

Temperatura in temperaturni gradient med fretting preizkusom 1% C in 1.5% Cr jekla

Temperature and Temperature Gradient During the Fretting Test on 1% C and 1.5% Cr Steel

F. Vodopivec¹, IMT Ljubljana

J. Vižintin, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1995-12-22

Pri fretting preizkusu je material izpostavljen obrabi pri majhni amplitudi in veliki frekvenci. Zaradi specifičnih pogojev preizkusa nastajajo mikroskopsko majhne točke torne preobremenitve, v katerih močno zraste temperatura. Toplota se močno širi po torni površini in nastajajo veliki temperaturni gradienti. Pri primernih pogojih preizkusa nastane tako imenovana bela faza, za katero smo na osnovi mikrostrukture ugotovili, da je izločilno utrjeni avstenit. Sodeč po mikrostrukturi, lokalna temperatura presega 1000°C, temperaturni gradient ob površini trenja pa presega 1000°C/mm. Predložen je geometrični model dogajanja ob tej površini.

Ključne besede: jeklo, fretting obraba, amplituda, bela faza, temperatura

At the fretting test the material is submitted to wear by small amplitude and high frequency. The temperature is strongly increased in small islands which grow at greater amplitude by coalescence. The generated heat is rapidly dissipated on the worn surface and a great temperature gradient is formed toward the bulk of the specimen. By appropriate test conditions a white phase is formed, which was identified as precipitation hardened austenite. The microstructure also indicates, that in the white phase the temperature is above 1000°C, while the temperature gradient toward the bulk of the specimen is above 1000°C/mm. A geometrical model of the process on the worn surface as well as the explanation of the effect of amplitude on the wear coefficient are proposed.

Key words: steel, fretting wear, amplitude, white phase, temperature

1 Uvod

Toplotna energija, ki jo proces trenja vnaša v kovino, lahko bistveno spremeni mehanizem in količino obrabe. Vedenje kovin je namreč različno, če temperatura ne dosega, ali pa dosega mejo, ki povzroča spremembe v začetni mikrostrukturi in lastnostih materiala. Še večje spremembe nastopijo pri obrabi in v vrednosti koeficienta trenja, če temperatura zraste nad mejo, ko hitro mehčanje preprečuje deformacijsko utrditev. Fretting je proces obrabe pri majhni amplitudi, visokih frekvencah in recipročnem gibanju. Srečujemo ga pri visokofrekvenčnih hidravličnih napravah, v krogličnih ležajih in drugih strojnih elementih in sklopih. Pri zadostnem segrevanju zaradi trenja je tudi izničen koristen vpliv maziva, ker se karbonizira ali celo oksidira. Zato je evolucija koeficienta trenja odvisna od začetnih pogojev (Hertzov tlak, hrapavost površine, mazivo), pa tudi od spremembe mikrostrukture in lastnosti materiala med procesom obrabe. V tem delu želimo predstaviti spremembe, ki nastanejo med fretting preizkusom jekla z 1% C

in 1.5% Cr. Poudarek bo na geometričnem modelu nastanka bele faze ter na temperaturi in temperaturnem gradientu, ki sta značilna za njen obstoj med preizkusom kaljivih jekel. Delo je nadaljevanje predstavitev eksperimentalnih dognanj in razprave o njih v virih^{1,2,3}. V teh delih so opisane geometrija in velikost poškodb na obrabljene mestu, predložena in podprta je razlaga narave in mehanizma nastanka bele faze in predstavljene so literaturne navedbe o segrevanju materiala med fretting preizkusom.

2 Eksperimentalno delo

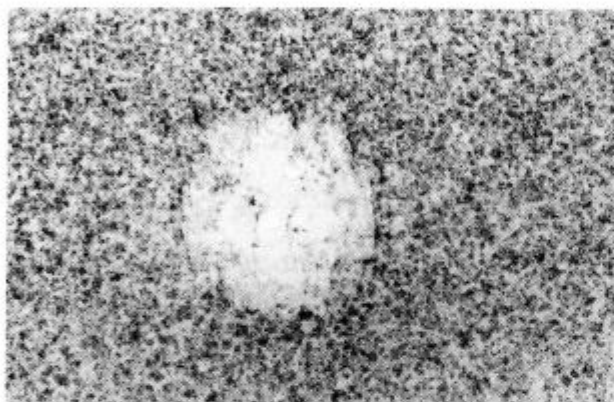
Pri fretting preizkusu se kroglica giblje izmenično na ravni površini. Oboje je bilo pri našem delu iz jekla za kroglične ležaje z 1% C in 1.5% Cr, ki je bilo poboljšano na enako trdoto 62 HRC. Preizkusni pogoji so bili naslednji: sila na kroglico 100 N, frekvenca 50 Hz, začetna preizkusna temperatura 50°C, število ciklov 280.000, zrak in amplituda od 5 do 75 µm. Sila, ki se je preko kroglice prenašala na preizkušanelec, je bila izračunana za elastično podajanje. Na ravnem vzorcu smo plast za plastjo debeline nekaj µm odbrusili in mikrostrukturo pregledali v optičnem in rastrskem elektronskem mikroskopu.

¹ Prof. Franc VODOPIVEC
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije
1000 Ljubljana, Lepi pot 11

3 Evolucija mikrostrukture pri večanju amplitude

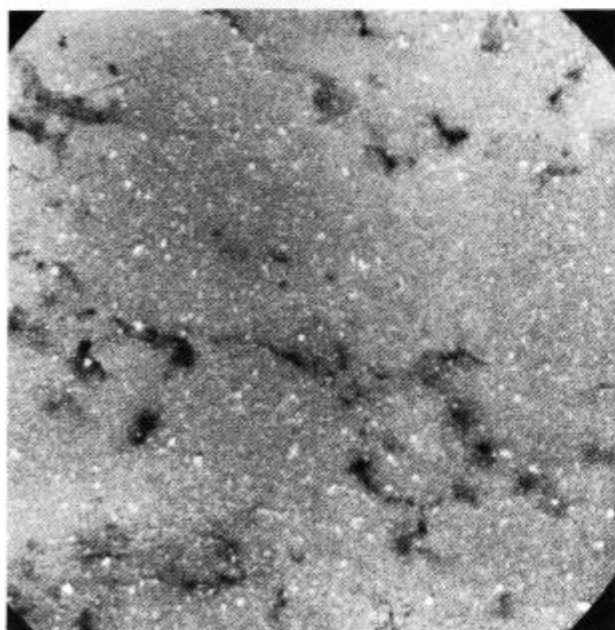
Površinska gostota toplote, ki jo ustvarja trenje, je odvisna od Hertzovega tlaka (sile na enoto površine) in frekvence, ki sta bila pri preizkusih konstantna, in od amplitude nihanja, ki je bila večja od preizkusa do preizkusa. Rast amplitude so spremljale spremembe mikrostrukture enake narave, rastla sta le površina in prostornina prizadetega jekla.

Pri najmanjši amplitudi 5 μm smo našli na kontaktni površini le majhen otoček bele faze v sredini polja obrabe (slika 1). Za to fazo je bilo dokazano, da je zaostali avstenit, disperzijsko utrjen s karbidnimi precipitati z velikostjo pod 0.05 μm (slika 2). Mikrostruktura te faze se močno razlikuje od začetne mikrostrukture jekla, ki je iz nizko popuščene martenzita z izrazitim habitusom in iz sekundarnih karbidnih izločkov z velikostjo nad 0.1 μm (slika 3). Razlikuje se tudi od



Slika 1: pov. 100 x, amplituda 5 μm . Majhno polje bele faze v sredini močno popuščene mikrostrukture na kontaktni površini

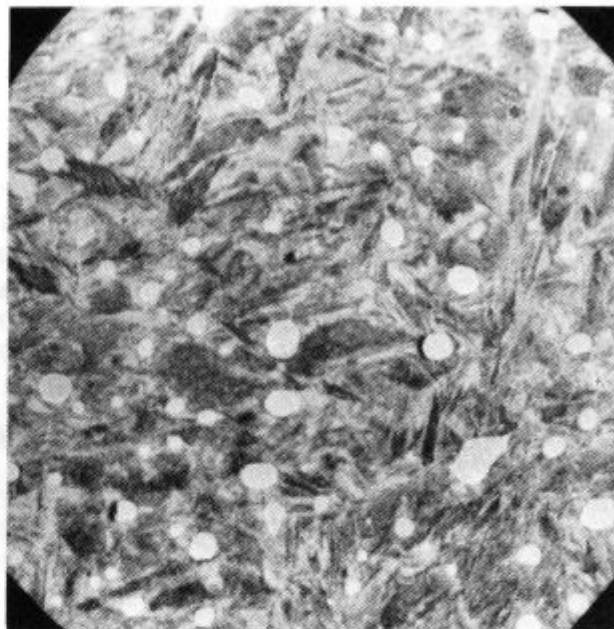
Figure 1: mag. 100 x, amplitude 5 μm . A small island of white phase in the centre of the area of tempered martensite



Slika 2: pov. 10.000 x. Mikrostruktura bele faze, avstenit in karbidni precipitati

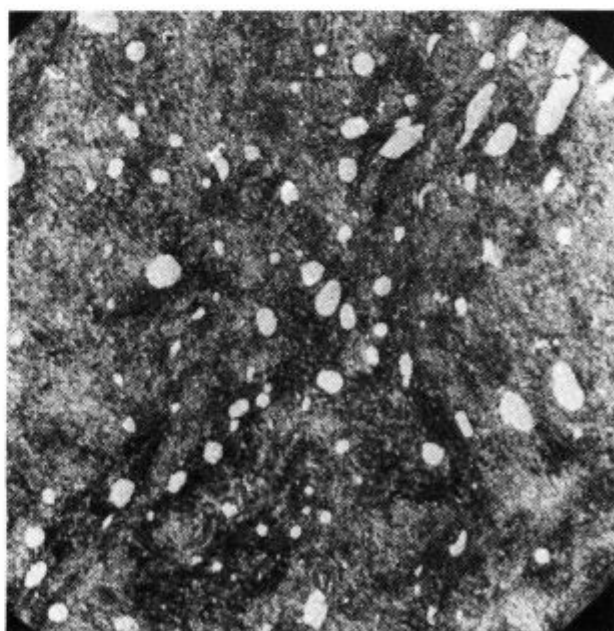
Figure 2: mag. 10.000 x. Microstructure in the white phase, austenite and carbide particles

mikrostrukture v polju obrabe, ki je odvisna od lokalne temperature ter je v bližini otoka bele faze iz ferita, sekundarnih karbidnih izločkov in precipitativ, nastalih pri visokotemperaturnem popuščanju martenzita (slika 4). V nobenem primeru nismo našli otokov bele faze mikrostrukture, ki bi dokazovala, da je bilo jeklo v dvofaznem $\alpha + \gamma$ področju temperature, je pa bila taka mikrostruktura najdena na istem jeklu, ki je bilo preizkušano v mnogo bolj ostrih pogojih.



Slika 3: pov. 10.000 x. Začetna mikrostruktura jekla. Nizko popuščeni martenzit in kroglice sekundarnega cementita

Figure 3: mag. 10.000 x. Initial steel microstructure. Low tempered martensite and particles of secondary cementite

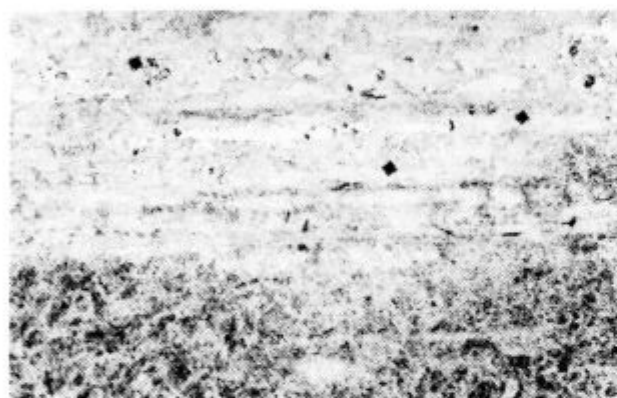


Slika 4: pov. 10.000 x. Močno popuščena mikrostruktura v bližini bele faze. Ferit, drobni, popuščeni karbidni precipitati in večje kroglice sekundarnega cementita

Figure 4: mag. 10.000 x. High tempered martensite. Ferrite, fine tempering precipitates and particles of secondary cementite

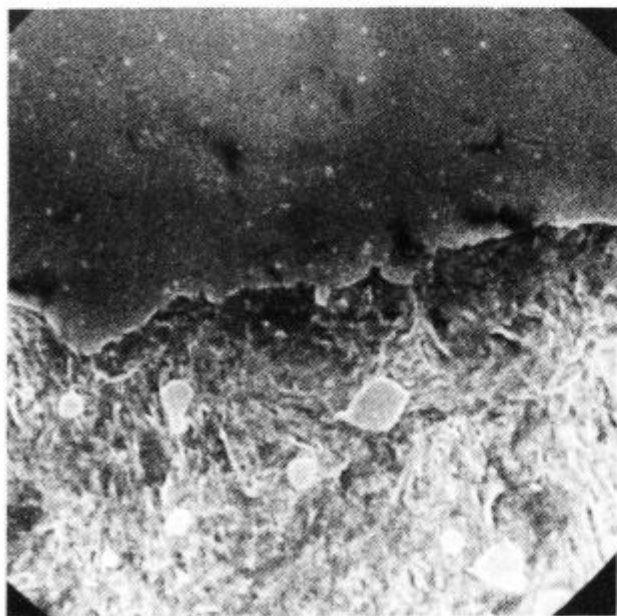
Mikrostruktura pove, da je bilo jeklo v bližini polja bele faze segreto na temperaturo blizu točke AC1, ki je za to jeklo 750°C ⁴. Pri večji amplitudi, 15 μm , najdemo v polju obrabe številne otočke bele faze (slika 5). Ponekod je ohranjen habitus martenzita še tik ob beli fazi (slika 6), kar kaže, da tu temperatura jekla ni presegla 700°C . Pri največji amplitudi, 75 μm , je nastalo le eno veliko polje bele faze (slika 7), ki ima enako mikrostrukturo kot pri majhni amplitudi (slika 2) in se ostro loči od matriksa, ki podobno kot na sliki 5 ohranja martenzitni habitus. Trdota bele faze je 1000 do 1050 HV 05, kar je za približno 200 HV 05 nad začetno trdoto jekla.

Podobne karbidne izločke, kot so na sliki 2, smo našli v zaostalem avstenitu v 50 μm velikem zrnu iz jekla z 1% C in 1.5% Cr, ki je bilo izdelano z vodno atomizacijo. Teoretična hitrost strjevanja takega zrna je 4×10^4 do 1.5×10^5 $^{\circ}\text{C/s}$, kar kaže, da je hitrost ohlajanja bele faze po končanem preizkusu



Slika 5: pov. 100 x, amplituda 15 μm . Številni otočki bele faze na kontaktni površini

Figure 5: mag. 100 x, amplitude 15 μm . Several islands of white phase on the wear surface



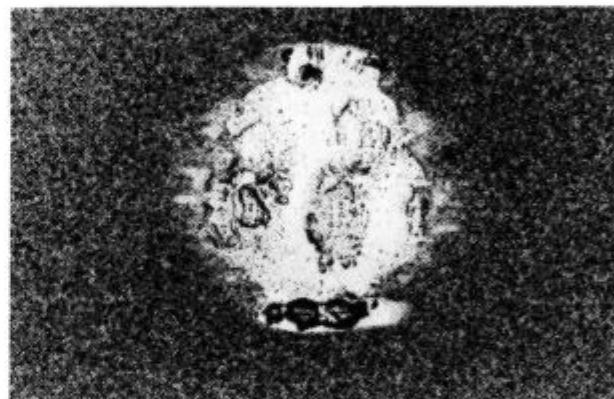
Slika 6: pov. 10.000 x. Popuščeni martenzit in kroglice sekundarnega cementita tik ob beli fazi

Figure 6: mag. 10.000 x. Tempered martensite and secondary cementite particles near the boundary of the white phase

zelo velika. Na vseh preizkušancih je velikost otočkov bele faze v ravnini kontakta mnogo večja od njihove globine (slika 8). To seveda kaže, da proces trenja in obrabe omogočata predvsem rast bele faze v kontaktni ravnini. Zelo pomembna za razlago procesa nastanka bele faze je njena ostra meja proti mikrostrukturi jekla pod njo. Mikrostruktura bele faze je lahko nastala le, če se je jeklo v njej segrelo nad temperaturo 1000°C , ki je potrebna, da se v avstenitu raztopijo zrna sekundarnih karbidov⁴. Ker je bilo jeklo pod poljem bele faze največ pri AC1 temperaturi, je mogoče sklepati, da je bil temperaturni skok na notranji meji bele faze vsaj 200°C . Tak skok lahko nastane le, če je na meji med belo fazo in mikrostrukturo pod njim nek ponor toplote, ki nastaja na kontaktni površini.

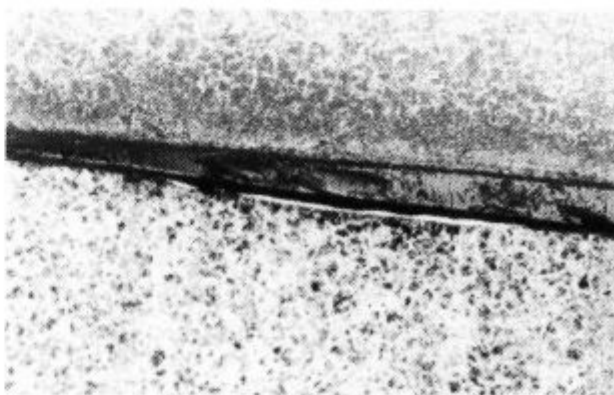
4 Generacija toplote med obrabo fretting in model obrabe

Dejstvo, da najdemo belo fazo, ki je znak za najbolj vroča mesta na kontaktni površini, v obliki otočkov z različno velikostjo, od nekaj do več 100 μm^2 , pove, da se toplota ustvarja v začetku preizkusa na zelo majhnih stičnih mestih. Ta mesta so lahko vršički na hrapavi površini ali obrabni delci, ki so se med obrabo s površine odtrgali in so ostali na kontaktni površini. Večji otok bele faze nastane z lateralno rastjo in koalescenca manjših. Lateralno rast bele faze na kontaktni površini sestavljata dva procesa, nadaljevanje obrabe, ki veča kontaktno



Slika 7: pov. 100 x, amplituda 75 μm . Polje bele faze na oddaljenosti 16 μm od kontaktne površine

Figure 7: mag. 100 x, amplitude 75 μm . Area of white phase on the distance of 16 μm from the wear surface



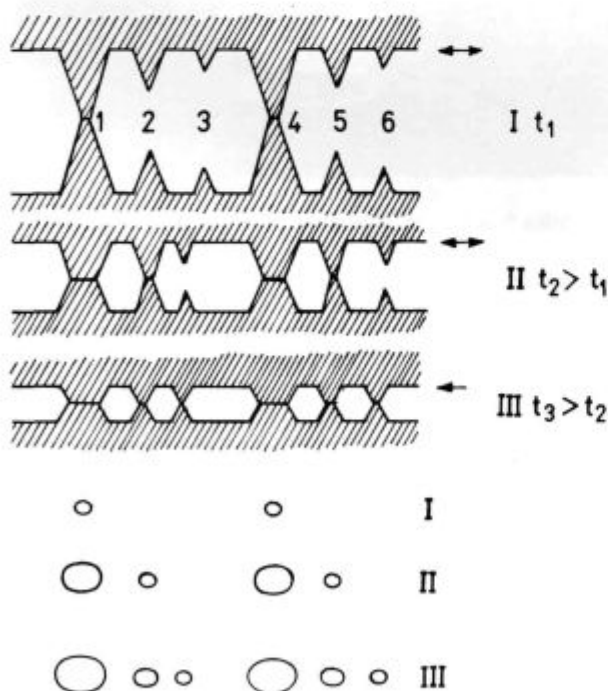
Slika 8: pov. 200 x. Prečni prerez skozi plast bele faze

Figure 8: mag. 200 x. Section of the white phase layer

površino, ter gnetenje in sploščanje jekla, ki je v beli fazi zelo plastično na trši in bolj hladni podlagi. Lateralna rast bele faze je zato mnogo hitrejša od globinske.

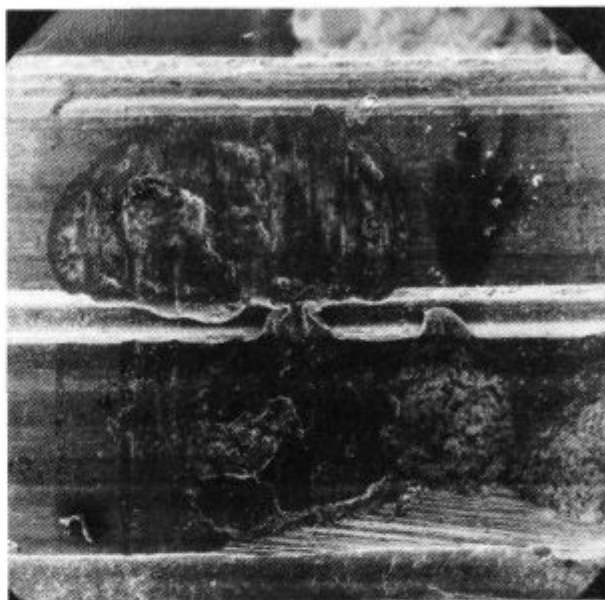
Poizkusimo sedaj na osnovi empiričnih ugotovitev in sprejemljivih predpostavk oblikovati model dogajanja na kontaktni površini, ki bi nam razložil nastanek in rast polj bele faze. Stična ploskev obeh kontaktnih teles je hrapava in jo karakterizirajo vršički z različno višino (slika 9). Realna stična površina je torej manjša od idealne. Hertzov tlak je bil izračunan za elastično podajanje, vendar je logično sklepati, da se na stičnih vršičkih jeklo tudi plastično deformira in stlači. V začetku procesa srečamo nizkotemperaturne mehanizme obrabe. Plastična deformacija stične površine pa ustvarja toploto, zaradi katere raste temperatura na stičnih mestih najprej preko meje deformacijske utrditve in nato do meje, potrebne za nastanek bele faze. Pri drugih konstantnih pogojih je količina toplote, ki nastaja na stični površini sorazmerna z dolžino poti trenja, torej pri enaki frekvenci, z velikostjo amplitude.

Hertzov tlak, amplituda in frekvenca so pri preizkusu konstantni, in če ne bi rastla temperatura, bi bila prostornina plastične deformacije konstantna. Količina bele faze raste sorazmerno s kvadratom linearne velikosti polj bele faze ($P \propto f/r^2$), rast v globino pa je obratno sorazmerna s kvadratom linearne velikosti bele faze. Tudi višja temperatura bele faze tega razmerja med hitrostjo ploščinske in globinske rasti otokov bele faze ne spremeni, kar si razlagamo kot veliko razmerje med velikostjo na torni površini in globino otokov bele faze. Hitrost lateralne rasti otokov bele faze se med preizkusom zmanjšuje zato, ker jo spremlja pojav novih stičnih točk, kot je shematično prikazano na sliki 9. Bela faza je zaradi visoke temperature zelo gnetljiva, zadnji rezultati nakazujejo celo na možnost, da je v testastem stanju. Na preizkušancu iz iste vrste jekla, ki je bil izpostavljen preizkusu fretting v pogojih močnejšega trenja in je temu ustrezno nastalo dovolj bele



Slika 9: Shema prereza skozi kontaktne površine v začetku preizkusa in po dveh stopnjah obrabe. t - trajanje preizkusa

Figure 9: Scheme of the section of the wear surface at the start and after two steps of wear. t - test time



Slika 10: Kapljice kovine na robu cevastega preizkušanca po fretting preizkusu

Figure 10: Droplets of steel on the edge of a specimen submitted to fretting wear at severe conditions

faze s podobno mikrostrukturo kot na sliki 2, smo belo fazo našli tudi v obliki kapljic, ki so bile narinjene na rob cevastega valjastega preizkušanca (slika 10).

Trenje na otočkih bele faze je majhno zaradi njene velike gnetljivosti. Med preizkusom se zato veliko trenje ohranja predvsem zaradi nastanka novih kontaktnih mest. Za razumevanje procesa nastanka in obstoja bele faze je potrebna sprejemljiva razlaga, kako in zakaj se ta faza ohranja v tanki plasti in kaj je vzrok za skokovito zmanjšanje temperature na njeni meji z jeklom, ki je ostalo pod AC1 temperaturo. Pri razlagi temperaturnega skoka izhajamo iz predpostavke, da je jeklo v beli fazi v testastem stanju, ali je vsaj zelo lahko gnetljivo, in se zato zaradi delujočega Hertzevega tlaka plošči na trši podlagi v tanko plast.

Za pretvorbo iz mikrostrukture iz disperzije različno velikih karbidnih precipitativ v α fazi v homogen avstenit in α - γ premeno je potrebna energija. Termodinamični izračun, ki upošteva tvorbeno in topilno toploto karbida, povečanje entropije in entalpijo $\alpha \rightarrow \gamma$ premene pokaže namreč, da je skupni proces endotermen, za nastanek bele faze se torej porablja toplota. Vir te toplote je seveda trenje na kontaktni ploskvi. Močna površinska rast izključuje pomemben vpliv lateralnega ogrevanja. Upoštevajoč vse zapisano, je utemeljena predpostavka, da je vzrok temperaturnega skoka na notranji meji bele faze trojen: ponor toplote, mehanično ploščanje in majhen odvod toplote z mejne površine. Dejstvo, da je velikost plasti bele faze v ravnini kontakta mnogo večja kot globina, kaže na to, da je ustvarjanje toplote v polju trenja relativno majhno, neprimerljivo manjše od energije, ki se jeklu dovaja, npr. pri kaljenju površine. Na osnovi sprememb mikrostrukture predpostavljamo, da je porazdelitev temperature v področju toplotnega vpliva trenja taka, kot jo shematično prikazuje slika 11. Širina pasu s popuščeno mikrostrukturo je tem ožja, čim večja je amplituda frettinga, ker se v tem primeru sorazmerno manj energije porabi za nastanek bele faze in ker je zaradi manjšega trenja manjše nastajanje toplote.

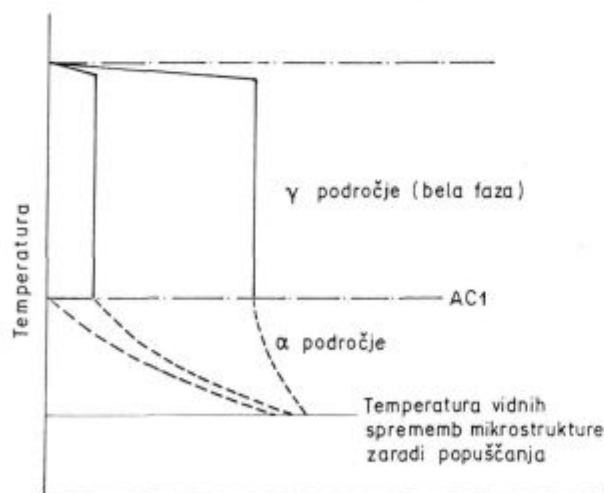
Model omogoča enostavno razlago, zakaj pri povečanju amplitude raste površina bele faze. Očitno je, da so pri povečanju amplitude pogoji za pogostejši kontakt med kontaktnimi mesti, kjer bela faza nastaja, kot shematično prikazuje **slika 12**. Rast površine bele faze pri povečani amplitudi je torej dokaz, da imata zelo pomembno vlogo v procesu na kontaktni površini tudi koalescenca in ploščenje te faze v tanko plast.

Opisani model omogoča enostavno razlago, zakaj je pri konstantnih pogojih preizkušanja polje poškodbe najbolj globoko (abradirana največja količina materiala) pri amplitudi 15 μm in zakaj se koeficient obrabe zmanjšuje pri povečanju amplitude nad to mejo (**slika 13**). Obraba v začetku raste z amplitudo, ko pa se zaradi nastajanja toplote močneje spreminjajo lastnosti jekla, se začne zmanjševati koeficient trenja. Razmere pa se bistveno spremenijo, ko nastane dovolj bele faze. Na tej, ki je lahko gnetljiva, verjetno pa tudi testasta, je trenje najmanjše. Pri povečanju amplitude bela faza nastane hitreje in v večji količini, rezultat pa je zmanjšanje povprečne vrednosti koeficienta trenja. Ta je namreč relativizirana vsota dveh različnih koeficientov trenja, manjšega na poljih bele faze in večjega na kontaktni površini, kjer te faze ni.

5 Sklepi

1. V delu so na kratko povzeti rezultati mikrostrukturnih preiskav po fretting preizkusih jekla z 1% C in 1.5% Cr. Ti preizkusi kažejo, da na kontaktnih mestih nastajajo otočki bele faze, ki je na temperaturo okoli 1000°C segret homogen avstenit, in da je na njeni meji do popuščene mikrostrukture jekla temperaturni skok 200°C ali celo večji.

2. Na osnovi narave bele faze, morfologije njenega nastanka in količine te faze, ki raste, če se pri konstantnem Hertzovem tlaku in frekvenci povečuje amplituda, je bil predložen geometrični model dogajanj na kontaktni površini ob prisotnosti bele faze.



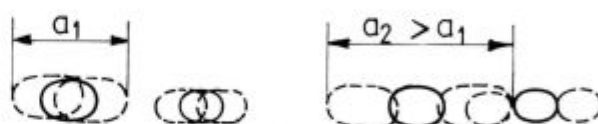
Slika 11: Shema prereza temperaturnega polja v področju sprememb mikrostrukture zaradi frettinga pri naraščanju amplitude

Figure 11: Scheme of the section of the temperature field at the worn surface by increased amplitude

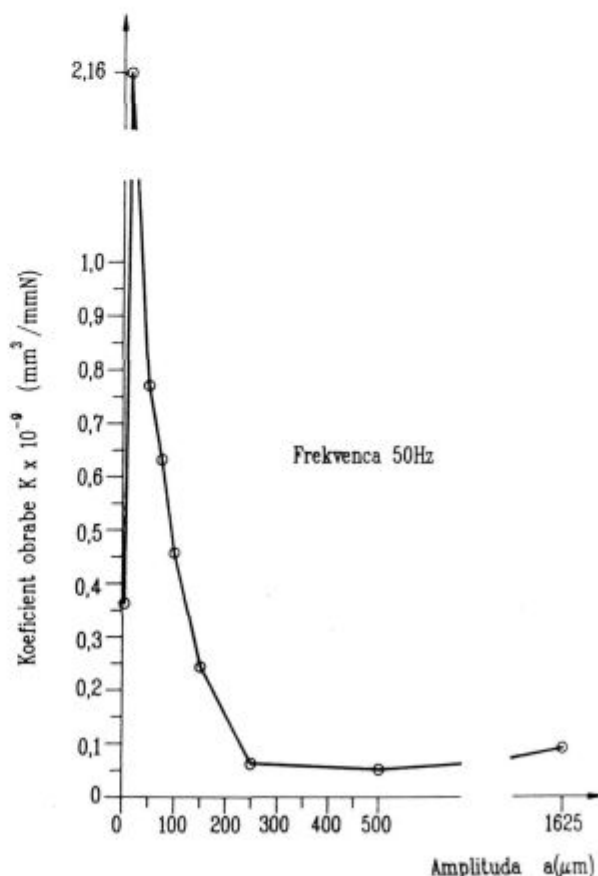
3. Bela faza je zelo gnetljiva in je na njej trenje manjše kot na hladnejših delih kontaktne površine. Zato se povprečni koeficient trenja zmanjšuje, ko raste na kontaktni površini delež bele faze z večanjem amplitude pri konstantni frekvenci in Hertzovem tlaku. Pred nastankom bele faze ima povečanje amplitude frettinga nasproten učinek, koeficient trenja in velikost poškodbe na kontaktnem mestu raste z rastjo amplitude.

4. Lateralna rast bele faze, ki pri zadostnih amplitudah privede do koalescenca posamičnih otočkov, je deloma posledica rasti kontaktne površine zaradi nadaljevanja procesa obrabe, deloma pa sploščenja zaradi njene velike gnetljivosti.

5. Rast polj bele faze v globino je omejena zaradi hitrejših lateralnih rasti, manjšega nastajanja toplote zaradi trenja in porabe toplote za pretvorbo mikrostrukture iz α faze in karbidnih precipitativ v homogeni avstenit. Oba pojava, predvsem pa ponor toplote na notranji meji, sta vzrok za temperaturni skok na tej meji.



Slika 12: Shema vpliva amplitude na rast polj bele faze
Figure 12: Scheme of the effect of amplitude on lateral growth of islands of white phase



Slika 13: Vpliv amplitude fretting preizkusa pri konstantni frekvenci in Hertzovem tlaku na povprečni koeficient trenja (po viru 1)

Figure 13: Influence of amplitude on the average wear coefficient

6 Viri

¹ J. Vižintin, F. Vodopivec: *Kovine, zlitine, tehnologije*, 27, 1993, 185-190

² F. Vodopivec, J. Vižintin, B. Šuštaršič: Effect of fretting amplitude on the microstructure of a 1% C and 1.5% Cr steel; *sprejeto v objavo v Materials Science and Technology*

³ J. Vižintin, M. Kalin, B. Podgornik, F. Vodopivec: *Sprejeto v objavo v 'Tribotest'*

⁴ G. Berger: *La dilatométrie différentielle appliquée à l'étude des aciers*; Zal. Dunod, Paris, 1965