za vodno hlajenje vseh, temperaturi izpostavljenih vodil in orodja

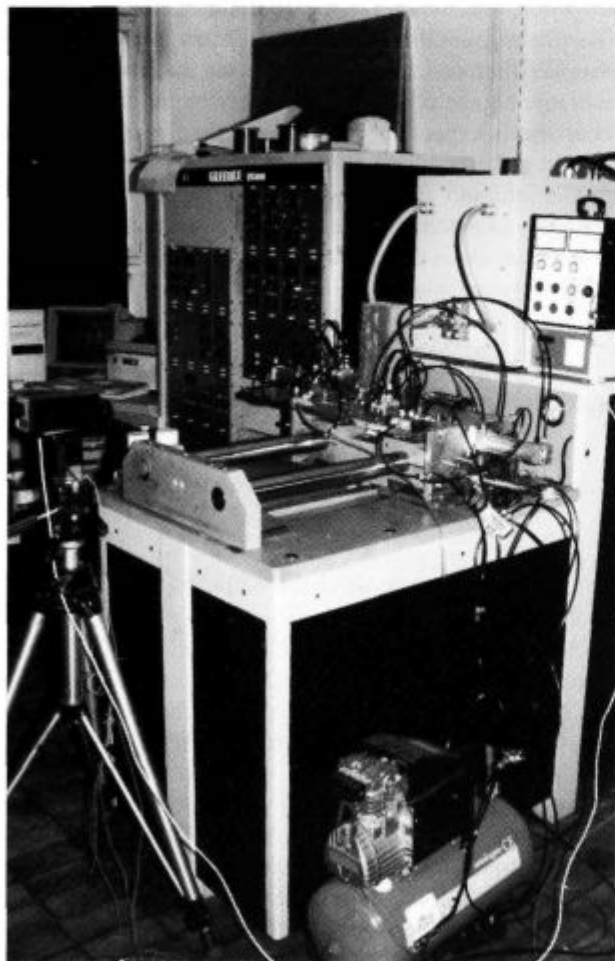
Postopek preizkušanja: Vzorce segrevamo v posebnem betonskem šaržerju, v katerega je vgrajena tuljava induktorja. Temperaturo vzorcev meri pirometer, ki preko kontrolne enote uravnava moč generatorja IG 20/30 HY. Program v kontrolni enoti MTR-700 je tako napisan, da preprečuje staljenje vzorcev v primeru kakršnegakoli zastoja, prav tako pa mora reakcijski čas upoštevati vse lastnosti materiala vzorcev, induktorja in generatorja ter delovnega cikla. Temperaturo orodja merimo ločeno z termoelementi merilnega sistema Gleeble 1500.

Ko se prvi potisni bat delovne celice odmakne, odpre vroč šaržer, iz katerega segret vzorec pade v vodno hlajeno bakrene tračnice. Prvi bat ga potisne v vertikalno vodilo, skozi katerega pade na delovno mizico pod čeljusti z orodjem, ki določa horizontalni položaj vzorca pred deformacijo. Sledi računalniško vodena deformacija vzorca ter dvostopenjski izmet vzorca v zbiralno posodo. Delovanje treh pnevmatskih cilindrov uravnava stikala, pritrjena na delovnem batu fizikalnega simulatorja. Računalniški program določa časovni položaj bata ter s tem vklapljanje in izklapljanje pnevmatskih stikal.

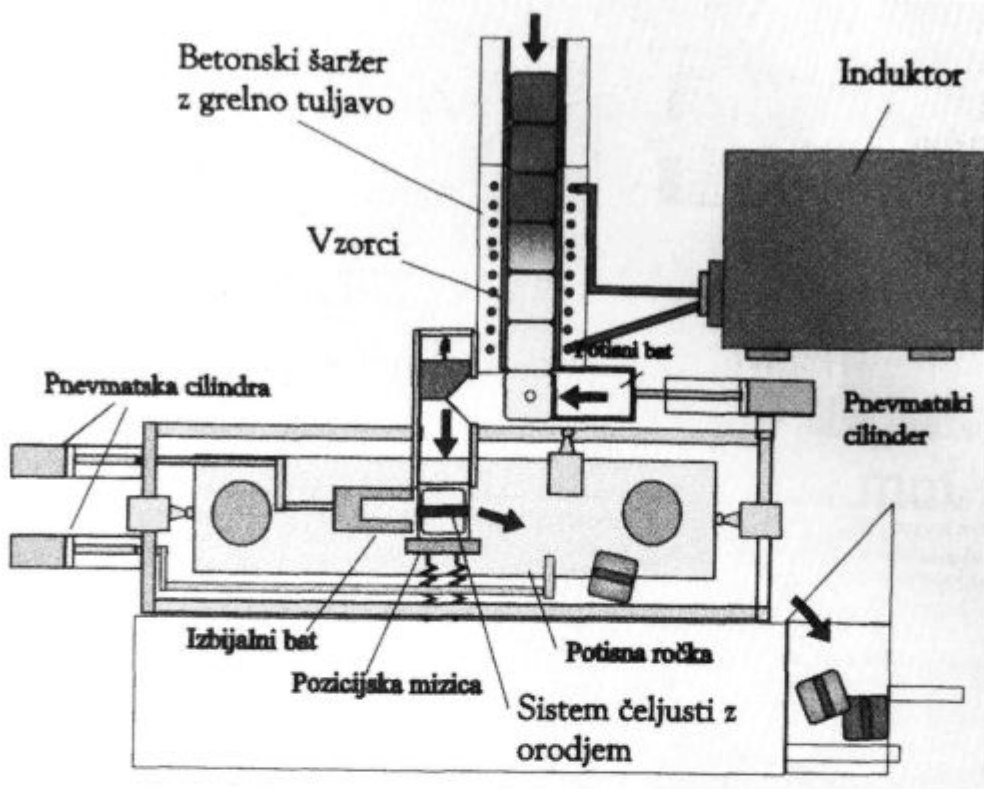
Število ciklov (število udarcev orodja v podajane vzorce) je odvisno od pogojev preizkušanja in od hitrosti obrabe orodja. Nekatera nekvalitetna in mehkejša orodna jekla (W.NR. 1.2008) so zdržala v navadnih razmerah utopnega kovanja le nekaj sto udarcev, kvalitetna ali vodno hlajena orodja (W.NR 12344) so ostala nepoškodovana tudi po nekaj tisoč udarcih.

4 Laboratorijsko preizkušanje obrabe orodij in rezultati

Za zagon sistema, preizkušanje računalniškega programa, nastavitve stikal, določitev potisnih in prostih poti vzorcev, izračun parametrov segrevanja ter določanje posameznih korakov delovnega cikla smo uporabili enostavne geometrije orodja, mehke materiale in daljše čase posameznih korakov. Po nekaj sto preliminarnih udarcih pri različnih pogojih, smo določili konstante de-



Slika 1: Sistem za preizkušanje obrabe orodij v laboratoriju
Figure 1: Testing system for wear test



Slika 2: Shematična predstavitev preizkušalnega obrabe orodij in smeri vodenja vzorcev od vročega šaržerja preko čeljusti s preizkušnim orodjem do zbiralne posode

Figure 2: Schematic presentation of wear test and paths of specimen from hot charger through working cell and tool system towards the deposit box

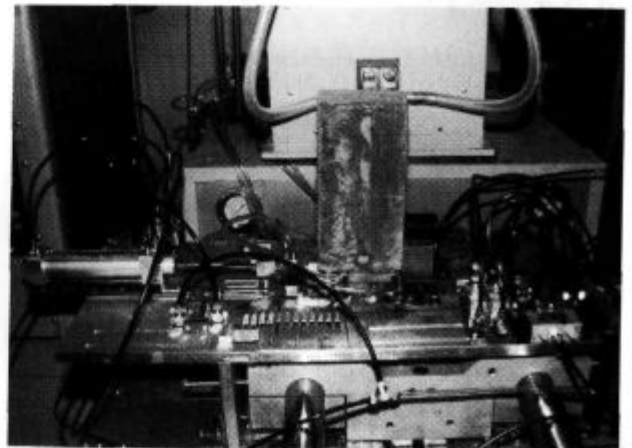
lovne celice, program segrevanja in vzdrževanja temperature ter maksimalne sile, deformacije in hitrosti deformacije za različne pogoje testiranja. Če smo spremenili geometrijo ali material orodja ali geometrijo vzorcev smo še enkrat preverili vse parametre preizkušanja. Zaradi poenostavitve in hitrega izračuna napetosti je začetna geometrija vzorcev ustrezala dimenzijam preizkušancev za ploski tlačni test (slika 3a). Primernejše in bolj zahtevne geometrije orodja smo razvili z upoštevanjem deformacijskih in napetostnih pogojev pri vročem utopnem kovanju. Z metodo končnih elementov smo za vsako geometrijo orodja simulirali celoten potek deformacijske faze ter izračunano integralno preoblikovalno silo primerjali z izmerjenimi vrednostmi. Primer izračuna razporeditve primerjalnih deformacij po Misesu za deformacijo vzorcev s tremi različnimi laboratorijskimi orodji prikazuje slika 4a-c.

Sistematično selektivno določevanje obrabe pri konstantnih razmerah smo začeli izvajati z orodnim jeklom W.N.R. 1.2008. Po 200 udarcih v vzorce, segrete na 950°C, se je orodje plastično deformiralo oziroma je bil material neprimeren.

Več serij pri različnih pogojih smo izvedli z laboratorijskimi orodji iz orodnega jekla za delo v vročem W.N.R. 1.2344 (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Vsa orodja so bila toplotno obdelana do trdote 43 HRC. Prvo serijo udarcev smo izvedli pri temperaturi vzorcev 950°C, temperaturi orodja 20°C (temperatura je bila merjena med testom 1 mm od preoblikovalne površine), s preoblikovalno silo 50 kN, hitrostjo naraščanja

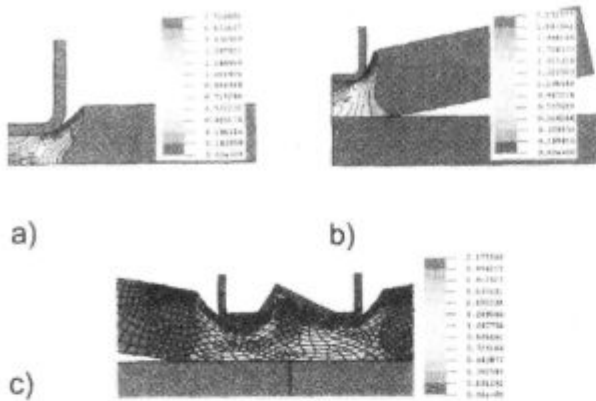
preoblikovalne sile 70 kN/s, ter maksimalno deformacijo vzorcev 0.35.

Ker je bilo orodje vodno hlajeno, se njegova geometrija po 1250 udarcih ni spremenila (slika 6), zanemarljivi pa se bili tudi drugi sledovi obrabe. Kljub temu pa so meritve trdote površine vzdolž uporabljenega orodja pokazale razliko. Podobno kot temperaturni gradient se je spremenila tudi trdota, in sicer od začetnih 43



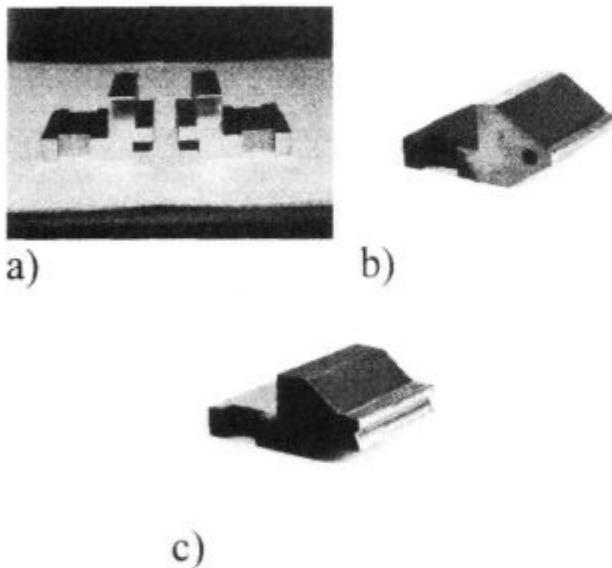
Slika 3: Delovna celica za preizkušanje obrabe orodij, pritrjena na fizikalni simulator Gleeble 1500

Figure 3: The wear test working cell installed on Gleeble 1500



Slika 4: Izračun ekvivalentnih deformacij po Misesu za tri različna orodja in laboratorijske razmere z uporabo FEM

Figure 4: FEM calculation of equivalent Mises strain for three different tool geometries and laboratory condition

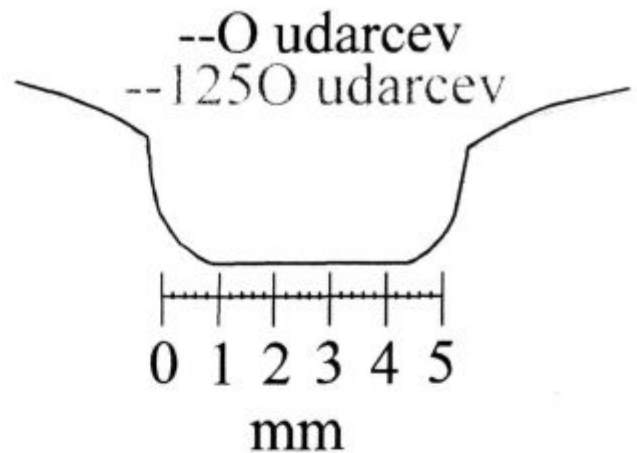


Slika 5: Tri različne geometrije laboratorijskih orodij za preizkušanje obrabe

Figure 5: Three different tool geometries for wear test

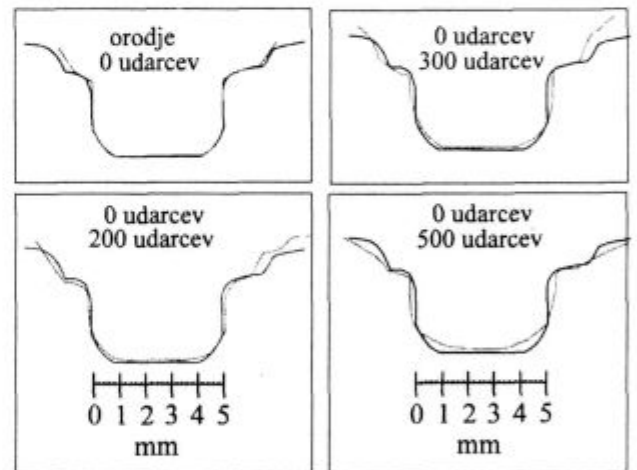
HRC na robu do 35 HRC v sredini, kjer je bila tudi največja toplotna obremenitev.

Da bi povečali termične in mehanske obremenitve orodja, hkrati pa preprečili plastično deformacijo, smo povečali temperaturo vzorcev na 1050°C in povečali zaokrožitve na orodju (slika 4b in slika 5b). Pogoji preizkušanja so bili: preoblikovalna sila = 50 kN, hitrost naraščanja sile = 70 kN/s, maks. deformacija vzorcev = 0.5. Pri teh pogojih smo izvedli dve seriji udarcev. Edina razlika, ki pa se je kasneje izkazala za bistveno, je bila temperatura orodja. Ko smo orodje vodno hladili in merjena temperatura med preizkušanjem ni presegla 20°C, je orodje preneslo 500 udarcev skoraj brez poškodb, pri



Slika 6: Začetna kontura preizkušane orodja in kontura po 1250 udarcih. Material: orodno jeklo za delo v vročem W.N.R. 1.2344 (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Parametri preizkušanja: temperatura vzorcev = 950°C, temperatura orodja = 20°C, F = 50 kN, F/t = 70 kN/s

Figure 6: Starting tool contour and tool contour after 1250 strokes. Tool material: W.N.R. 1.2344 hot working tool steel (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Testing parameters: specimen temp. = 950°C, tool temp. = 20°C, F = 50 KN, F/t = 70 KN/sec

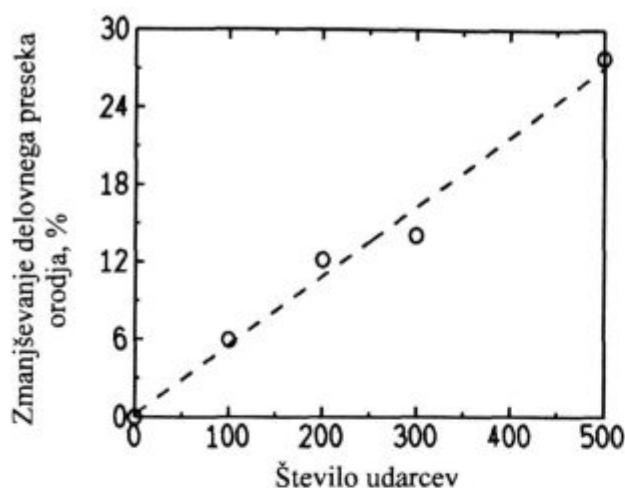


Slika 7: Začetni presek orodja in primerjava le-tega s preseki orodij po 200, 300 in 500 udarcih. Material orodja: orodno jeklo za delo v vročem (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Parametri preizkušanja: temperatura vzorcev = 1050°C, temperatura orodja = 320°C, F = 50 kN, F/t = 70k N/s

Figure 7: Starting tool contour compared to tool contours after 200, 300 and 500 strokes. Tool material: hot working tool steel (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Testing parameters: specimen temp. = 1050°C, tool temp. = 320°C, F = 50 KN, F/t = 70 KN/sec

drugi seriji, ko pa je temperatura na mestu meritve dosegla 320°C, se je orodje po 500 udarcih močno obrabilo. Primerjavo izmerjenih kontur za obe seriji prikazuje slika 8.

Podobne rezultate smo dosegli tudi pri preizkušanju orodij iz mehkejših materialov na temperaturah 1000°C in 1050°C. Višja kot je bila temperatura vzorcev, hitreje



Slika 8: Sprememba delovnega preseka preizkušane orodja po 100, 200, 300 in 500 udarcih. Material orodja: orodno jeklo za delo v vročem (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Parametri preizkušanja: temperatura vzorcev = 1050°C, temperatura orodja = 320°C, F = 50 kN, F/t = 70 kN/s

Figure 8: Loss of tool crosssection after 100, 200, 300 and 500 strokes during wear test. Tool material: hot working tool steel (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Testing parameters: specimen temp. = 1050°C, tool temp. = 320°C, F = 50 kN, F/t = 70 kN/sec

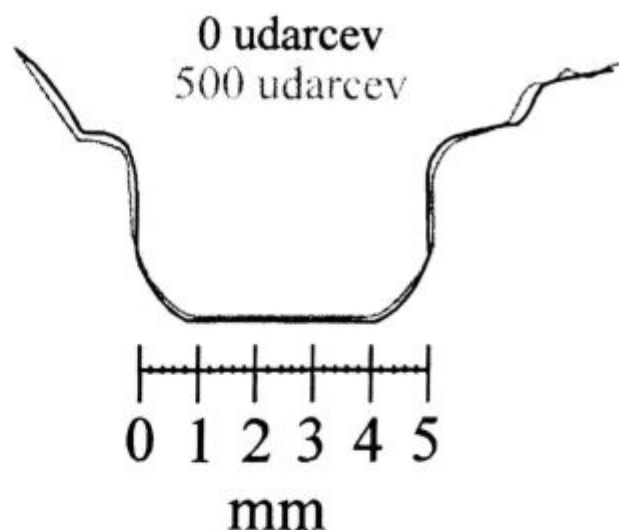
se je orodje obrabljalo. Poleg temperature vzorcev in temperature površine preizkušane orodja na hitrost obrabe vpliva tudi kontaktni čas med orodjem in vročim vzorcem. Že nekaj desetink sekunde zadrževanja orodja v stiku z vročim, deformiranim vzorcem, pospeši obrabo.

Čeprav smo razvili zelo precizno metodo preizkušanja obrabe orodij, smo se zaenkrat osredotočili na merjenje celotne obrabe, to je geometrije in hrapavosti površine orodja. Z drugimi preiskavami kot je SEM, pa je mogoče natančneje ugotoviti, kateri izmed glavnih mehanizmov obrabe pri določenih pogojih prevladuje. Na osnovi industrijskih in laboratorijskih meritev ter z numeričnimi metodami, lahko računalniško simuliramo preoblikovalne faze industrijskega procesa in določimo kritične točke, kjer na orodju nastopajo največje termomehanske obremenitve.

Z uporabo opisanega sistema za določevanje obrabe ter rezultati omenjenih simulacij, lahko izvedemo realno fizikalno simulacijo industrijskega procesa utopnega kovanja. S kontroliranim spreminjanjem parametrov laboratorijske simulacije in z upoštevanjem industrijskih zahtev, lahko hitro izboljšamo nekatere tehnološke parametre.

5 Sklep

Predstavljena metoda za preizkušanje obrabe orodij pri pogojih vročega utopnega kovanja omogoča selektivno spreminjanje parametrov preoblikovanja pri konstantnih laboratorijskih razmerah. Bistvena prednost laboratorijskega preizkusa je popolna avtomatizacija in računalniško krmiljenje vseh faz posameznega cikla ter



Slika 9: Začetna kontura orodja in kontura orodja po 500 udarcih. Material orodja: orodno jeklo za delo v vročem (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W), parametri preizkušanja: temperatura vzorcev = 1050°C, temperatura orodja = 20°C, F = 50 kN, F/t = 70 kN/s

Figure 9: Starting tool contour compared to tool contours after 500 strokes. Tool mat.: hot working tool steel (0.4 C, 1.05 Si, 0.4 Mn, 5.15 Cr, 1.35 Mo, 1.00 W). Testing parameters: specimen temp. = 1050°C, tool temp. = 20°C, F = 50 kN, F/t = 70 kN/sec

kontinuirano merjenje sile, hitrosti naraščanja sile, stopnje deformacije, temperature vzorcev in temperature orodja. Zaradi kratkega časa enega cikla, ki je v povprečju 4 sekunde, je mogoče izvesti tudi več tisoč udarcev v enem dnevu. Laboratorijsko orodje lahko izpostavimo podobnim pogojem, kot nastopajo v industriji ali pa ekstremnim pogojem, ki obrabo pospešijo. Preizkus je zelo primeren za preizkušanje različnih orodnih materialov, različnih toplotnih in površinskih obdelav, geometrij orodij itd, zaradi svoje natančnosti in praktično neizčrpnih možnosti selektivnega spreminjanja termomehanskih parametrov pa je namenjen tudi študiju kinetike obrabe.

Prvi rezultati so pokazali, da temperatura kovanega materiala ter kontaktni čas in s tem temperatura orodja močno vplivajo na hitrost obrabljanja orodja. V laboratorijskih razmerah se je orodje kljub večji sili, potrebni za enako stopnjo deformacije, pri temperaturi 1000°C obrabilo manj kot pa pri 1050°C. Izkazalo se je tudi, da je orodje zelo občutljivo na kontaktni čas, ki naj bi bil čim krajši. Na obrabo orodij pri utopnem kovanju torej vlivajo:

- lokalni kontaktni pritiski med kovanim materialom in orodjem
- relativni zdrs ali dolžina zdrsa med kovanim materialom in orodjem
- temperatura kovanega materiala
- kontaktni čas med kovanim materialom in orodjem
- temperatura površine orodja
- mehanske lastnosti orodja ter temperatura popuščanja toplotno obdelanega orodja

g) mazivo

Obrabo močno zmanjšujejo oksidne, nitridne, metalne in druge prevleke površine orodja, ki pa jih zaenkrat še nismo preskusili, sicer bi raziskava postala preobsežna. Osnovni namen nadaljnjih preskušanj bo oblikovanje odnosa med vplivnimi parametri in hitrostjo obrabe orodij.

Predstavljena fizikalna simulacija je osnova za gradnjo podatkovne baze o obrabi orodij pri vročem utopnem kovanju. Skladno z uporabo numeričnih metod, industrijskih meritev in obdelavo baze podatkov z metodo nevronske mreže, bo napovedovanje trajnosti orodij naposled postalo resničnost.

6 Literatura

¹ U. Schliephake: Analyse des Werkzeugverschleisses beim Gensenschmieden, *Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr 306*, Düsseldorf: VDI-Verlag 1994

² Z. Mroz and S. Stupkiewicz: An Anisotropic friction and Wear Model, *Int. J. Sol. Struct.*, 31, 1113-1131

³ U. Horlacher: *Prüfung des Einflusses von Schmierstoffadditiven auf das Tribosystem bei der Kaltmassivumformung*, Springer Verlag, 1989

⁴ Lim, S. C. Ashby: Wear-mechanism maps, *Acta Metall.*, 35, 1987, 1, 1-24

⁵ P. H. Hansen, *Analysis of wear distribution in forging dies*, Ph. D. thesis, Technical University of Denmark, Publication No. MM.91.06

⁶ M. S. Loveday and T. B. Gibbons: *Harmonisation of Testing Practice for High Temperature Materials*, Elsevier Applied Science 1992

⁷ P. F. Bariani, et al.: Wear in Hot and Warm Forging: Design and Validation of a New Laboratory test, *Annals of the CIRP*, Vol.45/1, 249-254

⁸ E. Rabinowicz: *Friction and Wear of Materials*, John Willey & Sons, Inc., 1995

⁹ V. Nardin, M. Terčelj, R. Turk: *Design of a Gleeble Wear Test*, *STEEL STRIP 496*, VB-Tehnicka univerzita Ostrava, Czech Republic, 332-336

¹⁰ R. Turk, I. Peruš, V. Nardin: *A new Procedure for Flow Curves Calculation*, *STEEL STRIP 496*, VB-Tehnicka univerzita Ostrava, Czech Republic, 340-344