

<https://doi.org/10.24867/JPE-1994-11-069>

PREGLEDNI RAD

Milikić D., Gostimirović M.*

TEMPERATURE REZANJA PRI OBRADI BRUŠENJEM ZERSPANTEMPERATUREN BEIM SCHLEIFEN

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden die Zerspantemperaturen beim Schleifen aus einigen wichtigen Gesichtspunkte betrachtet. Der erste Gesichtspunkt bezieht sich auf die Entwicklung und Verteilung der Wärmeenergie beim Schleifen, einschliesslich auch Definitionen der charakteristischen Zerspantemperaturen. Der zweite Gesichtspunkt umfasst die Problematik der Temperaturbestimmung beim Schleifen, sowohl der charakteristischen Zerspantemperaturen als auch des gesamten Temperaturfeldes. In diesem Teil werden die eigene Forschungen in der Entwicklung und in der Anwendung der eigenen Methoden für die Temperaturmessung beim Flachsleifen besonders betont. Der dritte Gesichtspunkt untersucht den Einfluss von Prozessgrundparameter auf die Höhe der Zerspantemperaturen beim Schleifen. In diesem Zusammenhang wird die Auswahl der Zerspanparameter beim Schleifen diskutiert. Diese Zerspanparameter sollen den negativen Einfluss von Zerspantemperatur auf die Veränderung in der Oberflächenschicht so gering wie möglich halten. Anschliessend werden die Möglichkeiten der Nutzung der Zerspantemperaturen für die Prozesssteuerung beim Schleifen analysiert.

*) Milikić dr Dragoje, dipl. ing., redovni profesor, Gostimirović mr Marin, dipl. ing., asistent, Institut za proizvodno mašinstvo, FTN, Novi Sad, V. Perića-Valtera 2.

Rezime

U ovom radu razmatraju se temperature pri obradi brušenjem sa nekoliko najvažnijih aspekata. Prvi aspekt odnosi se na razvoj i distribuciju toplotne energije pri obradi brušenjem uključujući i definisanje karakterističnih temperatura u zoni rezanja. Drugi aspekt obuhvata problematiku određivanja temperatura pri brušenju i to kako karakterističnih tako i kompletnog temperaturskog polja u zoni rezanja. U ovom delu poseban naglasak se daje na sopstvena istraživanja u cilju razvoja i praktične primene nekih od metoda za merenje temperatura pri ravnom brušenju. Treći aspekt odnosi se na analizu uticaja elemenata režima obrade brušenjem na visinu temperatura pri rezanju. U vezi toga posebno se govori o izboru parametara brušenja koji omogućuju da se štetan uticaj temperatura brušenja na promene u površinskom sloju obradka svedu na najmanju moguću meru. Na kraju su razmotrene i mogućnosti korišćenja temperatura rezanja za upravljanje procesom brušenja.

1.0. UVOD

Brušenje se danas ubraja među najvažnije postupke obrade skidanjem strugotine. Ako su prognoze o budućnosti ovog postupka obrade ispravne, onda će se relativno učešće brušenja među ostalim postupcima obrade rezanjem i dalje povećavati. Razlozi za to su, sa jedne strane, poznate prednosti brušenja od kojih treba istaći visoku tačnost mera i oblika, visoki kvalitet obrađene površine i mogućnost obrade vrlo teško obradljivih materijala. Sa druge strane, uspelo se prevazići reletivno mala proizvodnost, koja je dugo vremena bila glavni nedostatak brušenja. Bitno za povećanje proizvodnosti i kvaliteta obrade pri brušenju je dalje povećanje brzine rezanja. Prema prognozama CIRP-a ova brzina će 2000. godine najverovatnije iznositi cca 300 m/s [1].

Kao što će analiza koja sledi pokazati, povećanje brzine rezanja pri brušenju izaziva znatno povećanje razvijene toplote. Nepoželjno povećanje toplote u zoni rezanja, a u vezi sa tim i pojava visokih temperatura, kao i poteškoće odvođenja razvijene toplote, dovode do ekstremnog termičkog opterećenja obradka i tocila, su pojave koje predstavljaju osnovno ograničenje za dalji razvoj postupka obrade brušenjem.

2.0. OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA BRUŠENJA

Obrada brušenjem se znatno razlikuje od postupaka obrade rezanjem sa definisanom reznom geometrijom, kao što su struganje ili glodanje. Objašnjenja procesa brušenja pomoću ovih postupaka obrade, koja su se ranije najčešće koristila, pokazala su se prilično neadekvatnim. Proces brušenja se može mnogo bolje opisati i objasniti pomoću statističkih metoda.

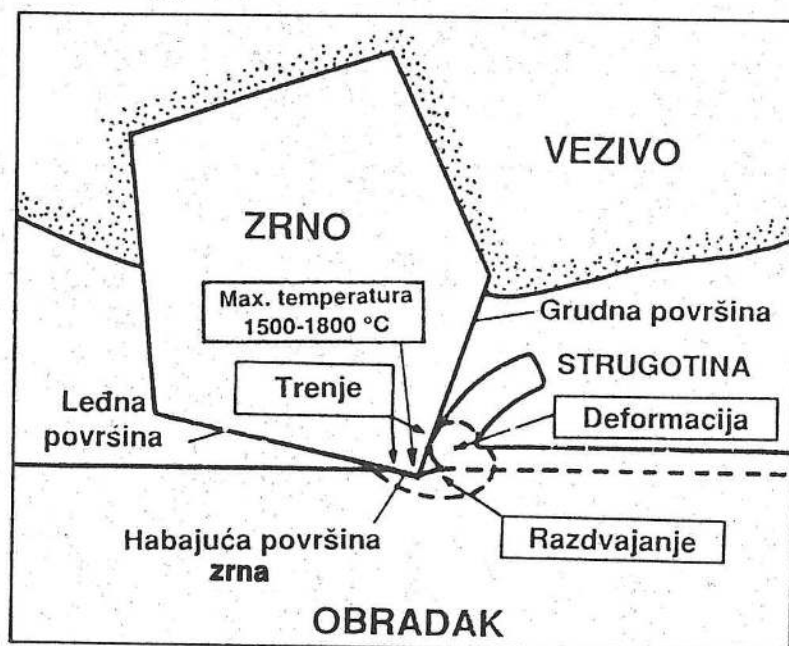
Najvažnije karakteristike iz kojih proizilazi sva složenost postupka obrade brušenjem, mogu se rezimirati u sledećem:

- Potpuno nepravilni oblici brusnih zrna, odnosno njihovih reznih sečiva;
- Neravnomeran raspored brusnih zrna u tocilu, a time i relativno prema obradku;
- Različite mogućnosti zahvata pojedinih brusnih zrna u obradak (normalno rezanje ili samo brazdanje površine);
- Veoma nepovoljna rezna geometrija brusnih zrna sa mehaničkog i termičkog stanovišta, koja se ogleda u malom leđnom uglu (često cca 0°) i negativnom grudnom uglu (najčešće između -45 i -80°) [1];
- Velike elastične i plastične deformacije koje nastaju u obradku i strugotini;
- Nepovoljni uslovi za normalno odvođenje strugotine (relativno mali prostor između susednih brusnih zrna za smeštaj strugotine dok su zrna u zahvatu).

Dalja karakteristika procesa brušenja je veličina specifične energije rezanja izražena u (J/mm^3). Tako npr. pri finom brušenju potrebno je $20 \div 100 J/mm^3$, a pri najfinijem brušenju čak $60 \div 200 J/mm^3$. Kod alata sa definisanom reznom geometrijom, npr. pri struganju, potrebno je samo $1 \div 10 J/mm^3$.

3.0. RAZVOJ I DISTRIBUCIJA TOPLOTNE ENERGIJE PRI OBRADI BRUŠENJEM

U procesu brušenja se skoro celokupan mehanički rad mikrorezanja pretvara u toplotnu energiju. Samo neznatan deo ovog rada (cca 0,1%) se pretvara u latentnu energiju izmene kristalne rešetke materijala obradka. Na slici 1. prikazani su najvažniji procesi i njihove lokacije na kojima se energija mikrorezanja jednog brusnog zrna pretvara u toplotnu energiju [1].



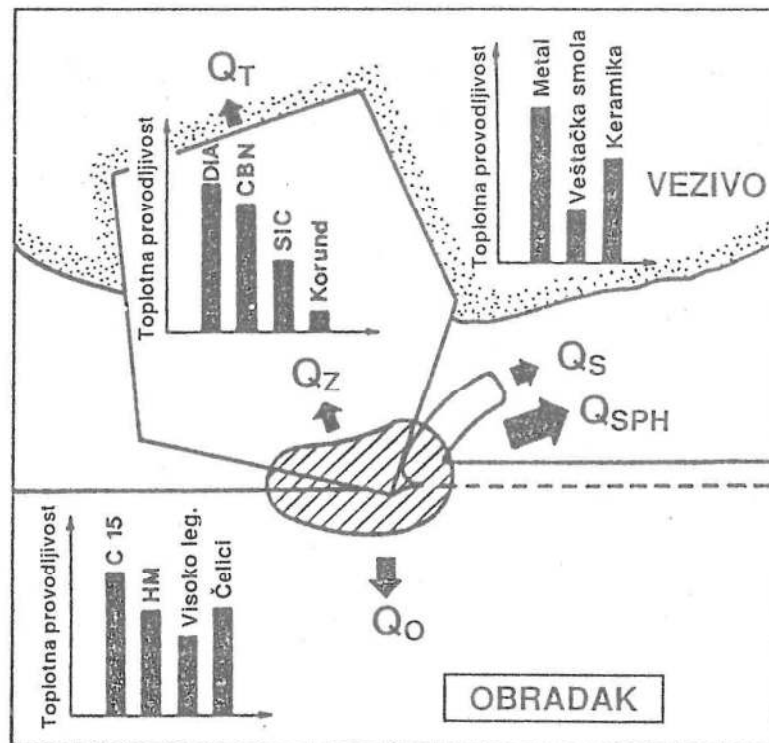
Slika1. Nastanak toplote trenja i deformacije pri rezanju jednog brusnog zrna
Bild 1. Entstehung von Reibungs und Deformationswärme in der Kontaktzone

Na leđnoj površini brusnog zrna, koja je karakterisana vrlo malim leđnim uglom, dolazi do pretvaranja mehaničkog rada u toplotu putem elastičnih deformacija materijala obradka i intenzivnog trenja sa obrađenom površinom. Na grudnoj površini brusnog zrna, koju karakteriše izrazito negativan grudni ugao, takođe dolazi do jakog trenja sa strugotinom, pa se tako i ovde deo mehaničkog rada pretvara u toplotu. Dalja transformacija mehaničkog rada u toplotu ostvaruje se putem plastične deformacije materijala radi obrazovanja strugotine. Jedan deo mehaničkog rada pretvara se u toplotu putem razdvajanja materijala neposredno ispred vrha brusnog zrna. Jedan od izvora toplote pri brušenju predstavlja prostor za smeštaj strugotine (prostor između dva susedna brusna zrna) u kome se javlja trenje između strugotine i zrna, odnosno strugotine i vezivnog sredstva.

Pomenuti procesi trenja (ovde treba pridodati i unutrašnje trenje u materijalu obradka), elastičnih i plastičnih deformacija i razdvajanja, definišu se kao elementarni toplotni izvori u zoni brušenja.

Posmatrano zbirno, najveći deo toplotne energije pri brušenju posledica je trenja (čak 90÷92%), potom sledi deo koji nastaje zbog elastičnih i plastičnih deformacija, a najmanji je deo koji potiče od energije razdvajanja.

Od navedenih izvora, toplotna energija se odvodi provođenjem, konvekcijom i zračenjem. Na slici 2. prikazani su toplotni tokovi kojima se razvijena toplotna energija odvodi iz zone brušenja [1]. To su: brusno zrno sa toplotom Q_Z , koja se dalje provodi na tocilo Q_T , zatim obradak sa Q_O , strugotina sa Q_S i sredstvo za hlađenje i podmazivanje sa Q_{SHP} . Raspodela toplotne energije na ove tokove određuju fizička



Slika 2. Toplotni tokovi u zoni brušenja
Bild 2. Wärmefluss in der Schleifzone

svojstva sistema: *obradak - brusno zrno - strugotina - vezivno sredstvo - SHP-sredstvo*. Odlučujuću ulogu pri tome igra toplotna provodljivost obradka, brusnih zrna i vezivnog sredstva, čije su relativne vrednosti, za važnije materijale, prikazane na slici 2.

Najveći deo razvijene toplote iz zone brušenja odvodi se **konvekcijom** preko SHP-sredstva i strugotine (75÷90%), zatim **provođenjem** preko obradka i tocila (10÷20%), a najmanje **zračenjem** sa obradka i tocila (2÷5%). Vema povoljna okolnost je to što se preko strugotine i SHP-sredstva može odvoditi daleko najveći deo razvijene toplote. Nepovoljno je to što, pri neadekvatnim uslovima obrade, količina toplote koja se odvodi preko obradka može da bude višestruko puta veća od navedene (čak 80%) i da kao takva može da izazove veliki broj nepoželjnih termičkih efekata o kojima će u ovom radu biti izneta detaljnija razjašnjenja.

4.0. UTICAJ RAZVIJENE TOPLOTE NA OBRADAK I TOCILO

Količina toplotne energije koja iz zone brušenja odlazi u obradak zavisi, kako smo ranije videli, od fizičkih svojstava elemenata obradnog sistema koji sudeluju u procesu rezanja. U svakom slučaju ona može biti dovoljno velika da u površinskom sloju obradka izazove niz nepoželjnih termičkih efekata, od kojih su najvažniji: **mestimično opaljena površina-tzv. toplotne fleke, mikronaprslina, strukturne promene, promene tvrdoće i zaostali unutrašnji naponi**. Ovome svakako treba dodati i **dimenzionalne greške i greške oblika** koje takođe mogu nastati kao posledica delovanja toplote rezanja na obradak.

Krajnji ishod štetnog delovanja toplote na obradak je **škart**, odnosno u najboljem slučaju potreba za **doradom**, što svakako izaziva povećanje troškova proizvodnje.

Razvijena toplota pri brušenju ne deluje štetno samo na obradak već i na tocilo. Kao što smo ranije konstatovali, brusna zrna se pri rezanju zagrevaju i do 1800 °C što ima za posledicu njihovo omekšavanje, odnosno dolazi do smanjenja njihove tvrdoće i mehaničke čvrstoće. Osim toga, brusna zrna, zbog periodičnog rezanja, trpe vrlo velike temperaturske promene koje se kreću od nekoliko 100 °C do 1500 °C u mikrosekundi. Posledica ovakvog delovanja toplote je prevremeni gubitak reznih sposobnosti brusnih zrna, što još više povećava njegovo zagrevanje. Krajnji efekat delovanja toplote na brusna zrna je povećano **zatupljenje tocila**, a to znači **kraći ciklus oštrenja**, što sve takođe utiče na povećanje troškova proizvodnje.

Delovanje toplote rezanja na vezivno sredstvo dovodi do njegovog omekšavanja, odnosno do smanjenja mehaničke čvrstoće. Osim toga dolazi i do termičkog razlaganja veziva, pogotovo njegovih organskih sastojaka. Posledica delovanja ovih promena na vezivno sredstvo je prevremeno **ispadanje brusnih zrna**, a to znači **ostvaruje se veća potrošnja tocila**, što i u ovom slučaju ima za posledicu **povećanje troškova proizvodnje**.

Prethodno iznetoj analizi delovanja toplote rezanja na obradak i tocilo treba dodati i moguće fizičko -hemijsko delovanje između obradka, brusnih zrna i SHP-sredstva.

Visoke temperature brušenja mogu dovesti do rastvaranja-difuzije materijala brusnih zrna u materijal obradka i obrnuto. Primer za to je razaranje sečiva kod dijamantskih brusnih zrna putem rastvaranja dijamanta (čitaj ugljenika) u niskougljenične čelike. Drugi primer odnosi se na razgrađivanje reznih ivica korunda (Al_2O_3) pri brušenju Fe-materijala. Naime, gvožđe brzo oksidiše na visokim temperaturama, a oksidi se rastvaraju u brusna zrna, pa tako vrlo žilavo-tvrđi korund prelazi u jedan mnogo mekši, krti oblik korunda (ružičasti korund), koji se mnogo brže troši (kruni). Slično se dešava i pri brušenju Ti-materijala gde se nastali Ti-oksidi takođe rastvaraju u korund. Doduše Ti-oksidi čine korund žilavijim, ali pri tome nastaje i proces vrlo čvrstog difuzionog zavarivanja između površina brusnih zrna i materijala obradka.

Nadalje, poznat je slučaj razgrađivanja kubnog bornitrida (CBN) delovanjem vode, koji se često citira u literaturi. Naime, pri korišćenju vodenih rastvora (emulzija) kao SHP-sredstava, vrlo tvrdi CBN prelazi u bornu kiselinu rastvorljivu u vodi i u amonijak.

Rezultat delovanja prethodno pobrojanih procesa je razaranje, odnosno zatupljenje reznih elemenata tocila, što dovodi do povećanog trenja, a ono opet do povećanja razvijene toplote i tako se krug nepovoljnog delovanja toplote pri brušenju zatvara.

Izneta analiza nepoželjnog delovanja toplote pri brušenju na obradak i tocilo samo delimično oslikava svu složenost ove problematike. U uslovima delovanja visokih pritisaka i temperatura u zoni brušenja nastaju vrlo kompleksne uzajamne reakcije svih komponenata procesa rezanja, odnosno: brusnih zrna, obradka, strugotine, vezivnog sredstva i okoline (SHP-sredstva i atmosfere). Ove reakcije su najvećim delom nedovoljno razjašnjene, a delom, nažalost i pogrešno objašnjene.

Na osnovu prethodno iznete analize toplotnih uticaja pri brušenju može se konstatovati da razvijene visoke količine toplote dovodi do visokih temperatura koje izazivaju štetno delovanje na obradak i tocilo. Na osnovu toga može se zaključiti, sa jedne strane, da se mora uticati da razvijena toplota bude što je moguće manja, što se postiže korišćenjem oštarih, temperaturski postojanih sečiva i dobro podmazujućih SHP-sredstava, a sa druge strane, da odvođenje toplote iz zone rezanja bude što je moguće veće, što se postiže primenom SHP-sredstva koja poseduju visoku toplotnu provodljivost. Preostali deo nastale toplote, koji treba da bude što je moguće manji, treba najvećim delom da preuzme tocilo, koje treba da poseduje visoku temperatursku postojanost brusnih zrna i vezivnog sredstva. I ovde se može govoriti o povratnom efektu: *što je veća temperaturska postojanost i hemijska stabilnost brusnih zrna, utoliko su ona postojanija, a sečiva oštija, odnosno utoliko je manja proizvedena toplota.*

5.0. METODE ODREĐIVANJA TEMPERATURA PRI BRUŠENJU

Kao što je ranije već navedeno, pod uticajem razvijene toplote u zoni brušenja nastaje temperatursko polje koje se odlikuje sledećim karakterističnim temperaturama:

Θ_{max} - Trenutna temperatura. Maksimalna temperatura koja nastaje pri rezanju pojedinih brusnih zrna. Ona se karakteriše vrlo visokim vrednostima (od

1500 do 1800 °C) i kratkotrajnim delovanjem (od 10^{-4} do 10^{-5} s.). Ova temperatura utiče na fizičko-hemijske procese koji dovode do habanja brusnih zrna.

- Θ_k - **Kontaktna temperatura.** Maksimalna temperatura koja nastaje u zoni kontakta obradak - tocilo i rezultat je delovanja većeg broja brusnih zrna, odnosno elementarnih toplotnih izvora. Ona je mnogo manja od Θ_{max} i u vezi je sa efikasnošću odvođenja toplote iz zone brušenja. Ima odlučujući uticaj na defek koji nastaju u površinskom sloju obradka.
- Θ_o - **Temperatura obradka.** Srednja temperatura na koju je stalno zagrejana površina obradka. Ona je znatno niža od Θ_k i utiče pre svega na toplotnu deformaciju obradka, odnosno na tačnost mera i oblika koji se dobijaju pri brušenju.

Na visinu gore navedenih karakterističnih temperatura pri brušenju utiču sledeći faktori:

- Položaj, veličina i broj elementarnih toplotnih izvora;
- Vremenski tok nastajanja toplote i hlađenja;
- Provodljivost materijala obradka, brusnih zrna, vezivnog sredstva i SHP-sredstva;
- Odvođenje toplote u okolinu (preko strugotine i SHP-sredstva) i
- Veličine površina preko kojih se prenosi toplota.

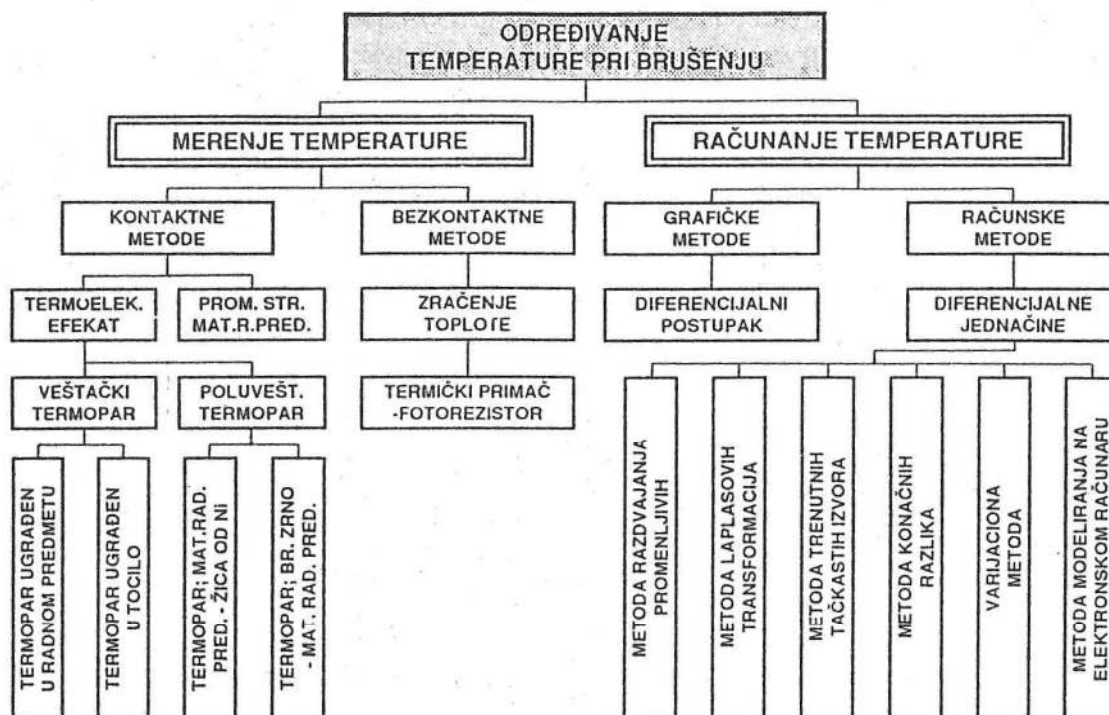
Počeci istraživanja procesa brušenja i određivanja temperatura pri brušenju pripadaju uglavnom teorijskim istraživanjima, što je i razumljivo zbog veoma niskog stupnja merne tehnike. Kasnijim razvojem ove tehnike razvijene su i brojne metode za eksperimentalno merenje temperatura pri brušenju koje se i danas unapređuju i dalje usavršavaju. Na slici 3. dat je šematski pregled metoda, kako teorijskih tako i eksperimentalnih, za određivanje temperatura pri brušenju.

Teorijska istraživanja imaju za cilj određivanje opštih zakonitosti nastanka i distribucije toplotne energije u procesu brušenja, kao i proračun temperaturskog polja koje nastaje u zoni brušenja. Proračun temperaturskog polja zone brušenja u osnovi se svodi na rešavanje parcijalne diferencijalne jednačine provođenja toplote, čiji opšti oblik glasi:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{c\rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \right\} + v_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (5.0.1)$$

- gde je: θ - temperatura koja odgovara koord. x, y, z vezanih sa izvorom toplote;
 τ - tekuće vreme;
 $\lambda(\theta)$ - koef. provođenja toplote, zavisano od temperature;
 $c\rho$ - toplotni kapacitet tela (c-specifična toplota, ρ -gustina);
 $v_x; v_y; v_z$ - projekcije vektora brzine toplotnog izvora na ose koordinatnog sistema.

Jednačina (5.0.1.), napisana za obradak i točilo, a uz određene početne i krajnje uslove, omogućuje određivanje temperaturskog polja koje nastaje u zoni brušenja.

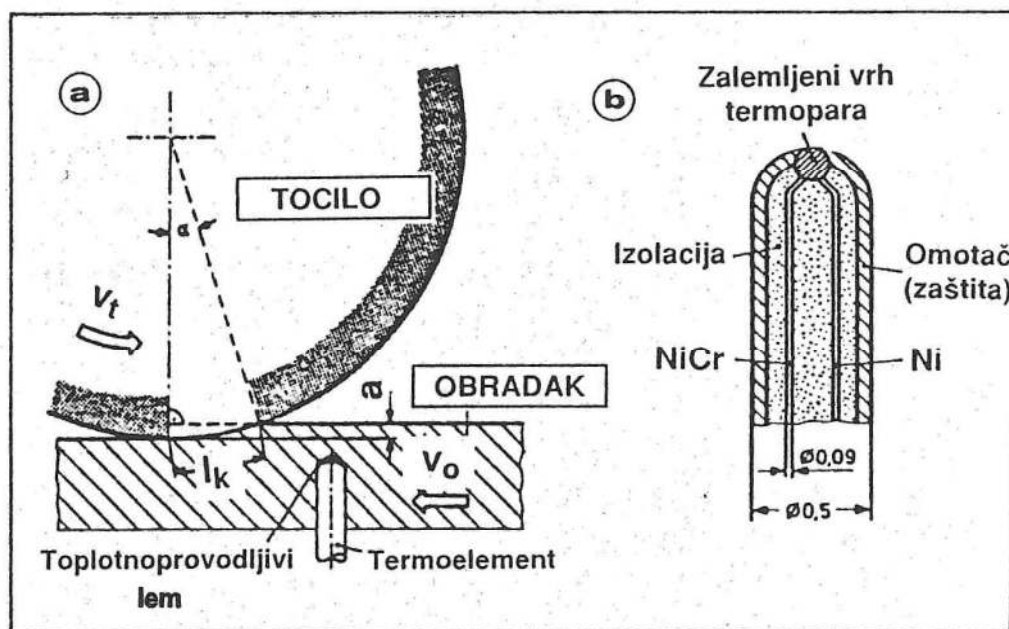


Slika 3. Pregled metoda za određivanje temperatura pri obradi brušenjem
Bild 3. Eine Übersicht der Methoden zur Temperaturbestimmung beim Schleifen

Problem, međutim, nije tako jednostavan i pri ovakvom njegovom rešavanju pojavljuje se niz poteškoća. One su pre svega rezultat složenosti procesa i odsustva tačnih informacija o mehanizmima rezanja kao i o toplotno-fizičkim svojstvima obradka i točila. Radi toga su neizbežna mnoga uprošćenja koja manje ili više utiču na dobijene rezultate. U suštini, problem se svodi na postavljanje što adekvatnijeg modela tela (obradka i točila) i izvora toplote koji na njih deluju, vodeći pri tome računa o njihovim međusobnim vezama.

Merenje trenutne temperature Θ_{\max} je veoma teško izvodljivo, kako zbog malog prostora na kome ona nastaje tako i zbog kratkoće njenog delovanja. Kontaktna Θ_k i temperatura obradka Θ_o , određuju se relativno lakše i za to je danas razvijen veliki broj mernih metoda. Zajedničko za sve te metode je težnja da se prodre u zonu brušenja, a da se pri tome što manje poremeti prvobitna kompaktnost uzorka, odnosno da se što manje poremete uslovi provođenja toplote, kako bi se dobili što realniji rezultati. Današnjim stanjem merne tehnike ovaj problem se dosta efikasno rešava.

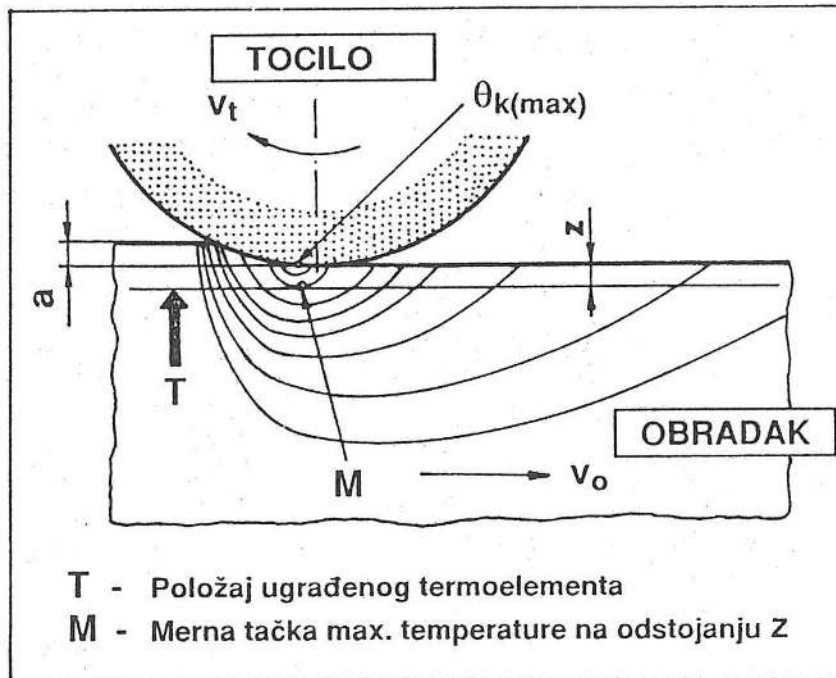
Od svih mernih metoda koje su se do sada koristile za određivanje temperatura pri brušenju, najbolji rezultati postignuti su merenjem temperatura pomoću ugrađenih minijaturnih termoelementa u obradak (slika 4-a.) koje bazira na termoelektričnom efektu.



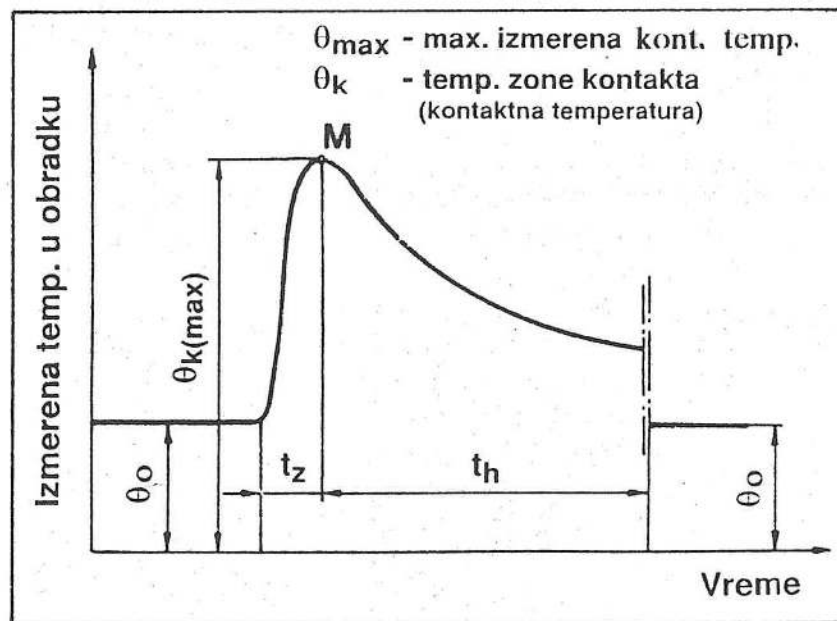
Slika 4. Merenje temperatura u obradku pomoću ugrađenih termoelemenata
 Bild 4. Messung der Werkstücktemperaturen mit eingebauten Thermoelement

Važan problem koji se javlja kod određivanja temperatura brušenja pomoću termoelektričnog efekta je u tome kako obezbediti da inertnost (vreme odziva) termoelementa bude što je moguće manja. I ako su autori ovog članka lično napravili veliki broj termoelemenata i sa njima dobili vrlo dobre rezultate, ipak su za ovo najpogodniji minijaturni obloženi termoelementi koje industrijski proizvodi firma Philips [2], ali i neke druge firme. Ovi termoelementi imaju spoljašni prečnik obloge 0,5 mm pa i manje, a sastoje se od žica Chromel/Alumel (NiCr/Ni). Da bi se smanjilo vreme odziva, kod ovog termoelementa su žice termopara zalemljene na vrhu zajedno sa oblogom, slika 4-b. Kombinacija Chromel/Alumel ima prednost nad ostalim standardnim kombinacijama zbog svoje praktično linearne zavisnosti temperatura i termonapona. Njegov merni opseg temperatura je od -20 do +1250 °C, a vreme odziva 14 ms [3], što takođe potpuno zadovoljava.

Za identifikaciju temperatura izmerenih pomoću termoelementa ugrađenog u obradak poslužiće slika 5. [4,5]. Obradak se pokreće brzinom pomoćnog kretanja v_o u odnosu na tociolo, tako da merni vrh termopara "seče" izoterme temperaturskog polja, odnosno registruju se temperature u obradku na odstojanju z od brušene površine. Obzirom da su izoterme ispred zone brušenja zgusnute, to se odražava na nagli skok registrovanih temperatura (vreme zagrevanja t_z je vrlo kratko - iznosi od 0,01 do 0,04 s (slika 6)). Nakon dostizanja maksimalne temperature, što odgovara tački M na slici 5., počinje opadanje registrovanih temperatura (vreme hlađenja t_h je dugo).



Slika 5. Identifikacija izmerenih temperatura u zoni brušenja
Bild 5. Identifizierung der gemessenen Temperaturen in der Schleifzone



Slika 6. Tok izmerenih temperatura u obradku
Bild 6. Verlauf der gemessenen Werkstücktemperaturen

Smanjivanjem odstojanja z povećavaju se maksimalne vrednosti izmerenih temperatura, odnosno dobijaju se temperature koje su bliske kontaktnoj temperaturi θ_k . Minimalno odstojanje z koje se može praktično postići, bez opasnosti da se termoelement ošteti, iznosi cca 0,05 mm. Maksimalna temperatura brušenja izmerena na ovom odstojanju može se bez daljeg uzeti kao veoma bliska kontaktnoj temperaturi.

Prethodno opisanim postupkom mogu se meriti dve karakteristične temperature zone brušenja: kontaktna temperatura Θ_k i temperatura obradka Θ_o . Osim ove dve temperature, sa ugrađenim termoelementom u obradak može se takođe određivati i kompletno temperatursko polje u obradku [6].

6.0. UTICAJ ELEMENATA REŽIMA BRUŠENJA NA VISINU TEMPERATURA REZANJA

Visina temperatura pri obradi brušenjem definiše se u načelu sa dva bitna parametra: jačinom toplotnog izvora i vremenom njegovog delovanja. Upravo radi toga se, pri analizi uticaja elemenata režima brušenja na visinu temperatura rezanja, posmatra njihov uticaj na promenu ta dva parametra toplotnog izvora.

Kao što će pokazati dalja analiza, pojedini elementi režima pri brušenju imaju suprotan uticaj na promenu parametara toplotnog izvora, odnosno sa povećanjem jačine toplotnog izvora smanjuje se vreme njegovog delovanja ili obrnuto. Ova konstatacija čini analizu uticaja elemenata režima brušenja na visinu temperatura rezanja veoma kompleksnim. Najčešći uzrok različitih zaključaka pojedinih autora o istom pitanju leži upravo u tome da jedan autor kao osnovu svoje analize uzima samo jačinu toplotnog izvora, a drugi samo vreme njegovog delovanja, isključujući tako njihovo zajedničko delovanje.

Uticaj elemenata režima brušenja na promenu pomenuta dva parametra toplotnog izvora, odnosno na visinu temperatura rezanja, može se najbolje analizirati preko određenih veličina koje se ostvaruju u zoni kontakta obradak-tocilo, a to su pre svega sledeće veličine:

- Debljina strugotine koja utiče na količinu energije potrebne za deformisanje strugotine, tako što veća debljina strugotine prirodno zahteva veću energiju deformisanja i obrnuto. Pošto se radi o promenljivoj veličini, pri brušenju se ona najčešće izražava preko srednje debljine strugotine h_m u obliku sledećih jednakosti:

$$h_m = \frac{Q'}{1000 \cdot v_t} = \frac{a \cdot v_o}{60 \cdot v_t} = \frac{a}{q} \quad (\text{mm}) \quad (6.0.1.)$$

gde je: $Q' = \frac{1000 \cdot a \cdot v_o}{60}$ ($\text{mm}^3/\text{mm s}$) - specifična proizvodnost;

v_t (m/s) - obimna brzina tocila;

v_o (m/min) - brzina obradka;

a (mm) - dubina rezanja;

$$q = \frac{60 \cdot v_t}{v_o} \quad (-) \quad \text{- odnos brzina.}$$

Osim na jačinu toplotnog izvora, debljina strugotine presudno utiče i na opterećenje brusnih zrna. Zbog toga se izborom brzine tocila i brzine obradka, odnosno njihovog odnosa, mora obezbediti takva debljina strugotine koja neće izazivati naprezanje brusnih zrna koje bi dovelo do njegovog lomljenja ili prevremenog ispadanja.

- **Vreme zahvata zrna sa obradkom.** Utiče na količinu toplote koja se odvodi u obradak, tako što duže delovanje elementarnog toplotnog izvora brusnog zrna povećava količinu toplote koja odlazi u površinski sloj obradka i obrnuto. Ovo vreme zavisi od dužine kontakta obradak-tocilo i brzine tocila, odnosno:

$$t_z = \frac{I_k}{1000 \cdot v_t} \quad (\text{s}) \quad (6.0.2.)$$

gde je: $I_k = \sqrt{a \cdot D_{te}}$ (mm) - kinematska dužina kontakta obradak-tocilo;

$$D_{te} = \frac{D_o \cdot D_t}{D_o \pm D_t} \quad - \text{ekvival. preč. tocila; (+) spoljašnje, (-) unutrašnje brušenje ;}$$

$$D_{te} = D_t \quad - \text{za ravno brušenje ; } D_t - \text{prečnik tocila.}$$

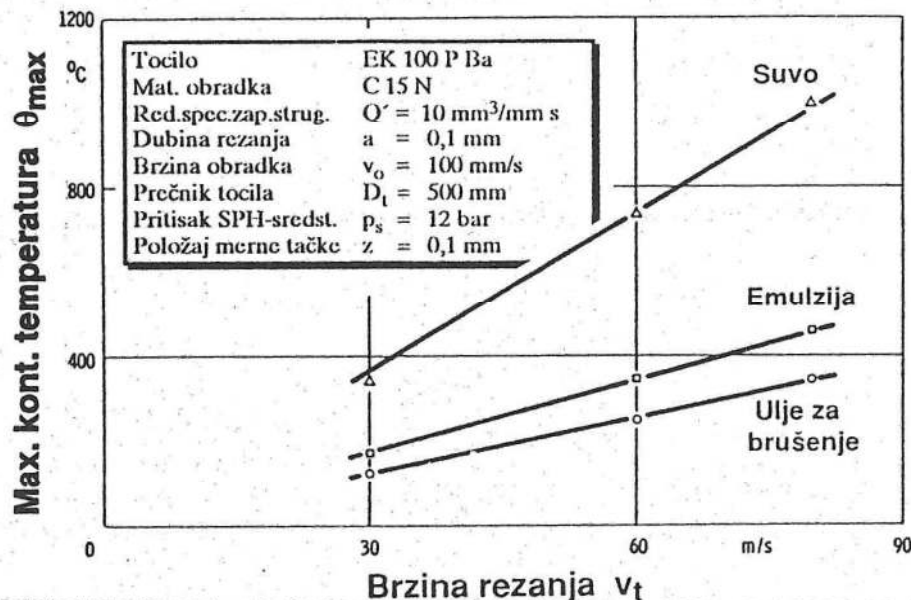
- **Broj elementarnih toplotnih izvora.** Svako brusno zrno pri rezanju predstavlja elementarni toplotni izvor u zoni rezanja. Zbrajanjem jačine elementarnih toplotnih izvora dobija se *ukupna jačina toplotnog izvora* koji nastaje u zoni brušenja. Broj elementarnih toplotnih izvora se povećava sa povećanjem površine kontakta obradak-tocilo, kao i broja aktivnih brusnih zrna na jedinici površine tocila.
- **Relativna brzina brusnih zrna u odnosu na obradak** utiče na trenje između brusnih zrna i obradka i to tako što se sa povećanjem ove brzine povećava i trenje na kontaktnoj površini i obrnuto. Veće trenje znači i više energije potrebne da se ono savlada, odnosno više proizvedene toplotne energije.

U nastavku se iznosi kratka analiza uticaja svakog parametara brušenja ponaosob na visinu kontaktne temperature potkrepljena eksperimentalnim rezultatima.

6.1. Uticaj brzine rezanja

Povećanje brzine rezanja (obimne brzine tocila) dovodi do smanjenja debljine strugotine i vremena zahvata brusnog zrna sa materijalom obradka, što ima za posledicu smanjenje jačine elementarnih toplotnih izvora i vremena njegovog delovanja. Istovremeno dolazi do povećanja trenja po leđnoj površini zrna, zbog povećanja relativne brzine između obradka i brusnog zrna, što utiče na povećanje jačine toplotnog izvora. Krajnji rezultat ovih međusobno suprotstavljenih uticaja u

najvećoj meri zavisi od fizičko-hemijskih svojstava sparenih materijala obradka i rezanja dolazi do porasta kontaktnih temperatura (slika 7.), ali su mogući i obrnuti slučajevi.



Slika 7. Uticaj brzine rezanja (v_t) na promenu kontaktne temperature (θ_k) za različite načine hlađenja i podmazivanja [7]
 Bild 7. Werkstücktemperatur in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit [7]

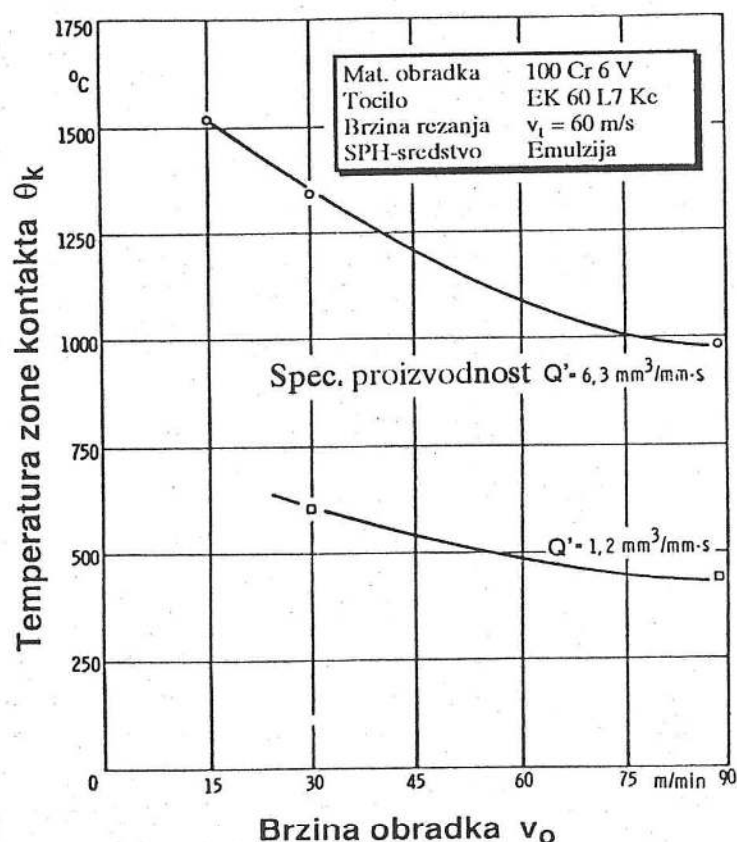
6.2. Uticaj brzine pomoćnog kretanja

Povećanje brzine pomoćnog kretanja (brzine obradka) dovodi do povećanja debljine strugotine koju skida jedno brusno zrno i vremena zahvata zrna sa obradkom, što izaziva povećanje jačine elementarnog toplotnog izvora i vremena njegovog delovanja, a što sve zajedno utiče na povećanje kontaktne temperature.

Istovremeno se smanjuje vreme delovanja ukupnog toplotnog izvora zbog veće brzine njegovog pomeranja preko površine obradka. Osim toga SHP-sredstvo brže dopire na upravo obrušenu površinu i intenzivno je hladi. Ova dva efekta dovode do smanjenja kontaktne temperature.

Delovanje ova dva, međusobno suprotstavljena uticaja, u svom krajnjem ishodu dovodi do smanjenja kontaktne temperature sa povećanjem brzine pomoćnog kretanja (sl. 8).

Promena brzine pomoćnog kretanja mora se izvoditi saglasno sa veličinom brzine rezanja, tako da ranije pomenuti odnos q bude takav da sa sigurnošću obezbedi nastajanje strugotine sa najpovoljnijom debljinom. Preporučene vrednosti tih odnosa mogu se pronaći u odgovarajućoj literaturi.



Slika 8. Uticaj brzine pomoćnog kretanja - brzine obradka (v_0) na promenu kontaktne temperature (θ_k) za različite vrednosti specifične proizvodnosti (Q') [7]

Bild 8. Oberflächentemperatur in Abhängigkeit von der Werkstückgeschwindigkeit [7]

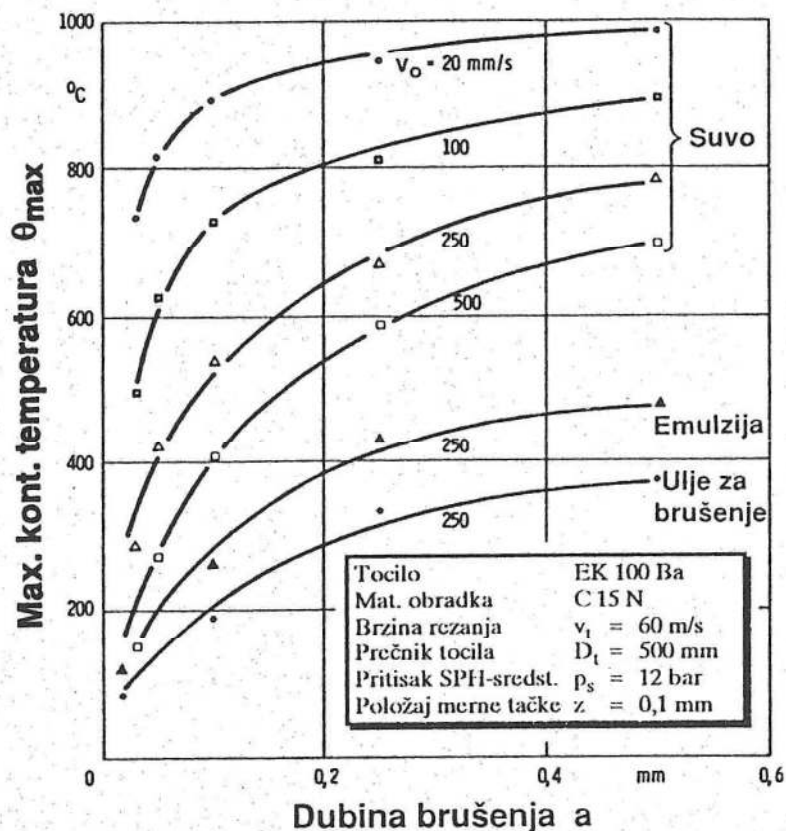
6.3. Uticaj dubine rezanja

Porast dubine rezanja dovodi do povećanja elastičnih i plastičnih deformacija, zbog veće debljine strugotine, trenja između brusnih zrna i materijala obradka i vremena zahvata brusnih zrna. Sve ove promene dovode istovremeno do povećanja jačine toplotnog izvora i vremena njegovog delovanja, odnosno dolazi do povećanja kontaktne temperature, slika 9. Na ovom dijagramu vidi se i uticaj SHP-sredstva, a potvrđuje se i prethodno dati zaključak o uticaju brzine pomoćnog kretanja na visinu temperatura u zoni kontakta obradak-tocilo.

6.4. Uticaj pomaka

Povećanje bočnog pomaka kod ravnog brušenja, odnosno aksijalnog pomaka kod okruglog brušenja, dovodi do povećanja ukupne jačine toplotnog izvora, zbog povećanja kontaktne površine između obradka i tocila na kojoj istovremeno deluje

veći broj elementarnih toplotnih izvora. Međutim, veća kontaktna površina omogućuje znatno bolje odvođenje razvijene topline iz zone rezanja, pa se povećanje pomaka, zavisno od uslova pri obradi, različito odražava na promenu temperatura u zoni kontakta. Za uobičajene uslove pri obradi, kontaktne temperature ostaju približno konstantne, pa se može reći da pomak pri brušenju ostvaruje vrlo mali uticaj na promenu temperatura pri brušenju.



Slika 9. Uticaj dubine brušenja (a) na promenu kontaktne temperature (θ_k) za različite načine hlađenja i podmazivanja [7]

Bilid 9. Temperaturen in der Werkstückrandzone in Abhängigkeit von der Zustellung, der Kühlschmierstoff und Werkstückgeschwindigkeit [7]

6.5. Određivanje temperaturskih funkcija

Kao što je ranije istaknuto, proces brušenja se zbog svoje prirode najbolje može opisati pomoću statističkih metoda. Primenom tih metoda može se odrediti zbirni uticaj osnovnih parametara pri obradi brušenjem na visinu temperatura brušenja.

Ovde se toplotno opterećenje zone brušenja posmatra preko visine kontaktne temperature θ_k , obzirom da ona najbolje izražava mogućnosti za nastanak termičkih defekata u površinskom sloju obradka. Osim toga ona se može i najtačnije izmeriti pomoću minijaturnih termoelemenata ugrađenih u obradak na način kako je to opisano u tački 5.0. ovog rada.

Zavisnost kontaktne temperature Θ_k od elemenata režima brušenja može se najbolje predstaviti eksponencijalnom funkcijom oblika:

$$\Theta_k = C_\theta \cdot v_t^{x_\theta} \cdot v_o^{y_\theta} \cdot a^{z_\theta} \cdot s^{u_\theta} \quad (6.5.1.)$$

gde je: v_t (m/s) - brzina rezanja (brzina tocila);
 v_o (m/min) - brzina pomoćnog kretanja (brzina obradka);
 a (mm) - dubina rezanja;
 s (mm/hod) - bočni pomak.

$C_\theta; x_\theta; y_\theta; z_\theta; u_\theta$ - konstante koje zavise od materijala obradka, vrste i karakteristika tocila, vrste i količine SHP-sredstva, vrste brušenja, vrste brusilice i drugih uslova pri obradi.

Određivanje konstanti u jednačini (6.5.1.) vrši se primenom statističkih metoda višefaktornog plana eksperimenta koji omogućuje da se relativno brzo i sa malim brojem opita dođe do traženih temperaturskih funkcija. Dalja prednost statističkih metoda je u tome što omogućuju provere adekvatnosti usvojenog matematičkog modela i signifikantnosti (značajnosti) nezavisno promenljivih veličina. Ako ove provere zadovolje, onda se eksperiment završava u prvom krugu, a ako ne, onda se menja matematički model, izbacuju nesignifikantni parametri i sve tako dok se ne dobiju zadovoljavajuća rešenja.

Ceo postupak određivanja temperaturskih funkcija primenom višefaktornog plana eksperimenta može se potpuno automatizovati primenom računara sistema i odgovarajućeg softvera, na čemu su autori ovog rada ostvarili zapažene rezultate.

Jedna takva temperaturska funkcija za ravno brušenje koturastim tocilima čelika za cementaciju Č 1220, bez primene SHP-sredstva, dobijena je u sledećem obliku [5]:

$$\Theta_k = 100,51 \cdot v_t^{0,460} \cdot v_o^{-0,327} \cdot a^{0,145} \quad (6.5.2.)$$

Ovakve temperaturske funkcije imaju veliki značaj između ostalog i za stvaranje tehnoloških banaka podataka o obradljivosti, a mogu se koristiti i u razvoju sistema za adaptivno upravljanje brusilicama.

6.6. Smernice za izbor elemenata režima pri obradi brušenjem

Pri izboru elemenata režima pri brušenju mora se pre svega voditi računa o visini temperatura u površinskom sloju obradka, odnosno o štetnom uticaju toplotne energije na obradak. U tom smislu mogu se koristiti prethodno iznete analize i zaključci ili jednačine kao što je 6.5.2. u koje je sve to i praktično pretočeno. Međutim,

praktičnom radu se pri izboru elemenata režima brušenja koriste drugačije smernice. Naime, pri brušenju se mora voditi računa da brusna zrna u zahvatu mogu skidati samo onoliko materijala obradka koliko se može smestiti u prostore između brusnih zrna, uključujući i pore u vezivnom sredstvu koje se tu nalaze. To svojstvo tocila odražava merilo njegove produktivnosti i definiše se kao kapacitet tocila koji je po vrednosti isti kao ranije data specifična proizvodnost brušenja Q' (mm³/mm·s).

Kapacitet tocila se mora brižljivo održavati na taj način što se prostor za smeštaj strugotine ispira SPH-sredstvom posle svakog izlaska tocila iz zahvata. U protivnom strugotina se u taj prostor sabija do te mere da više ne postoji mogućnost da se centrifugalnom silom ili drugim načinom čišćenja izbaciti iz tog prostora. Na ovaj način, kao i normalnim trošenjem brusnih zrna, smanjuje se prostor za smeštaj novonastale strugotine, pa tako brusna zrna više ne mogu normalno da režu već nastaje samo trenje između obradka i tocila koje neminovno dovodi do razvoja povećane toplote i visokih temperatura, što za posledicu ima "paljenja" brušene površine.

Kapacitet tocila se može izraziti preko srednje debljine strugotine i brzine tocila, odnosno iz jednačine 6.0.1. sledi da je:

$$Q' = 1000 \cdot v_t \cdot h_m \quad (6.6.1.)$$

Srednja debljina strugotine h_m koju tocilo može da prihvati bez štetnih posledica na brušenu površinu zavisi od karakteristika tocila i načina obrade njegove rezne površine. Uobičajene su sledeće vrednosti srednje debljine strugotine koje se primenjuju u praksi [15]:

- pri finom i završnom brušenju $(30 \div 70) \cdot 10^{-6}$ mm
- pri grubom i predzavršnom brušenju $(50 \div 180) \cdot 10^{-6}$ mm
- pri visokoučinskom brušenju $(200 \div 400) \cdot 10^{-6}$ mm

Polazeći od gore navedenih vrednosti srednje debljine strugotine i uzimajući da je najpovoljniji odnos brzina za klasično brušenje $q=60$, mogu se saglasno jednačini 6.0.1. izabrati i uskladiti elementi režima brušenja, odnosno: brzina tocila v_t , brzina obradka v_o i dubina brušenja a .

Ovako izabran režim brušenja, uz primenu odgovarajuće vrste i količine SPH-sredstva i tocila sa najpovoljnijim karakteristikama za dati slučaj obrade, mogu da obezbede produktivnu i kvalitetnu obradu brušenjem bez defekata izazvanih pregrevanjem površinskog sloja materijala obradka.

7.0. KORIŠĆENJE TEMPERATURA REZANJA ZA KONTROLU I OPTIMIZACIJU PROCESA OBRADJE BRUŠENJEM

Temperature rezanja pri brušenju su vrlo značajne za odvijanje procesa i mogle bi se kao takve vrlo dobro koristiti za kontrolu, odnosno upravljanje procesom obrade. Praćenje temperatura rezanja u toku procesa brušenja je praktično vrlo teško izvodljivo na današnjem stepenu razvoja merne tehnike i to je glavni problem praktičnog korišćenja temperatura rezanja za upravljanje procesom obrade brušenjem. Do sada razvijene merne metode zahtevaju velike troškove za njihovu primenu i zbog toga se koriste prvenstveno za laboratorijska istraživanja procesa obrade brušenjem radi dobijanja potrebnih zavisnosti, npr. **temperaturskih funkcija**. Ove funkcije, a i druge zavisnosti, do kojih se dolazi u laboratorijskim uslovima, koriste se u postupcima optimizacije parametara rezanja kao funkcije stanja procesa.

Kako su pokazala dosadašnja istraživanja, izučavanje složenih nestacionarnih i nelinearnih procesa prenosa toplote, kakav je i proces brušenja, uspešno se ostvaruje naučnim pristupom koji bazira na metodi postavke i rešavanja **obrnutog zadatka prenosa toplote**. Ova metoda omogućuje eksperimentalno-modelsko određivanje toplotnih režima procesa brušenja uz maksimalno približavanje stvarnom stanju. Pri tome se rešavanje obrnutog zadatka prenosa toplote, za slučaj optimalnog upravljanja toplotnim opterećenjem obradka, sprovodi u ekstremnoj postavci korišćenjem numeričkih metoda teorije optimizacije. Na razradi i praktičnoj primeni ove metode optimizacije procesa brušenja trenutno rade autori ovog rada, a prvi rezultati se mogu uskoro očekivati.

8.0. UMEMO ZAKLJUČKA

Na osnovu prethodno iznetih analiza i zaključaka može se uočiti da su najvažniji problemi pri obradi brušenjem prvenstveno termičke prirode i da ako se o tome ne vodi računa može u površinskom sloju obradka da nastupi veliki broj veoma štetnih efekata koji umanjuju eksploataciona svojstva i vek trajanja brušenih delova.

Ispitivanja sprovedena od strane većeg broja autora [9] na ležajevima i drugim vitalnim delovima avionske i automobilske industrije, kao i drugih grana industrije, pokazala su da defekti u površinskom sloju koji nastaju pri obradi brušenjem, smanjuju kontaktnu i cikličnu otpornost dela čak za deset puta. Zbog toga je izuzetno važno dobijanje brušenih površina bez termičkih defekata, koje sa drugim pokazateljima fizičkih svojstava radnih površina mogu da obezbede dobra eksploataciona svojstva i dug radni vek mašinskih delova.

Ovaj rad sačinjen je na osnovu dugogodišnjih sopstvenih istraživanja i praktičnih iskustava autora na ovom području i uz korišćenje navedene literature. Kao što je već rečeno autori trenutno rade na razradi metode rešavanja "obrnutog zadatka prenosa toplote" koja treba da omogući optimalno upravljanje toplotnim opterećenjem površinskog sloja obradka.

LITERATURA

- [1] Bogner N., Helletsberger H., Kriegshaber Ch., Nolchl H.: Schleifen mit kubischen Bornitrid und konventionellen Schleifmitteln. Intergrind '88 Conference, Budapest, 15-17. November 1988.
- [2] N.N.: Temperaturmessungen mit Philips Miniatur-Mantel-Thermoelementen, Thermo-coax. Druckschriften der Firma Philips Industrie Elektronik GmbH, Hamburg, 1979.
- [3] Özhen F.: Zerspantemperaturen beim Schleifen von weichmagnetischen Werkstoffen. Industrie-Anzeiger 108(1986) Nr. 5.
- [4] Milikić D.: Analiza temperatura u temperaturskom polju i njihov uticaj na svojstvo površinskog sloja radnog predmeta pri obradi brušenjem. Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 1976.
- [5] Milikić D. Prilog analizi temperatura u temperaturskom polju pri obradi brušenjem. Naučno-stručni skup MMA '76., Novi Sad 14-17. oktobar 1976.
- [6] König W., Dederichs M.: Temperaturmessungen und arbeitsergebnisse beim Flachsleifen. Industrie-Anzeiger 96(1974) Nr. 38.
- [7] König W.: Fertigungsverfahren, Band 2 - Schleifen, Honen, Läppen. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1980.
- [8] Milikić D., Drobnjak V., Kovač P., Gostimirović M.: Heat Aspekts of Twist Drills Produktion by High Efficiency Grinding Process. XIth International Conference on Production Research (ICPR), August 18-23, 1991, Hefei, China.
- [9] Jaščerici P.I. i dr.: Toplovlje javljenija pri šlifovanii i svoistva obrabotanih poverhno- stei. Nauka i tehnika, Minsk, 1973.
- [10] Milikić D., Kovač P., Rvović M.: Prilog određivanju kontaktnih temperatura pri ravnom brušenju. XIX Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kragujevac, 1985.
- [12] Milikić D.: Temperaturen beim Schleifen - Entwicklung, Messung und Einfluss auf Schleifergebnisse. 3 Schleiftechnische Fachtagung, Magdeburg 14-15 Dez. 1989.
- [13] Werner G., Dederichs M.: Spanbildungsprozess und Temperaturbeeinflussung des Werkstücks beim Schleifen, Industrie-Anzeiger 94(1972), Nr. 98.
- [14] Vukelja D.: Termodinamika rezanja. Monografija IAMA, 2(1970), Beograd, 1970.
- [15] Cebalo R.: Duboko brušenje. Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [16] Opitz H.: Moderne Produktionstechnik - Stand und Tendenzen. Werlag W. Girardet, Essen, 1971.
- [17] Jovičić M. i dr.: Obrada brušenjem - Identifikacija karakteristika stanja i optimizacija procesa. Mašinski fakultet i Jupiter Zajednica, Beograd, 1986.
- [18] Spur G., Stöferle T.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 3/2 - Spanen, Carl Hanser Verlag, München - Wien, 1980.
- [19] Reznikov A. N.: Teplofizika rezanija. Mašinstroenie, Moskva, 1969.
- [20] N.N.: Leitfaden der Schleiftechik, Druckschrift der Firma Schaudt Maschinenbau GmbH, Stuttgart, 1988.