

IZRAČUN KONTAKTNIH TEMPERATUR Z VEČ RAZLIČNIMI MODELI

CONTACT TEMPERATURE CALCULATION USING SEVERAL THEORETICAL MODELS

Mitjan Kalin, Jože Vižintin

Center za tribologijo in tehnično diagnostiko, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Bogiščeva 8, 1000 Ljubljana, Slovenija
mitjan.kalin@ctd.uni-lj.si

Prejem rokopisa - received: 2001-12-05; sprejem za objavo - accepted for publication: 2002-02-04

Obrabne in torne lastnosti površin v kontaktu so znatno odvisne od kontaktnih temperatur, zato je njihova določitev velikega pomena v vsaki tribološki aplikaciji. Številni modeli za izračun kontaktnih temperatur, ki so na voljo v literaturi, uporabljajo precej različne fizikalne, dinamične in geometrijske predpostavke. Posledica tega so velika razhajanja rezultatov za isti računski primer. Še več, med neobhodnimi predpostavkami so tudi številne lastnosti kontaktnih površin, ki pa so navadno neznane zaradi težav pri njihovi natančni določitvi. Zaradi tribološkega delovanja površine spreminjajo mehanske, termične in kemijske lastnosti, prihaja do faznih transformacij, porušitev mejnih mazalnih plasti itd. Čeprav so ta dejstva splošno znana, velikokrat pri izračunih niso upoštevana. V predstavljenem delu smo analizirali vpliv lastnosti kontaktnih površin med jeklom in silicijevim nitridom pri suhem in mejnem mazanju. Predstavljeni so vplivi spremembe termičnih lastnosti, koeficienta trenja in realne kontaktne površine na izračun kontaktnih temperatur. Za analizo smo uporabili deset različnih teoretičnih modelov. Rezultati razkrivajo velike razlike med posameznimi modeli in še posebej izjemen vpliv lastnosti kontaktnih površin na izračunane temperature.

Ključne besede: jeklo, keramika, temperatura, modeli, izračuni

Wear and friction properties of tribological interfaces depend significantly on the contact temperature and its determination is therefore of great interest for each tribological application. Several different temperature calculation methods available in literature use quite different physical, dynamic and geometric assumptions. As a consequence, a large discrepancy in the results is obtained for the same contact situation. Furthermore, among the necessary assumptions for the temperature calculation are also various interface properties, which are usually unknown in details due to many difficulties in their exact determination, since, due to tribological actions interfaces are subjected to a change of mechanical, thermal and chemical properties, phase transformations, degradation of thin film in a boundary lubrication, etc. Although these are very well known facts, they are sometimes overlooked. In the present work effects of tribological interface between silicon nitride and steel under dry and boundary lubricated fretting conditions were studied. Effects of the change of its thermal properties, as well as a coefficient of a friction and real contact area on the calculated flash temperature are presented. Ten different ready-to-use theoretical models were selected for the purposes of this investigation. Results show significant difference between the various models and especially, the critical importance of the tribological interface properties on the calculated temperatures.

Key words: steel, ceramics, temperature, models, calculation

1 UVOD

Zaradi pretvorbe dela trenja v toploto se pri drsenju na kontaktnih površinah teles temperatura poveča, še posebej na realni površini, tj. na kontaktnih vršiček-vršiček. Dvig temperature na kontaktnih vršičkih je lahko tudi za red velikosti večji od drugih delov navidezne nominalne kontaktne površine, a so taki pojavi zaradi majhne površine kratkotrajni ¹. Te temperature pa lahko odločilno vplivajo na obrabne in torne lastnosti tribološkega sistema zaradi sprememb mehanskih, kemijskih in termičnih lastnosti površin.

Za inženirsko prakso je bistvena pomena čim enostavnejša računsko metoda, zato so bili razviti številni uporabniško orientirani modeli za izračun kontaktnih temperatur. Vendar pa večina teh modelov uporablja precej različne fizikalne, geometrijske in dinamične predpostavke pri izbranem sistemu. Poleg tega pa tudi številne površinske lastnosti, ki so v splošnem neznane, bistveno vplivajo na generirano toploto v tribološkem kontaktu. Na primer, mehanske in

termične lastnosti materialov se v kontaktnih neprestano spreminjajo, še posebej, če pride do tribokemijsko povzročenih faznih transformacij. To nadalje vpliva na porazdelitev torne toplote zaradi različnih lastnosti osnovnega materiala in površine. Številne težave se pojavljajo pri izračunu velikosti in oblike realne kontaktne površine ter geometrijskih in termičnih lastnosti obrabnih ali drugih delcev v kontaktu. Spremembe koeficienta trenja, ki neposredno vplivajo na izračun temperatur, ter porazdelitev koeficienta trenja na kontaktni površini sta tudi izjemno pomembna dejavnika pri končnem rezultatu. Vse te neznanke vplivajo na temperaturo in nasprotno, poleg tega pa tudi ena na drugo v številnih povratnih zankah.

Posledica tega je, da lahko pride do znatnih razlik pri rezultatih za isti kontaktni problem. V nekaterih preglednih literaturnih virih ²⁻⁵ je že bilo ugotovljeno, da so izračuni kontaktnih temperatur zaradi torne toplote precej pomanjkljivi in značilno nedodelani, saj se kontaktne razmere spreminjajo s časom in položajem v kontaktu. Čeprav so te ugotovitve znane in sprejeta

dejstva, so velikokrat pri obravnavi in komentarju rezultatov spregledana.

Uporabniško orientirani modeli so zelo koristno orodje in omogočajo vsaj približno oceno kontaktnih temperatur. Ko pa te modele uporabljamo za ugotavljanje kontaktnih razmer in različnih pojavov, npr. faznih transformacij, se je treba zavedati številnih omejitev in jih upoštevati pri interpretaciji rezultatov. Naši rezultati, predstavljeni v tem prispevku in drugje⁶⁻¹¹, ki se ujemajo tudi z rezultati veliko bolj natančnih modelov¹² ter bolj kompleksnih interdisciplinarnih študij,¹³ kažejo, da so temperature, dobljene z uporabniško orientiranimi modeli navadno prenizke ter da lahko kontakti na vršičkih, najverjetneje zaradi slabo definiranih razmer na kontaktnih vršiček-vršiček, dosegajo znatno višje temperature.

V predstavljenem delu smo analizirali vplive realne kontaktne površine, koeficienta trenja ter sprememb termičnih lastnosti površin pri kontaktu jekla in keramike iz silicijevega nitrida pri suhem in mejnem mazanju. Za primerjavo smo uporabili deset različnih teoretičnih modelov. Rezultati kažejo pomembne razlike med posameznimi modeli ter še posebej velik vpliv lastnosti kontaktnih površin na izračunane temperature.

2 MODELI IN PARAMETRI

Modeli, ki smo jih izbrali za izračun dviga kontaktnih temperatur zaradi generacije torne toplote, so: Archardov model povprečne trenutne temperature z upoštevanjem deformacijskega merila in brez njega¹⁴, Archardov model največje trenutne temperature¹³, Holmov model povprečne in največje trenutne temperature⁵, Tian-Kennedy-jev model povprečne in največje trenutne temperature¹⁵, Greenwood-Greiner-jev model povprečne trenutne temperature¹⁶ in Ashby-Abulawi-Kong-ov model masne in trenutne temperature¹⁷. Večina podatkov v tem prispevku je predstavljena kot srednja vrednost izbranih modelov.

Vsi parametri, ki smo jih dobili na osnovi fretinških obrabnih preskusov^{6,10} in smo jih lahko uporabili pri izračunih, so predstavljeni v **preglednici 1**. Nekatere od teh vrednosti so prednastavljene na samem preizkuševališču, nekatere pa so eksperimentalno določene. Ker nas je zanimal predvsem največji možni dvig temperature, smo v izračunih uporabili podatke, izmerjene v trenutku največje vrednosti koeficienta trenja v danih razmerah. Navidezno, nominalno kontaktno površino smo določili tako, da smo preizkus v nekem trenutku zaustavili ter izmerili premer obrabne

Preglednica 1: Prednastavljeni in izmerjeni parametri iz fretinških obrabnih preizkusov

Table 1: Pre-set and/or measured parameters from fretting wear experiments

	Test condition					
	Preskusne razmere					
	D5	D25	D50	L5	L25	L50
Okolje Environment	Nemazano Unlubricated	Nemazano Unlubricated	Nemazano Unlubricated	Mazano Lubricated	Mazano Lubricated	Mazano Lubricated
Amplituda pomika Displacement amplitude (μm)	5	25	50	5	25	50
Frekvenca nihanja Frequency of oscillation (Hz)	210	210	210	210	210	210
Največja hitrost Maximum stroke velocity (m/s)	0,0067	0,0336	0,0672	0,0067	0,0336	0,0672
Normalna sila Normal force (N)	88	88	88	88	88	88
Koeficient trenja Coefficient of friction	0,68	1,18	1,2	0,58	0,85	0,7
Polmer nominalne kontaktne površine Radius of nominal contact area (mm)	0,175	0,375	0,475	0,140	0,225	0,165

Preglednica 2: Podatki o materialih, uporabljenih v izračunih

Table 2: Material data used for calculations

	Gostota Density (kg/m^3)	Specifična toplota Specific heat (J/kgK)	Termična difuzivnost Thermal diffusivity (m^2/s) ($\times 10^{-5}$)	Trdota Hardness (HV)	Modul elastičnosti Young modulus (N/mm^2) ($\times 10^6$)
Si_3N_4	3200	710	1,350	1700	3,1
DIN 100Cr6	7865	460	1,665	850	2,1

kotanje. Vsak nov preizkus je bil izveden na novi in nepoškodovani kontaktni površini.

Nekatere od parametrov, potrebne za izračun temperatur, je zelo težko natančno določiti, tako da njihovih vrednosti ne moremo natančno poznati. Zaradi tega smo v izračunih uporabili splošnejši način, s tem da smo variirali koeficient trenja v okviru predpostavljenih možnih vrednosti ter termično prevodnost, ki se v območju med 20 °C in 800 °C tako pri silicijevem nitridu kot pri jeklu zmanjša približno za faktor 1,7. Lastnosti materialov, ki smo jih privzeli iz literaturnih virov^{6,10} in smo jih uporabili pri izračunu, pa so podane v **preglednici 2**.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Vpliv nominalne kontaktne površine in obrabne odpornosti

Večina triboloških preskusov se izvaja z uporabo kontaktne geometrije kroglice na ravni ploskvi. Zaradi nastajajoče obrabe se tako kot drugi parametri tudi nominalna kontaktna površina neprestano spreminja med preizkusom. Pri tem se pojavi vprašanje, katere okoliščine, še posebej pa katero nominalno kontaktno površino naj pri izračunu upoštevamo. Če vzamemo nominalno površino na osnovi geometrijskih podatkov teles, bo ta velikost veljala le kratek čas, dokler ne nastane obraba. Kasneje postanejo vrednosti popolnoma netočne. Drugi možni način pa je, da upoštevamo vrednosti nominalne kontaktne površine, koeficienta trenja, drsne hitrosti idr. v nekem točno določenem času, v katerem so bile te vrednosti izmerjene. Ta način je bil uporabljen v naših izračunih.

Slika 1 prikazuje povprečno vrednost trenutne temperature na področju celotne kontaktne površine z uporabo osmih modelov in upoštevanjem parametrov iz **preglednic 1 in 2**. To pomeni, da variiranje vplivnih parametrov ni bilo uporabljeno. Archardov model z uporabo deformacijskega merila¹⁴ ter Ashby-jev model trenutne temperature¹⁷ nista bila upoštevana v teh izračunih, ker uporabljata drugačno metodologijo za določitev kontaktne površine in tako v tem primeru nista primerljiva z drugimi modeli. Trenutne temperature v nemazanih razmerah (**slika 1a**) so bile med 13 °C in 66 °C pri najmanjši oz. največji amplitudi pomika. Vidi se, da temperature z večanjem amplitude naraščajo, kar nakazuje na vpliv povečanja hitrosti. Ker so izračunane temperature relativno nizke, tudi ni pomembnejše razlike med povprečno in največjo trenutno temperaturo.

Čeprav se pri nekaterih modelih zahteva nemazano drsenje, smo za primerjavo izračunali tudi temperature v mazanih fretinških preskusih (**slika 1b**). Poudariti je treba, da se naše razmere pri mazanju z "oljno kapljo pred preskusom" popolnoma razlikujejo od tistih s kontinuirano plastjo maziva, za katere veljajo omejitve v enačbah. Še več, jasno določena tribokemijska plast in drugi kontaktni parametri nakazujejo na kombinacijo

mejnega in mešanega mazanja s številnimi "suhimi" kontakti⁶. Torej, ne obstajajo razlogi, zaradi katerih bi utemeljeno razlikovali med nastalo tribokemijsko plastjo pri naših preskusih in katerokoli drugo tribokemijsko plastjo v nemazanih razmerah, saj v obeh primerih lastnosti novo nastale kontaktne površine niso znane in so drugačne od idealno predpostavljenih v modelu.

Ena izmed pomembnih ugotovitev na osnovi teh rezultatov pa je, da so trenutne temperature, izračunane za mazane razmere, višje kot pri nemazanih (**slika 1**), čeprav so koeficienti trenja pri teh razmerah celo znatno nižji (**preglednica 1**). Razlog za take rezultate je manjša nominalna kontaktna površina pri mazanih razmerah pri naših preizkusih. To nakazuje, da obrabna odpornost tribološkega sistema, ki je posledica številnih parametrov, od katerih številni sploh ne vplivajo na temperaturo, odločilno vpliva na izračunano temperaturo – preprosto, glede na velikost obrabne kotanje.

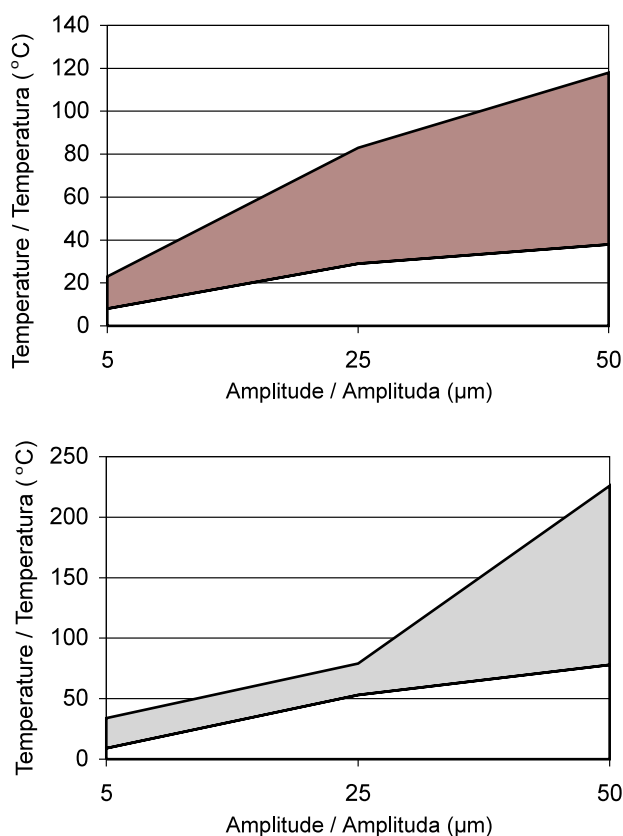
Iz širine raztrosa rezultatov na **sliki 1** lahko ugotovimo, da se rezultati, dobljeni na osnovi različnih modelov, pomembno razlikujejo, približno za faktor 3.

3.2 Vpliv realne kontaktne površine

Čeprav je splošno znano, da se normalna sila v kontaktu prenaša le preko manjšega dela nominalne površine, se pravi preko kontaktov nekaterih vršičkov, se nominalna površina pogosto uporablja za določitev kontaktnih temperatur. Nekateri modeli vključujejo popravke z uporabo deformacijskega merila, npr. Archardov model¹⁴ in Ashby-jev model trenutne temperature¹⁷. Vendar pa obstaja kar nekaj načinov/modelov za določitev realne kontaktne površine, in razlike med njimi so precejšnje, predvsem zaradi številnih novih predpostavk, ki imajo neposreden in velik vpliv na končni rezultat.

Pri našem delu smo uporabili splošno priznano merilo za določanje realne kontaktne površine, po katerem je le-to enako kvocientu normalne sile s trdoto mehkejšega materiala. Razmerja med tako izračunanimi in izmerjenimi nominalnimi površinami pri danih nemazanih razmerah so bila 1,5 %, 2,4 % in 10,9 % pri amplitudah pomikah 50 µm, 25 µm in 5 µm. Te vrednosti za realne kontaktne površine smo nato uporabili pri izračunu kontaktnih temperatur pri modelih, ki omogočajo neposredni vnos velikosti kontaktne površine v enačbe. Modeli največje trenutne kontaktne temperature niso bili zajeti v tem izračunu, ker niso neposredno primerljivi s pogosto uporabljenima modeloma, ki določata realno kontaktno površino na drugačen, lasten način^{14,17}.

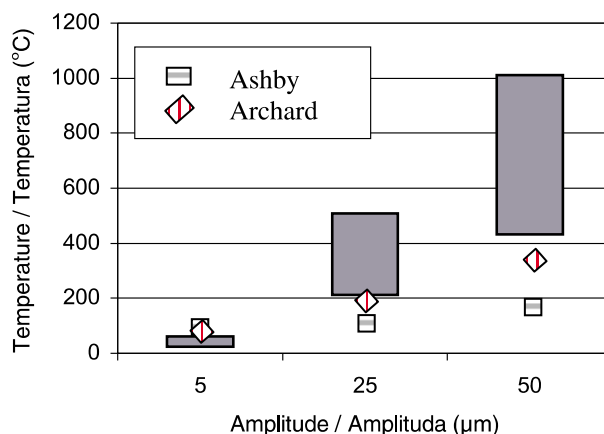
Slika 2 prikazuje rezultate, izračunane z uporabo modelov srednje trenutne temperature. Razvidno je, da se povprečna temperatura znatno spreminja glede na uporabljeno amplitudo pomika in sicer med 45 °C to 768 °C. Razlog za take rezultate je delno naraščajoča relativna drsna hitrost, delno pa manjšanje realne



Slika 1: Povprečna trenutna temperatura preko celotne nominalne kontaktne površine v (a) nemazanih in (b) mazanih fretinških razmerah

Figure 1: Average flash temperatures over a nominal contact area in (a) lubricated and (b) unlubricated fretting

kontaktne površine z naraščanjem amplitude. Največje absolutne razlike v izračunanih temperaturah med posameznimi modeli so 577 °C, 294 °C in 37 °C pri amplitudah pomika 50 μm, 25 μm in 5 μm. Te razlike so med posameznimi modeli velike za približno faktor 2,5. Primerjava z Ashby-jevimi in Archard-ovimi modelom trenutnih temperatur, ki določita vsak na svoj, drugačen način kot pri drugih modelih tudi realno kontaktno površino, pokaže, da zaradi znatno večjih površin temperatura naraste znatno manj (**slika 2**). Vrednosti realnih kontaktnih površin pri teh dveh modelih so 4- do 5-krat višje kot pri drugih in so 6,2 %, 9,8 % in 27,5 % pri Ashby-jevem modelu ter 8 %, 12,2 % in 56,1 % pri Archard-ovem modelu pri amplitudah pomika 50 μm, 25 μm in 5 μm. Prav to je morda tudi razlog, zakaj so temperature pri fretingu, dobljene s tema dvema modeloma, navadno nižje, kot velikokrat nakazujejo dobljene fazne transformacije materialov ^{6,10,11,13,18-20}. Vendar pa se podobno kot pri raztrosu rezultatov med posameznimi modeli povprečne trenutne temperature, izračunane po Ashby-jevem in Archard-ovim modelom, tudi razhajajo približno za faktor 2,5.



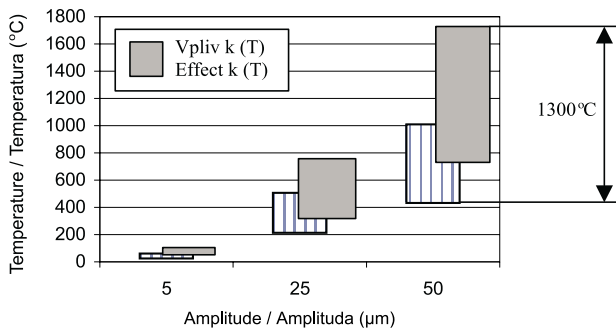
Slika 2: Povprečna trenutna temperatura z uporabo modelov, ki na tri različne načine določajo velikost realne kontaktne površine

Figure 2: Average flash temperatures by using models with three different ways for determination of a real contact area

3.3 Vpliv lastnosti materialov

Znano je, da se večina materialnih lastnosti, npr. mehanske, kemijske, električne pa tudi termične, spreminjajo v odvisnosti od temperature. Nekatere med temi pomembno, kot npr. termična prevodnost, ki se med 20 °C in 800 °C zmanjša za 1,7-krat. Torej, z namenom pokazati, kako vplivne so te spremembe, smo v izračunih temperatur izvedli variacijo termične prevodnosti.

Na osnovi rezultatov iz prejšnjega poglavja smo ponovno izračunali trenutne kontaktne temperature, pri čemer smo uporabili vrednosti spremenjene termične prevodnosti, ustrežno za temperaturo, dobljeno pri prejšnjem koraku, tj. pri 45 °C, 384 °C in 768 °C pri amplitudah pomika 5 μm, 25 μm and 50 μm. Slika 3 primerjalno prikazuje rezultate izračunov temperatur, dobljenih z uporabo termične prevodnosti materialov pri 20 °C ter z vrednostmi pri že prej izračunanih temperaturah. Ugotavljamo, da z uporabo bolj realnih vrednosti za termično prevodnost izračunamo še višje kontaktne temperature. Povprečne vrednosti po modelih srednje trenutne kontaktne temperature so 46 °C, 503 °C in 1185 °C pri amplitudah pomika 5 μm, 25 μm in 50 μm. Odgovarjajoče (povprečno) relativno povečanje temperatur pa je 2 %, 32 % in 55 %. Poudariti je še treba, da je pri nekaterih modelih povečanje še znatno večje. Pri absolutnih vrednostih / temperaturah to pomeni, da z uporabo modela iz te študije, ki daje najnižjo temperaturo in ne upošteva temperaturne odvisnosti termične prevodnosti ali z uporabo modela, ki daje najvišjo temperaturo in upošteva temperaturno odvisnost termične prevodnosti, dobimo pri amplitudi 50 μm razliko 1300 °C, čeprav so vse druge razmere enake. To pa nakazuje na izjemno pomembnost, katere vrednosti materialnih lastnosti upoštevamo v predpostavkah in kako različni so lahko dobljeni rezultati in sklepi o kontaktnih razmerah, samo z uporabo drugega modela.



Slika 3: Povprečne trenutne temperature, izračunane s termično prevodnostjo, v odvisnosti od temperature $k(T)$ ter pri 20 °C

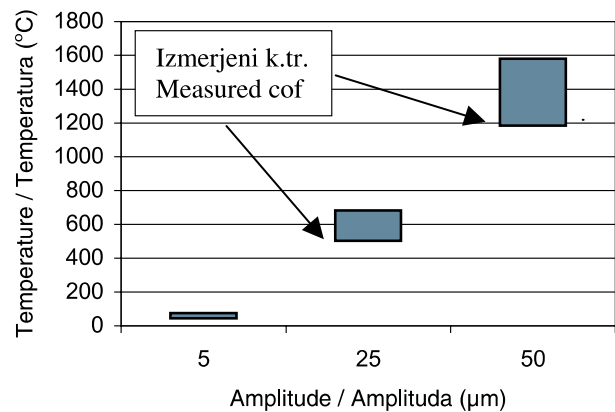
Figure 3: Average flash temperatures calculated with thermal conductivity as a function of temperature $k(T)$ and at 20 °C

3.4 Vpliv koeficienta trenja

Ko koeficient trenja upoštevamo pri izračunih, navadno vzamemo povprečno vrednost, ki velja za celoten kontakt. Vendar je pri mešanem ali mejnem mazanju koeficient trenja in s tem generirana toplota in temperatura na nekaterih vršičkih znatno višja od povprečne vrednosti. V skladu s to predpostavko smo trenutne temperature izračunali še z upoštevanjem koeficienta trenja, ki smo ga ocenili 30 % višje, kot je bil povprečni izmerjeni pri preizkusih. Rezultati za ta primer so prikazani na **sliki 4**.

Stolpci prikazujejo temperature, dobljene na osnovi srednjih vrednosti s **slike 3** (z upoštevanjem temperaturne odvisnosti termične prevodnosti), ki so bile najprej normalizirane z izmerjenimi vrednostmi koeficienta trenja (**preglednica 1**), nato pa preračunane za določeno območje tega koeficienta. Temperaturna razlika med izmerjenimi povprečnimi vrednostmi koeficienta trenja in preračunanega po zgornji metodi so pri amplitudi 25 µm približno 200 °C, pri 50 µm pa približno 400 °C. Pri amplitudi 5 µm so razlike znatno manjše zaradi nižjih temperatur, pa tudi zaradi nižjega koeficienta trenja. Ponovno je treba poudariti, da so razlike pri nekaterih modelih še večje. Nekateri izmed prikazanih rezultatov so seveda nerealni, saj bi se pri tako visokih temperaturah jeklo lokalno že stalilo, kar torej lahko pomeni tudi zgornjo mejo možnih kontaktnih temperatur. Pri naših analizah s spektroskopijo z Augerjevimi elektroni in presevalno elektronsko mikroskopijo smo dejansko dobili plast debeline 200-300 nm, ki odgovarja talini^{6,21}. Poleg tega so tudi ločene študije kemijske reaktivnosti med jeklom in keramiko pokazale, da je za nastale reakcije med tribološkim procesom potrebna temperatura nad 1000 °C^{22,23}.

Iz naših rezultatov izhaja, da bi z uporabo modelov, ki dajejo najvišje ali najnižje temperature, in/ali z zelo različnimi predpostavkami, uporabljenimi pri teh modelih, dobili razlike v temperaturah tudi nad 1800 °C. Še več, z uporabo izključno modelov največje trenutne temperature bi bile te razlike še bolj izrazite. Vseeno pa



Slika 4: Povprečne trenutne temperature v odvisnosti od koeficienta trenja na kontaktnih vršičkih

Figure 4: Average flash temperatures as a function of coefficient of a friction at asperity contacts.

je treba taljenje jekla vzeti za zgornjo možno mejo kontaktnih temperatur.

4 SKLEPI

Obrabna odpornost materialov v kontaktu znatno vpliva na izračunane temperature.

Povprečne trenutne temperature na realni kontaktni površini se med posameznimi modeli razlikujejo za faktor 2,5, tj. 37 °C, 294 °C in 577 °C pri amplitudah pomika 5 µm, 25 µm in 50 µm.

Popravek termične prevodnosti zaradi temperaturne odvisnosti rezultira v novem dvigu temperatur za 2 %, 32 % in 55 % pri treh izbranih amplitudah pomika.

Z upoštevanjem popravka povečanega koeficienta trenja na kontaktnih vršičkih proti njegovi povprečni izmerjeni vrednosti dobimo še ustrezno višje temperature. Tako lahko z različnimi modeli in različnimi vhodnimi parametri izračunamo pri največji amplitudi pomika temperature, ki se razlikujejo tudi do 1800 °C, čeprav gre za popolnoma enake kontaktne razmere.

Rezultati torej prikazujejo znatne razlike med uporabljenimi modeli in tudi odločilni vpliv lastnosti kontaktnih površin na izračunane temperature. Tako velike razlike tudi pomenijo, da je treba upoštevati omejitve in biti dovolj kritičen pri uporabi in upoštevanju dobljenih vrednosti z izbranimi enačbami.

5 LITERATURA

¹ Guha D., Roy Choudhuri SK, Wear 197 (1996), 63

² Kennedy Jr. FE, Wear 100 (1984), 453

³ Blok H., NASA, SP-237 (1969), 153

⁴ Kuhlmann-Wilsdorf D., Mater. Sci. Eng. 93 (1987), 107

⁵ Cowan RS, Winer WO, ASM Handbook, 18 (1992), 39

⁶ Kalin M. PhD thesis, 1999, ISBN 961-6238-16-7

⁷ Kalin M., Vižintin J., Wear 249 (2001), 172

⁸ Vižintin J., Kalin M., Novak S., Dražič G., Ives LK, Peterson MB, Wear 192 (1996), 11

⁹ Kalin M., Vižintin J., Novak S., J. Mat. Sci. Eng. A., 220 (1996), 191

- ¹⁰ Kalin M., Vižintin J., Novak S., Dražič G., *Wear* 210 (1997), 27
- ¹¹ Novak S., Dražič G., Kalin M., Vižintin J., *Wear* 225-229 (1999), 1276
- ¹² Ling FF, *J. Lubr. Technl.* 91 (1969), 397
- ¹³ Archard JF, Rowntree RA, *Proc. R. Soc. Lond., A* 418 (1988), 405
- ¹⁴ Archard JF, *Wear* 2 (1958-1959), 438
- ¹⁵ Tian X, Kennedy Jr. FE, *ASME Journal of Tribology* 116 (1994), 167
- ¹⁶ Greenwood JA, Alliston-Greiner AF, *Wear* 155 (1992), 269
- ¹⁷ Ashby MF, Abulawi J, Kong HS, *Tribology Transactions* 34 (1991), 577
- ¹⁸ Dobromirski J., Smith IO, *Wear* 117 (1987), 347
- ¹⁹ Waterhouse RB, *J. Iron Steel Inst.* 197 (1961), 301
- ²⁰ Vodopivec F., Vižintin J., Suštaršič B., *Mat. Sci and Tech.* 12 (1996), 355
- ²¹ Kalin M., Vižintin J., *Wear* 250 (2001), 681
- ²² Kalin M., Vižintin J., Vleugels J., Van Der Biest O., *Mat. Sci. & Eng A* 281 (2000), 28
- ²³ Kalin M., Vižintin J., Vleugels J., Van Der Biest O., *J. Mater. Res.* 15 (2000), 1367