

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA

DIPLOMSKO DELO

DAVOR PEČEK

LJUBLJANA, 2017

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA MATERIALE IN METALURGIJO

**TESTIRANJE ODPORNOSTI NA TERMIČNO
UTRUJANJE MATERIALA VALJEV ZA DELO V
VROČEM**

DIPLOMSKO DELO

DAVOR PEČEK

LJUBLJANA, september 2017

UNIVERSITY OF LJUBLJANA
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING
DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGY

**THERMAL FATIGUE TESTING OF ROLL MATERIAL
FOR HOT WORKING**

DIPLOMA WORK

DAVOR PEČEK

LJUBLJANA, september 2017

PODATKI O DIPLOMSKEM DELU

Število listov: 49

Število strani: 38

Število slik: 42

Število preglednic: 2

Število literaturnih virov: 24

Število prilog: 0

Študijski program: Metalurške tehnologije

Komisija za zagovor diplomskega dela:

Predsednik: *prof. dr. Milan Bizjak*

Mentor: *prof. dr. Milan Terčelj*

Član: *prof. dr. Goran Kugler*

Ljubljana, september 2017

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi kakorkoli pomagali pri izdelavi diplomske naloge. Predvsem se zahvaljujem svojemu mentorju, prof. dr. Milanu Terčelju, ki mi je vseskozi dajal koristne napotke ter spodbudo.

Ob tej priložnosti se zahvaljujem tudi mami, ki mi je omogočila študij.

IZVLEČEK

Namen diplomske naloge je bil raziskati pojav nastanka ter rasti razpok na površini jekla za valje kot posledica termičnega utrujanja. Preizkus smo izvedli na termo-mehanskem simulatorju metalurških procesov Gleeble 1500D. Kemična sestava jekla za valje je bila: 1,65 mas. % C, 1,94 mas. % Ni, 11,28 mas. % Cr, 1,17 mas.% Mo. Razpoke nastanejo na mestih z izločenimi karbidi ter rastejo po karbidnih poteh. Izmenično ogrevanje in ohlajanje pa povzročita izmenično nastopajoče tlačne in natezne napetosti, kar povzroči utrujanje materiala. Preizkušance smo ogrevali na tri različne temperature, 500 °C, 600 °C in 700 °C ter jih nato notranje hladili z vodo. Za vsako temperaturo smo opravili preizkuse z 200, 500, 1000 ter 2500 cikli. Pod mikroskopom smo prešteli vse razpoke ter izmerili njihove globine (globino smo smatrali kot dolžino razpoke). Izračunali smo povprečno dolžino vseh razpok, gostoto razpok ter določili dolžine sedmih najdaljših razpok.

Ključne besede: temperaturno utrujanje, razpoke, jeklo za valje, karbidi.

ABSTRACT

The purpose of the thesis was to investigate the initiation and growth of cracks on the surface layer of steel for rolls which are subjected to thermal fatigue. Testing was carried out on thermo-mechanical simulator of metallurgical states Gleeble 1500D. Chemical composition of used steel for rolls was: 1.65 wt. % C, 1.940 wt. % Ni, 11.279 wt. % Cr, 1.169 wt. % Mo. As a result of thermal fatigue initiation of cracks at carbides spots was observed while their growth takes place using carbides pathways. Alternately heating and cooling causes alternately performing tensile and compressive stresses which results in fatigue of the material. The samples were heated to three different maximal temperatures, i.e. 500 °C, 600 °C and 700 °C, respectively, whereas the specimen were internally cooled with water. For each test temperature the testing was interrupted at 200, 500, 1000 and 2500 cycles. Under the microscope we counted all the cracks, measured their lengths and depth. We calculated the average length of all cracks and crack density. Thus also seven longest cracks were determined.

Key words: thermal fatigue, cracks, steel for rolls, carbides.

KAZALO VSEBINE

1. UVOD	1
2. TEORETIČNI DEL.....	2
2.1. Razpoke	2
2.1.1. Nastanek razpok	2
2.1.2. Rast razpok	2
2.1.3. Vpliv mikrostrukture na rast razpok	4
2.1.4. Vpliv oksidacije na rast razpok	5
2.2. Temperaturno utrujanje.....	6
2.3. Valjanje	7
2.3.1. Temperatura valjanja	8
2.3.2. Temperatura valjev	9
2.3.3. Obremenitve na valjih	10
2.3.4. Poškodbe na valjih in orodjih	12
2.4. Valji	15
2.4.1. Način proizvodnje.....	15
2.4.2. Materiali valjev	15
2.4.3. Mikrostruktura valjev	16
2.5. Testi termičnega utrujanja	17
3. EKSPERIMENTALNI DEL.....	21
3.1. Uporabljeni material in preizkušanec.....	21
3.2. Opis testa temperaturnega utrujanja.....	22
3.3. Priprava obrusa za metalografsko analizo	24
4. REZULTATI.....	26
4.1. Mikrostruktura in trdota preizkušane materiala	26
4.2. Kvantitativna ocena odpornosti testnega materiala na termično utrujanje.....	26
4.2.1. Porazdelitev razpok glede na dolžino.....	26
4.2.2. Povprečna dolžina in gostota razpok.....	30
4.2.3. Dolžina sedmih najdaljših razpok	31
4.3. Mikrostrukturni prikaz rasti razpok	33
5. ZAKLJUČKI	36
6. LITERATURA	37

SEZNAM SLIK

Slika 1: Tri faze nukleacije razpoke: a) zgoščevanje dislokacij, b) pokanje karbida, c) napredovanje razpoke skozi zrno [2, 3].	2
Slika 2: Shematski prikaz monotone cone ter ciklične plastične cone ter pripadajoče razporeditve napetosti po razbremenitvi [1].	3
Slika 3: Oba mehanizma rasti razpok, področje I in II [1, 3].	4
Slika 4: Mehanizem rasti razpok zaradi prisotnosti oksidne plasti. a) razpoka na površini, b) povečan predel ob ustju razpoke, c) povečana konica razpoke [1, 11].	6
Slika 5: Shematski primeri napetostnih polj med variacijo temperature [1,3].	6
Slika 6: Prikaz vzdolžnega valjanja [12].	7
Slika 7: Vzdolžno, prečno in poševno valjanje [13].	8
Slika 8: Mehanizmi prenosa toplote pri vročem valjanju [14].	9
Slika 9: Delovni pogoji, ki jim je valj izpostavljen, (1, 2, 3, 4) ohlajanje na zraku, (2, 5) hlajenje z vodnimi prhami, (VR) ogrevanje valja v valjni reži [13].	9
Slika 10: Potek temperature na površini valja: a) pri enem ciklu, b) v daljšem časovnem obdobju [15].	10
Slika 11: Nastanek tlačnih oz. nateznih napetosti na valju glede na njegov položaj in b) Shematski prikaz tlačnih in nateznih deformacij na površini valja [16].	11
Slika 12: a) Adhezija, b) Abrazija, c) Degradacija površine, d) Tribokemične reakcije [16].	12
Slika 13: Trakaste termične razpoke na valjih za vroče valjanje [17].	13
Slika 14: Lestvičaste termične razpoke [17].	13
Slika 15: Lokalizirane termične razpoke v kombinaciji z odkruški [17].	14
Slika 16: a) Mreža temperaturnih razpok na površini orodja za vroče kovanje, b) nastale razpoke na robovih gravure orodja za vroče kovanje [15].	14
Slika 17: Razdelitev materialov za valje glede na strukturo delovnih plasti [18, 19].	16
Slika 18: Shema naprave za testiranje termičnega utrujanja z izmeničnim potapljanjem v aluminij in vodo [10].	17
Slika 19: Naprava za termično utrujanje, ki sta jo uporabila Shen-Chin Lee in Lin-Chao Weng [20].	18
Slika 20: Shema naprave za termično utrujanje, ki so jo uporabili P. Revel, V. Bogard, D. Kircher [21].	18
Slika 21: Naprava za termično utrujanje, ki so jo uporabili M. Pellizzari, A. Molinari in G. Strafellini [22].	19
Slika 22: Naprava za termično utrujanje, ki so jo uporabili A. Persson, S. Hogmark ter J. Bergström [23].	20
Slika 23: Shematski prikaz preizkušanca s hladilno komoro. a) Vzdolžni presek, b) Prečni presek [24].	20
Slika 24: Preizkušanec.	21
Slika 25: Dimenzije preizkušanca.	22
Slika 26: Delovna celica naprave Gleeble 1500D.	22
Slika 27: Preizkušanec vpet v čeljusti ter segret na testno temperaturo.	23
Slika 28: Temperaturni cikli med utrujanjem.	24
Slika 29: Razrezan vzorec.	24

Slika 30: Obris pripravljen za metalografsko analizo.	25
Slika 31: Mikrostruktura materiala valjev za delo v vročem.	26
Slika 32: Skupno število razpok.	27
Slika 33: Število razpok po 200 ciklih in različnih temperaturah.	28
Slika 34: Število razpok po 500 ciklih in različnih temperaturah.	28
Slika 35: Število razpok po 1000 ciklih in različnih temperaturah.	29
Slika 36: Število razpok po 2500 ciklih in različnih temperaturah.	29
Slika 37: Povprečna dolžina razpok.	30
Slika 38: Gostota razpok.	31
Slika 39: Dolžine posameznih sedmih najdaljših razpok.	32
Slika 40: Inicijacija razpoke pri ozkem in dolgem karbidu na površini (a) (500 °C, 500 ciklov) ter rast razpoke po karbidni poti (b) (700 °C in 1000 ciklov).	33
Slika 41: Inicijacija in rast razpoke pod kotom (500 °C, 500 ciklov) (a), združitev dveh razpok (700 °C, 1000 ciklov) (b).	34
Slika 42: Nuklecija in rast razpok; luščenje zaradi razpok v karbidih vzporedno z površino (700 °C, 500 ciklov) (a), inicijacija razpoke na masivnem karbidu ter njegovo krušenje (500 °C, 1000 ciklov) (b), nukleacija notranje razpoke pri masivnejšem karbidu ter njena rast (600 °C, 500 ciklov) (c) in upočasnitev rasti razpok na lamelarnem evtektiku (500 °C, 200 ciklov) (d).	35

SEZNAM PREGLEDNIC

Tabela 1: Kemična sestava materiala valjev za delo v vročem v mas.%	21
Tabela 2: Testni parametri temperaturnega utrujanja.....	23

1. UVOD

S tehnologijo valjanja predelamo največji delež jeklenih (pol)izdelkov. V ekonomiji vsakega podjetja je življenjska doba valjev zaradi visoke cene zelo pomemben faktor. Površina valjev se zaradi zahtevnih termomehanskih obremenitev, ki jim je izpostavljena, poškoduje. Na površini se tvorijo utrujenostne razpoke, ki se lahko vtisnejo na površino valjanca, kar je moteče za kupce. Kvaliteta površine valjev je zato odločujočega pomena za kakovost valjanih proizvodov [1-3].

Na poškodbe na površinski plasti valjev v največji meri vplivajo hitre spremembe temperature do katerih pride, ko je valj v stiku z vročim preoblikovancem ter poznejšem ohlajanju. Ta proces imenujemo termično utrujanje. Posledica termičnega utrujanja je nastanek razpok na površini valjev, ki se z večanjem števila ciklov temperaturnega utrujanja in z višanjem temperature množijo, širijo, in tako vse bolj rastejo v globino valjev. Pri pojavu združevanja razpok pa lahko posledično prihaja do odstopanja materiala od osnove oziroma luščenja ter tako do povečane hrapavosti površine in obrabe valjev. Glede na podatke iz literature lahko sprememba temperature na površini valjev v enem samem obratu znaša tudi do 600 °C, hitrost spremembe temperature pa se spreminja s hitrostjo valjanja. Zaradi velike globine razpok, ki se razvijejo, je potreben nekajkrat večji odbrus (struženje) površine valjev, kot pa pri normalnem vzdrževanju, kar se odraža v občutno povečani obrabi valjev [1-5].

Znanih je več metod ali testov za ugotavljanje posledic termičnega utrujanja v materialu oziroma za kontrolo površine valjev, ki dajejo orientacijske vrednosti o odpornosti materiala na ta način obremenjevanja. Na osnovi rezultatov je možna lažja odločitev glede izbire primernih procesnih parametrov izdelave materiala ter izboljšanje glede na lastnosti odpornosti na termično utrujanje. Pravilna izbira materiala je poglobitnega pomena, saj poleg omenjenih temperaturnih obremenitev določa življenjsko dobo valjev, ki je glavna zahteva kupca. Cena valjev je odvisna od izbire materiala, na katero vplivajo pogoji obratovanja [1-5].

Na napravi Gleeble 1500D smo v ta namen testirali vzorce iz materiala valjev za delo v vročem v temperaturnem območju 500-700 °C. Pri različnem številu temperaturnih ciklov smo na delovnem delu preizkušanca izmerili dolžino vsake razpoke. Na osnovi tega smo izračunali dolžine sedmih najdaljših razpok, povprečno dolžino vseh razpok ter gostoto razpok.

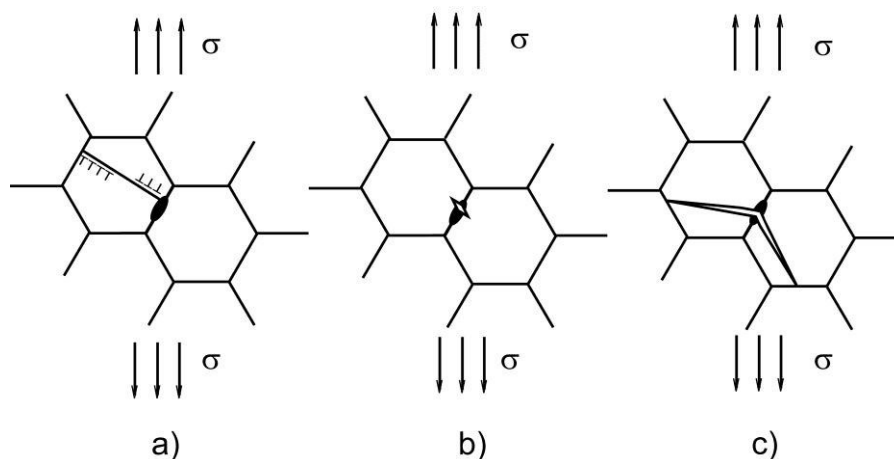
2. TEORETIČNI DEL

V teoretičnem delu je najprej opisan nastanek razpok, rast razpok, vpliv mikrostrukture ter oksidacije na rast razpok in teoretične osnove termičnega utrujanja. Podrobneje je opisan postopek valjanja z vidika temperature valjanja, temperature valjev ter še nekaterih drugih parametrov. Nadalje so opisane tudi obremenitve ter poškodbe, ki nastanejo na valjih, način proizvodnje valjev, opisani so materiali valjev ter kemijske sestave valjev. Na koncu so navedeni še testi za termično utrujanje, ki so jih razvili različni avtorji.

2.1. Razpoke

2.1.1. Nastanek razpok

Eden izmed splošno najbolj priznanih modelov za nastanek razpok v polikristalnih materialih je Smithov model. Ta upošteva prisotnost karbidov na mejah zrn, ki povzročijo zgostitev dislokacij, kar privede do loma karbida ter posledično rast razpoke v matrico. Model z upoštevanjem gostote dislokacij upošteva efekt velikosti zrna, ter vpliv temperature, kjer loči med različnimi deformacijskimi mehanizmi; pri nižjih temperaturah upošteva dvojčenje, pri povišanih temperaturah pa zdrs [1, 2].

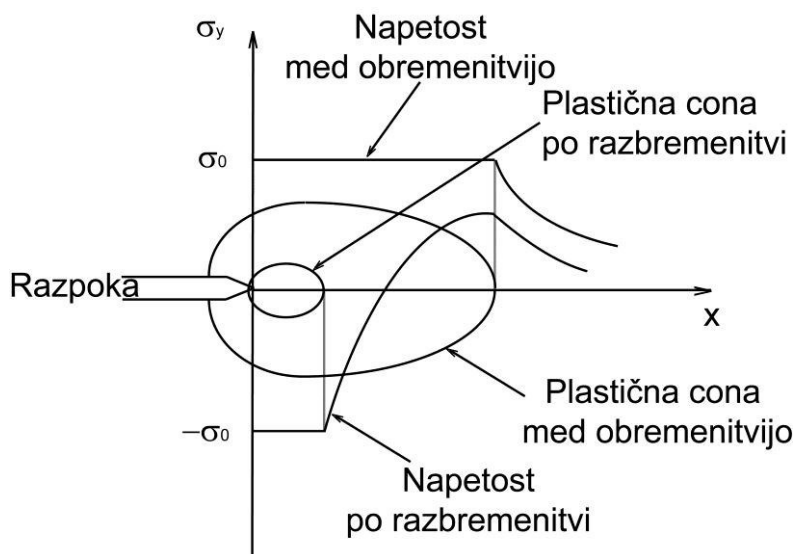


Slika 1: Tri faze nukleacije razpoke: a) zgoščevanje dislokacij, b) pokanje karbida, c) napredovanje razpoke skozi zrno [2, 3].

2.1.2. Rast razpok

Po nastanku razpok je največji del napetosti skoncentriran v delu materiala, ki obkroža konico razpoke. Ko je razpoka še manjša je njena rast tesno povezana z mikrostrukuro okolice in združevanjem posameznih manjših razpok. Z rastjo razpoke se ta vpliv zmanjšuje, tako da je mogoče vpliv lokalne mikrostrukture v delu, kjer je razpoka daljša od trikratnika premera zrna, zanemariti. Duktilni materiali se pod vplivom nateznih napetosti v okolici konice razpoke plastično deformirajo, saj se tam pojavljajo koncentracije napetosti. Plastična cona, ki se pojavi ob konici razpoke spremeni napetostno in deformacijsko polje v okolici konice. Med razbremenjevalnim delom cikla se spremeni napetostno polje v okolici konice iz nateznega v tlačno, zaradi česar se pojavi manjša plastična cona v monotoni coni, ki se je tvorila med

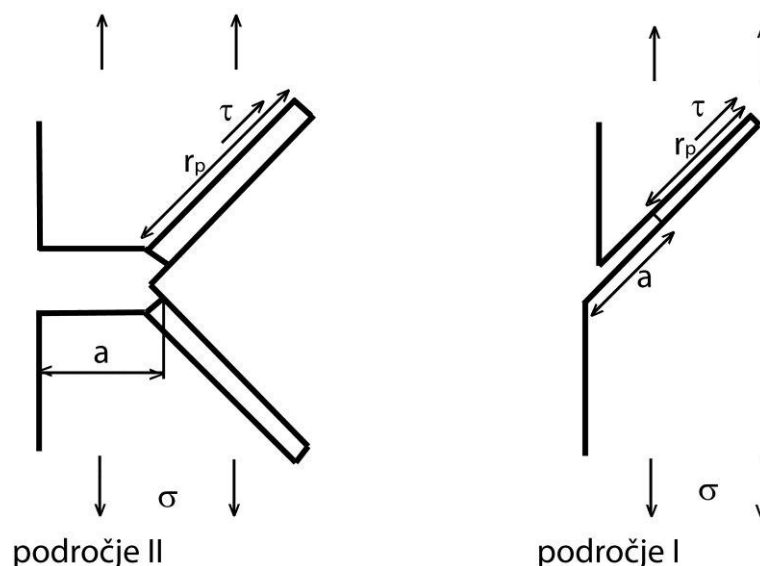
obremenitvijo. To je shematsko prikazano na sliki 16, ki predstavlja osnovo za modele rasti razpok, opisane v nadaljevanju [1, 4, 5].



Slika 2: Shematski prikaz monotone cone ter ciklične plastične cone ter pripadajoče razporeditve napetosti po razbremenitvi [1].

Napredovanje razpok je dodatno razčlenjeno še na to, po kateri ravnini razpoka napreduje. Obstajata dva mehanizma, ki imata svoje korespondenčne ravnine. Pri prvi razpoka raste po mehanizmu striga direktno pred konico razpoke, v drugem delu pa prav tako po mehanizmu striga po dveh med seboj pravokotnih si ravninah pod kotom 45° na začetno ravnino rasti razpoke. Shematsko sta področji prikazani na Sliki 3, kjer je: a -dolžina razpoke, r_p -dolžina plastične cone, τ -strižna napetost in σ -obremenitev. Prvi mehanizem se imenuje področje I, drugi pa področje II. Področje I se običajno pojavlja pri nizkih amplitudah obremenitev med cikli, področje II pa je značilno za velike amplitude obremenitev [1,13,15]. Cheng in Laird [3] sta preiskovala prehod iz področja I v področje II ter prišla do zaključkov, da se prehod pojavi zaradi utrjevanja na primarni drsni ravnini, saj le-to povzroči vklapljanje sekundarnih drsnih sistemov. Prav tako ima pomemben vpliv orientacija zrn v materialu glede na obremenitev. Če so strižne napetosti na sekundarnih sistemih večje, se bo prehod iz prvega v drugo področje zgodil pri nižjem številu ciklov.

Kot že omenjeno, so deleži utrujanja v fazi iniciacije področja I in področja II odvisni predvsem od okolice obratovanja obremenjenega materiala, samega materiala ter načina obremenjevanja. Površina razpoke, ki ostaja za rastočo konico razpoke v področju I, je fasetasta, kjer se nagibni kot rasti fasete spremeni, ko razpoka zamenja ravnino, v kateri raste. Površina razpoke v področju II je bolj valovita, kjer dolžina valov predstavlja napredovanje razpoke v enem obremenitvenem ciklu [1,13,15].



Slika 3: Oba mehanizma rasti razpok, področje I in II [1, 3].

Za ta pojav je bilo predlaganih več modelov, vendar je najbolj splošno sprejet model, ki so ga razvili Neumann [6], Pelloux [7], Vehoff in Neumann [8]. V tem modelu je upoštevano, da ima konica razpoke obliko črke V in da razpoka napreduje z izmeničnim zdrsom na obeh prej omenjenih drsni ravlinah. Ob tem je potrebno poudariti, da različni materiali za seboj puščajo različno obliko površine razpoke, ki je odvisna predvsem od materiala, okoljskih pogojev ter obremenitvenih pogojev, zaradi česar je mogoče sklepati, da bi bilo popisovanje vseh materialov z enim samim modelom oteženo, torej je potrebno rasti razpok v posameznih strojnih delih obravnavati ločeno in v okviru pogojev delovanja [1].

2.1.3. Vpliv mikrostrukture na rast razpok

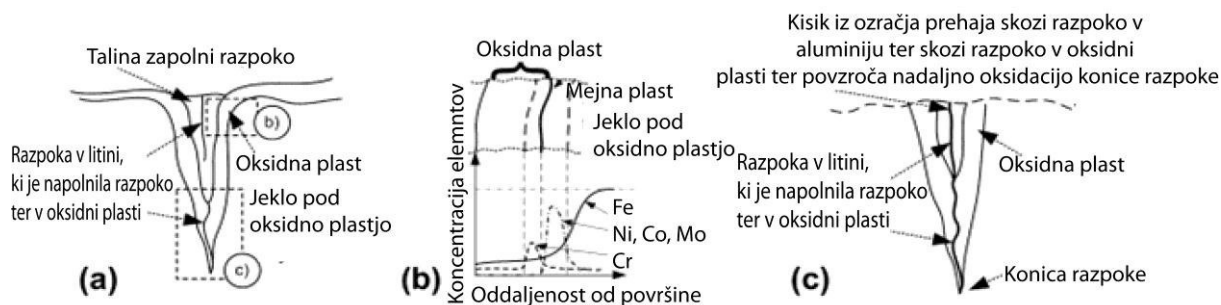
Mikrostruktura z vsemi svojimi lastnostmi, med termičnim utrujanjem lahko vpliva na hitrost napredovanja razpok. Sjöström in Bergström [9] sta objavila študijo o vplivu različnih toplotnih obdelav na termično utrujanje in prišla do naslednjih zaključkov:

- odpornost proti termičnemu utrujanju, ko je temperatura strojnega dela nad temperaturo popuščanja je mogoče povečati s povečanjem stabilnosti mikrostrukture pri povišani temperaturi. To se doseže z optimalnimi parametri izdelave jekla ter s toplotno obdelavo pri kateri dosežemo visoko topnost primarnih karbidov, zaradi česar je zavrta rast zrn;
- pri nižjih maksimalnih temperaturah ciklov je bolj pomembna visoka žilavost, pri visokih temperaturah pa je bolj pomembna odpornost proti popuščanju;
- na površini ni bilo mogoče določiti razlik v deformacijah med različno obdelanimi preizkušanci, kar pomeni, da je termično utrujanje pogojeno predvsem z maksimalno temperaturo.

Tudi Klobčar [10] je s sodelavci raziskoval vpliv mikrostrukture na napredovanje razpok. Prišel je do zaključkov, da specialno orodno jeklo z boljšo temperaturno prevodnostjo ter temperaturno stabilnostjo in z manjšim deležem silicija izkazuje višjo odpornost na termično utrujanje. Običajno orodno jeklo, AISI H13 je izkazal slabo odpornost proti termičnemu utrujanju, saj so se na površini vzorcev tvorile globoke in goste razpoke, ki so segale vse do globine razogljíčenja. Prav tako je bil v vzorcih zabeležen visok padec trdote. Nadalje, so v tej študiji prišli tudi do zaključka, da so na jeklih, ki imajo višjo trdnost, razpoke gostejše, ter da so pri jeklih, ki imajo nižjo trdnost, razpoke daljše. Tudi ostale raziskave so pokazale, da manjša vsebnost silicija vpliva na povečanje življenjske dobe orodja. Dokazano je bilo, da jekla, ki imajo v mikrostrukturi manj silicija tvorijo večjo gostoto in volumski delež manjših sekundarnih karbidov, predvsem vanadijevih karbidov (VC), ki vrh sekundarne utrditve postavijo k višjim temperaturam. To pa zato ker silicij zavira rast cementita (Fe_3C) in pospešuje sekundarne karbide že pri nižjih temperaturah, kar pa v tem primeru ni zaželeno. V primeru manjšega deleža silicija ostaja več ogljika vezanega v cementit, kjer lahko tvori večji delež majhnih sekundarnih karbidov. Odpornost proti temperaturnemu utrujanju se lahko izboljša z višjo mejo tečenja, višjo žilavostjo, toplotno prevodnostjo, manjšim temperaturnim raztežkom, mikrostrukturo (velikost zrn ter karakteristike povezane s karbidi) itd. Jekla z manjšimi segregacijami v samem kristalu ter z bolj homogeno poboljšano mikrostrukturo kažejo tudi boljšo odpornost proti termičnemu utrujanju. Potrebno pa je vedeti, da pri vsakem poboljšanju jekla oziroma s porastom trdnosti materiala hkrati znižamo žilavost, kar tudi olajša nastanek razpok [1].

2.1.4. Vpliv oksidacije na rast razpok

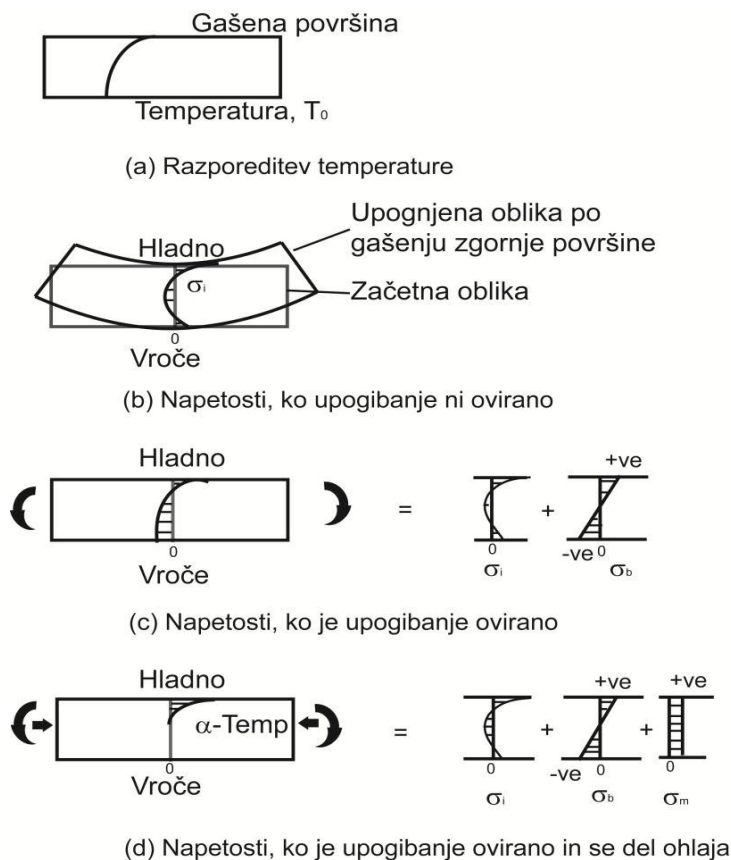
Velik vpliv na hitrost rasti razpok ima okolje v katerem obremenjevanje poteka. Najbolj natančno študijo vpliva oksida na rast razpoke je opravil Klobčar s sodelavci [11], kjer je preiskoval termične razpoke na orodjih za tlačno litje, z namenom podaljšanja življenjske dobe orodij z navarjanjem maraging jekla. Po opravljeni analizi kemijske sestave okolice razpoke so prišli do ugotovitve, da se zaradi oksidacije notranja površina razpoke prevleče z oksidno plastjo, ki ima kompleksno sestavo. Raziskava je pokazala, da se lahko oksid tvorjen na površini razdeli na tri plasti, kar prikazuje slika 4. Stene razpoke so prevlečene z oksidno plastjo, notranjost pa je napolnjena z tekočo zlitino, ki se z začetkom hlajenja strdi. Zaradi večjega temperaturnega razteznostnega koeficienta pa v strjeni zlitini ostaja dovolj prostora za migracijo kisika proti notranjosti razpoke, ko je testiran del v stiku z zrakom oziroma vodo. Zaradi površinske oksidacije razpoke ne prihaja do zapiranja razpoke med ohlajanjem, saj plast oksida, ki ima nižji razteznostni koeficient v primerjavi z jeklom to preprečuje. S tem tvori prepreko za zapiranje razpoke, hkrati pa deluje kot klin, ki v konici razpoke tudi med ohlajanjem vzdržuje natezno napetostno stanje [1].



Slika 4: Mehanizem rasti razpok zaradi prisotnosti oksidne plasti. a) razpoka na površini, b) povečan predel ob ustju razpoke, c) povečana konica razpoke [1, 11].

2.2. Temperaturno utrujanje

Za termično utrujanje je Spera [11] podal naslednjo definicijo: »Termično utrujanje je postopno poslabšanje in morebitna porušitev materiala, ki je bil izmenično izpostavljen nehomogenemu ogrevanju in ohlajanju«. Kot posledica razlik v temperaturnem polju, nastanejo lokalne deformacije na predelu materiala, ki je izpostavljen temperaturnim spremembam. Ker so deformacije delno zavrté ali pa v celoti preprečene se oblikuje napetostno polje, tlačno nateznega značaja v notranjosti materiala. Termično utrujanje se obravnava kot anizotropno nizko-ciklično obremenjevanje saj razpoke lahko začnejo nastajati že pri zelo nizkem številu ciklov [1, 3].



Slika 5: Shematski primeri napetostnih polj med variacijo temperature [1,3].

Utrujanje lahko razdelimo na tri veje [1,13,15,16]:

- termo-mehansko utrujanje,
- termo šok,
- termično utrujanje.

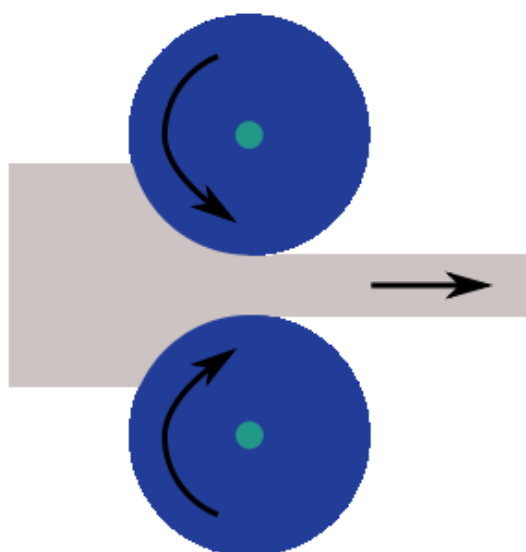
Med elemente, ki so podvrženi termičnemu spadajo: lopatice parnih turbin, orodja za vroče in toplo kovanje, valji za toplo in vroče valjanje, valji na napravah za kontinuirno litje, orodja za litje kovin itd. Pojav mreže razpok na površini materiala, katerih rast lahko vodi do popolne porušitve materiala je značilen za termično utrujanje.

Bistveni faktorji, ki vplivajo na poslabšanje lastnosti zaradi termičnega utrujanja so [22]:

- parametri procesa: temperaturni gradient, napetostno polje, amplituda temperaturnih ciklov, frekvenca ciklov, maksimalna temperatura cikla itd. ;
- parametri materiala: fizikalne lastnosti (meja tečenja, koeficient temperaturne razteznosti, toplotna prevodnost, difuzija, nabiranje nečistoč v razpokah med utrujanjem, oksidacija razpok), mikrostruktura materialov (velikost zrn, meje zrn, napake v materialu, percipitaci), mikrostrukturne spremembe v temperaturnem intervalu cikla (mehčanje, staranje, oksidacija, fazne transformacije);
- različne mehanske in termične lastnosti v primerih večplastnih sistemov: zaradi razlik v koeficientih temperaturnega raztezanja prihaja do koncentracij napetosti na faznih mejah, kar lahko povzroči luščenje ali pospešeno rast razpok.

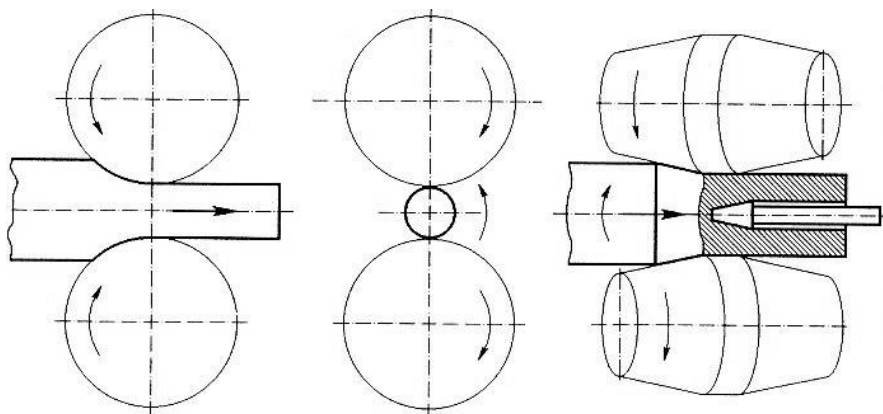
2.3. Valjanje

Valjanje je postopek plastičnega preoblikovanja kovine pri katerem se liti blok (ingot) zavalja med dva rotirajoča valja. Pri tem se doseže redukcija preseka ingota ter istočasno poboljšanje mehanskih lastnosti. Od vseh postopkov plastične deformacije se ravno pri valjanju doseže največje stopnje deformacije [12].



Slika 6: Prikaz vzdolžnega valjanja [12].

Glede na kinematiko ločimo vzdolžno valjanje, ki je tudi najbolj razširjeno saj s tem postopkom zvaljamo 90 % vseh valjanih izdelkov (polizdelkov), prečno in poševno valjanje [13].



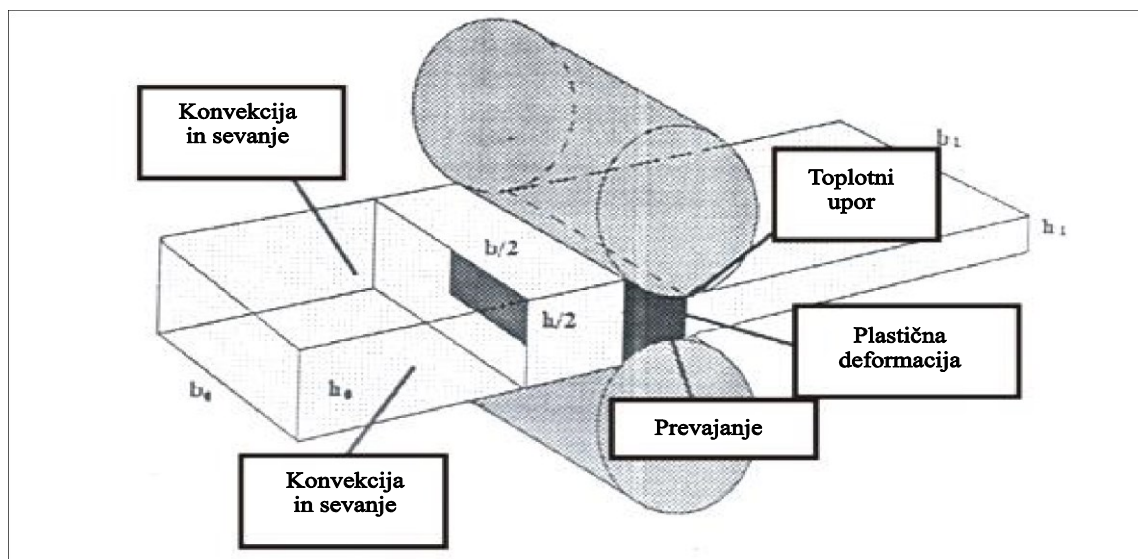
Slika 7: Vzdolžno, prečno in poševno valjanje [13].

2.3.1. Temperatura valjanja

Valja se lahko v vročem ali hladnem stanju. Temperatura pri vročem valjanju presega temperaturo dinamične rekristalizacije materiala. Materiali večjih presekov se valjajo predvsem v vročem stanju zaradi večje plastičnosti in možnosti veliko večjih redukcij preseka, manjših sil ter stroškov valjanja. Materiali manjših presekov pa se valjajo v hladnem stanju saj se s tem doseže bolj gladka končna površina, ožje tolerance ter večja deformacijska utrditev saj ni prisotnih procesov mehčanja. Temperature valjancev pri vročem valjanju jekla se gibljejo nekje med 850°C in 1250°C. Valjancu se med valjanjem povečuje preoblikovalna trdnost saj pride do različnih odvodov toplote in se posledično močno ohlaja. Pri vročem valjanju so glavni odvodi toplote zaradi [13]:

- sevanja in konvekcije valjanca v okolico;
- prevajanja toplote iz valjanca na valje;
- prevajanje toplote iz valjanca na valjčno progo;
- odvodov toplote zaradi odbrizgavanja škaje, hladilne vode za valje, emulzij, ...ipd.

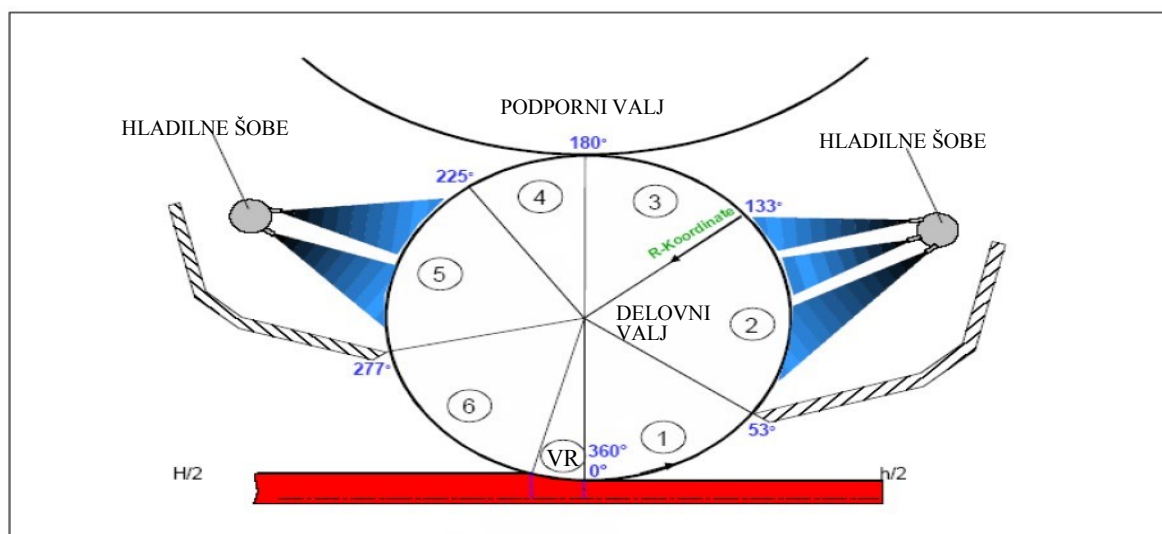
Zaradi deformacijske energije, ki se spremeni v toploto, trenja med površino valjanca in valjev ter trenja med delovnimi in podpornimi valji, pride tudi do dovoda toplote [13].



Slika 8: Mehanizmi prenosa toplote pri vročem valjanju [14].

2.3.2. Temperatura valjev

Predvsem površina delovnih valjev je tista, ki je najbolj izpostavljena cikličnim spremembam temperature pri vročem valjanju. Na sliki 9 so prikazani pogoji, ki jim je izpostavljen valj med vročim valjanjem. V času, ko je valj v stiku z vročim valjancem, se le ta intenzivno ogreva. Sledi ohlajanje z vodnimi prhami. Hitro spreminjanje temperature na površini valja povzroči zelo visoke termične napetosti, ki lahko tudi presežejo mejo tečenja izbranega materiala valjev. V enem obratu se lahko površina valjev ogreje s temperature okolice celo na 700 °C. Valji so med svojim delovanjem izpostavljeni tudi mehanskim cikličnim obremenitvam, kar rezultira k poškodbam valjev zaradi mehanskega in termičnega utrujanja materiala. Razpoke so najbolj pogosta oblika poškodb [13].

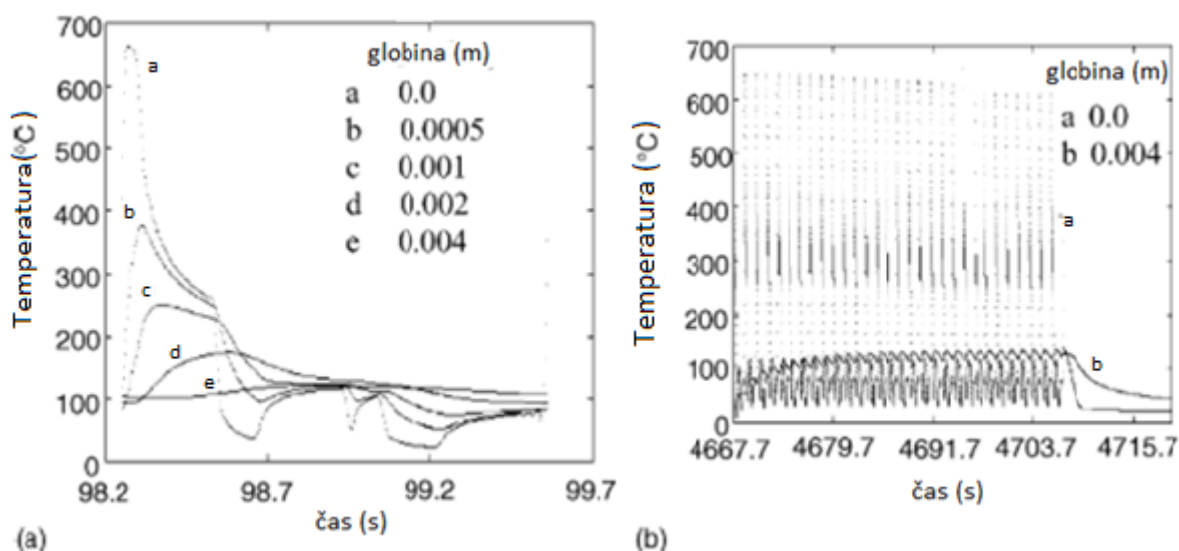


Slika 9: Delovni pogoji, ki jim je valj izpostavljen, (1, 2, 3, 4) ohlajanje na zraku, (2, 5) hlajenje z vodnimi prhami, (VR) ogrevanje valja v valjčni reži [13].

2.3.3. Obremenitve na valjih

2.3.3.1. Temperaturne obremenitve

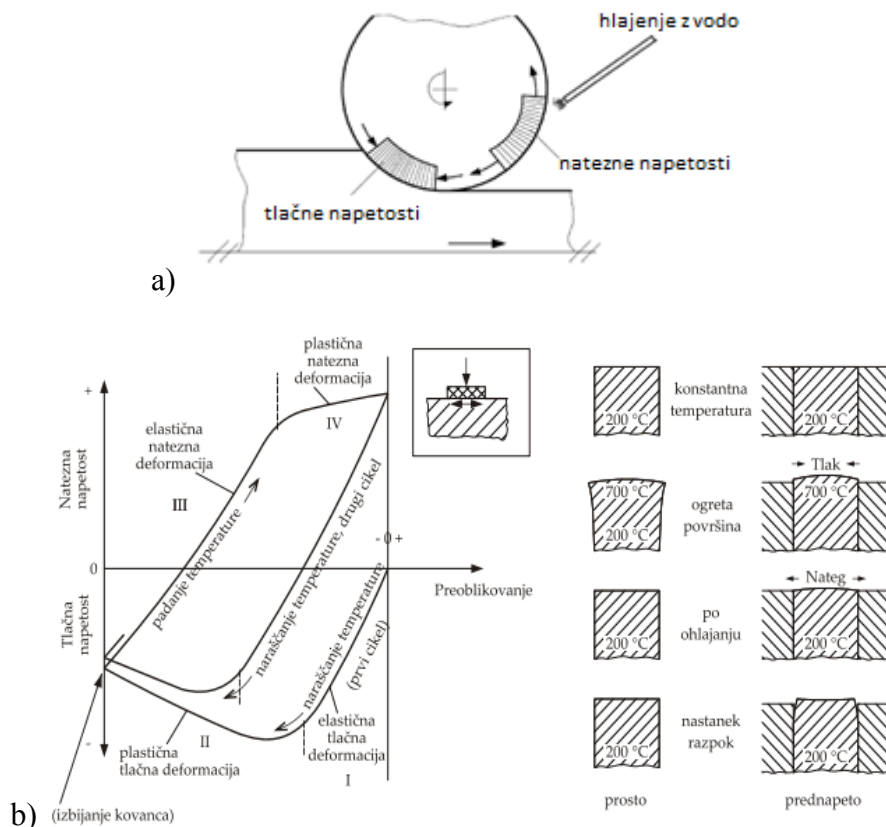
Pri valjih za delo v vročem se na površinski plasti vzpostavi časovno in lokalno spreminjajoče temperaturno polje. V času, ko je opazovana točka na valju v stiku z vročim preoblikovancem, lahko temperature narastejo tudi nad temperaturo popuščanja osnovnega materiala.



Slika 10: Potek temperature na površini valja: a) pri enem ciklu, b) v daljšem časovnem obdobju [15].

Na površini se pri tem ustvarijo tlačne napetosti, ki lahko presegajo mejo tečenja materiala valjev, zato se površina tlačno plastično deformira. Ko opazovana točka ni več v stiku z vročim preoblikovancem, zaradi odvajanja toplote v notranjost ter sevanja in konvekcije temperatura pade. V nadaljevanju v tej točki temperatura lahko pade tudi pod osnovno temperaturo valjev zaradi hlajenja z mazalnimi sredstvi, kar rezultira k pojavu nateznih napetosti na površini valja, katere lahko pri visokih temperaturnih gradientih presežejo mejo tečenja materiala valjev kar pomeni, da se površinaska plast valjev natežno plastično deformira. Na Sliki 11a je shematsko prikazano nastajanje tlačnih in nateznih deformacij glede na položaj valja, na Sliki 11b pa je shematsko prikazan diagram omenjenih tlačnih in nateznih deformacij. Zaradi ponavljajočih se tlačno nateznih deformacijskih stanj na površini valja nastanejo razpoke. Poznamo tri vrste termičnih obremenitev [15]:

- trajno termično utrujanje, ki je posledica visoke osnovne temperature orodja;
- kratkotrajne temperaturne obremenitve, ki nastane med kontaktnim časom (temperaturno utrujanje);
- temperaturni šok.



Slika 11: Nastanek tlačnih oz. nateznih napetosti na valju glede na njegov položaj in b) Shematski prikaz tlačnih in nateznih deformacij na površini valja [16].

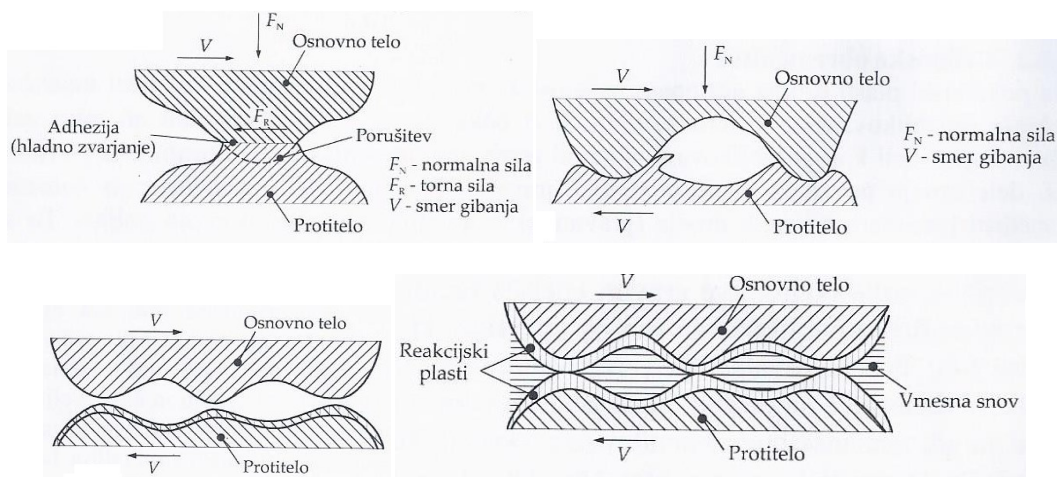
2.3.3.2. Mehanske obremenitve

Na splošno so mehanske obremenitve na orodjih odvisne predvsem od namembnosti orodja. Pri valjanju so tako kot pri kovanju dosti večje kot pri litju. Na površini valjev se lahko pojavijo napetosti, ki nekajkrat presegajo napetost tečenja preoblikovanega materiala. Na valjih zaradi mehanskih obremenitev prihaja do trajnostnih lomov, pri katerih se razpoke širijo dlje časa ali trenutnih lomov pri katerih se material poruši nemudoma. Boljše konstrukcije orodij, boljše načrtovanje preoblikovalnih stopenj, predgrevanje orodij ter boljša tehnološka disciplina pripomorejo k temu, da danes mehanske razpoke niso več tako pogost razlog za nastanek lomov kot včasih [16].

2.3.3.3. Tribološke obremenitve

Tribologija je interdisciplinarno področje, ki se ukvarja s trenjem, obrabo, procesi na stični površini dveh teles v relativnem gibanju in mazanjem. Pod tribološke obremenitve na orodjih razumemo obremenitve na orodju in preoblikovancu zaradi njunega medsebojnega relativnega gibanja obeh teles z upoštevanjem vpliva mazalnih sredstev. Posledično pride do obrabe. Poznani so štirje osnovni mehanizmi obrabe. Hladno zvarjenje delcev na površini med orodjem in preoblikovancem ter naknadna ločitev izven ravnine zvara se imenuje adhezija.

Abrazija je mehanizem obrabe, ki ga najenostavneje opišemo kot praskanje (trše telo dela raze po mehkejšem). Degradacija ali utrujanje površine je mehanizem obrabe pri katerem zaradi kombinacije cikličnih termomehanskih obremenitev pride do nastanka mreže razpok in posledično do luščenja materiala. Kemične reakcije, ki so aktivirane s pomočjo tribološkega obremenjevanja (npr. trenje), se imenujejo tribokemične reakcije in predstavljajo četrti mehanizem obrabe [16].



Slika 12: a) Adhezija, b) Abrazija, c) Degradacija površine, d) Tribokemične reakcije [16].

2.3.3.4. Kemične obremenitve

Kemična reaktivnost predvsem na površinski plasti orodja narašča s temperaturo. Tako prihaja do kemičnih reakcij, predvsem do oksidacije ter reakcij z aditivi v vmesni plasti. Najpogostejši reakcijski produkti so oksidne plasti, ki se zaradi delovanja napetosti lahko razgradijo, bolj pa so nagnjene k luščenju od površine orodja, kar prispeva k obrabi materiala [15].

2.3.4. Poškodbe na valjih in orodjih

Poškodbe na valjih lahko razdelimo na več skupin [17]:

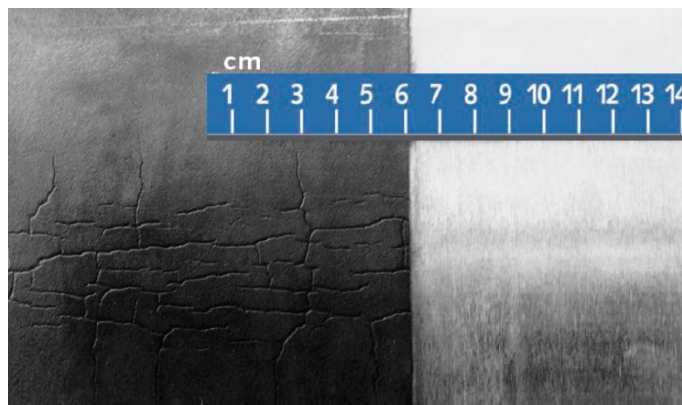
- odkruški in luščenje,
- termične razpoke,
- mehanske poškodbe (zlomi).

Skupino poškodb, ki so povezane s termičnimi razpokami lahko razdelimo na naslednje razpoke [17]:

- Trakaste termične razpoke

Nastanejo na površini valja, ki je v kontaktu s trakom. Videz razpok je po navadi mozaičen, sama mreža razpok pa je večja kot pri klasičnih termično utrujenostnih razpokah. Do trakastih razpok pride v primeru zastoja valjalnega stroja. Kontaktni čas valja z vročim

preoblikovancem je veliko daljši. Temperatura valja se na področju kontakta naglo poviša in se zaradi prevoda toplote prenese globlje v notranjost valja. Pri tem temperaturne napetosti presežejo mejo tečenja materiala valjev. Ko se odpravi zastoj je potrebno valje dvigniti, pri tem se začne površina valjev intenzivno ohlajati ter zaradi krčenja med ohlajanjem pokati.

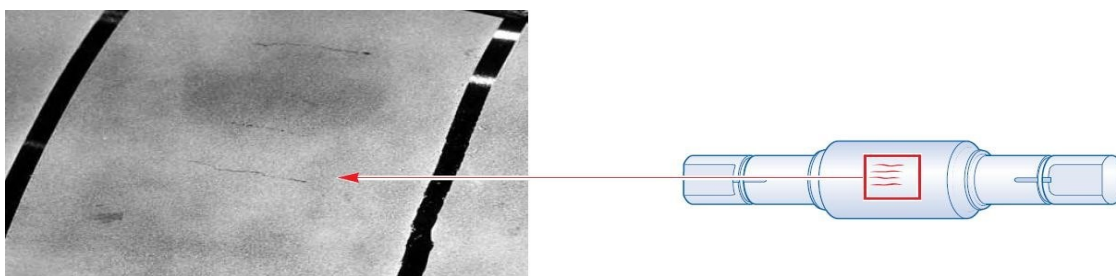


Slika 13: Trakaste termične razpoke na valjih za vroče valjanje [17].

Trakaste razpoke se lahko prepreči tako, da se prepreči zastoj valjalnega stroja. Če vseeno pride do zastoja je potrebno valje čim hitreje dvigniti in ustaviti hladilni sistem. Po odstranitvi valjanca, se valjev ne sme prisilno hladiti, ker lahko nastanejo še večje razpoke. Valjem je potrebno pustiti čas, da se temperatura na površini izenači. Hladilni sistem se lahko vklopi, ko je temperatura na površini približno izenačena.

➤ Lestvičaste termične razpoke

Pojavljajo se v omejenem pasu po obodu valja, so longitudinalno orijentirane ter napredujejo v radialni smeri. Nastajajo lahko zaradi pomanjkljivega hlajenja, kar je lahko posledica zamašene šobe. V tem primeru so zaradi globljega penetriranja toplote v valj razpoke globlje kot po navadi. Z rednim preverjanjem hladilnega sistema ter nadzorovanjem volumna in tlaka vode lahko lestvičaste termične razpoke preprečimo.

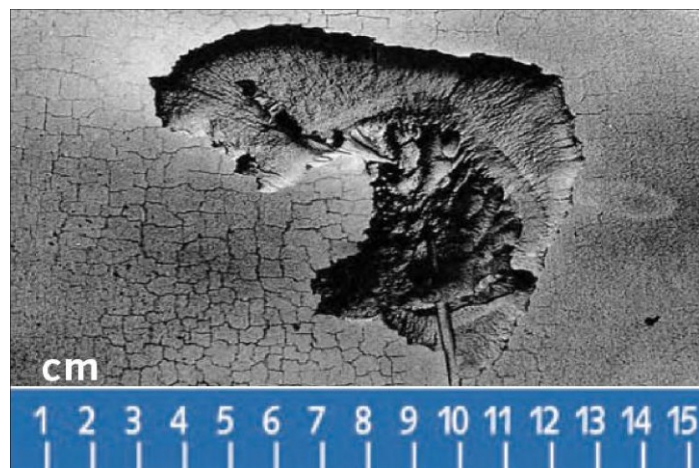


Slika 14: Lestvičaste termične razpoke [17].

➤ Lokalizirane termične razpoke

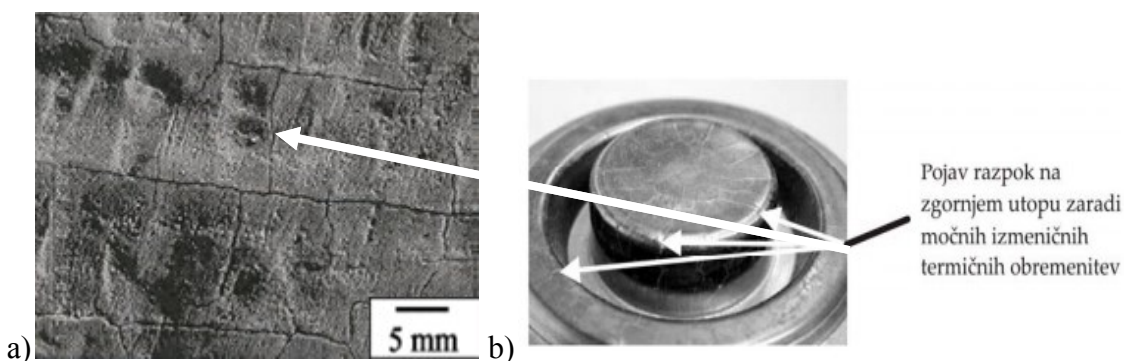
Lokalizirane termične razpoke po navadi nastanejo v povezavi z lokalnimi odkruški ter izpadi materiala. Zaradi kombinacije ekstremnih termomehanskih napetosti, ki lahko na lokalnem področju presežejo napetost tečenja materiala, nastanejo lokalizirane termične razpoke, katerih rast se z dodatnim ohlajanjem še pospeši. Različni izredni dogodki med valjanjem, kot

so: poškodbe ob udarcih, lepljenje valjanca, gubanje traku pri glavi in nogi, lahko privedejo do takšne poškodbe. Kombinacija termičnih razpok in razpok nastalih zaradi mehanskih obremenitev naredi to poškodbo zelo nevarno, saj se lahko nadaljuje v utrujanje v traku ali takojšnji izpad. Takim poškodbam se da izogniti tako, da se prepreči izredne dogodke med valjanjem z izboljšanimi pogoji valjanja. Pri prvih znakih poškodbe je treba valje podrobneje pregledati ter po potrebi postružiti [17].



Slika 15: Lokalizirane termične razpoke v kombinaciji z odkruški [17].

Tako kot pri valjih so tudi pri orodjih delovne površine izpostavljene visokim mehanskim, tribološkim in kemičnim obremenitvam, orodja za delo v vročem pa še temperaturnim obremenitvam. Poškodbe kot so obraba, termične razpoke, mehanske razpoke, zlomi ter lezenje so posledica ponavljajočih se delovnih ciklov. Velik vpliv na zmanjšanje nastanka poškodb ima tudi mazalno sredstvo, ki ne zmanjša le trenja, temveč zagotovi manjši prenos toplote, loči površino orodja od preoblikovanca ter hladi površino orodja [15]. Na sliki 16 vidimo razpoke na površini orodja za vroče kovanje, ki so nastale kot posledica termomehanskih obremenitev [15].



Slika 16: a) Mreža temperaturnih razpok na površini orodja za vroče kovanje, b) nastale razpoke na robvih gravure orodja za vroče kovanje [15].

2.4. Valji

2.4.1. Način proizvodnje

Možnih je več načinov za proizvodnjo valjev. Ulivanje, kovanje, centrifugalno litje so eni izmed bolj pogostih načinov. Postopek centrifugalnega litja se navado uporablja za proizvodnjo valjev za ploščato valjanje, prav tako se lahko uporablja centrifugalno litje za izdelavo valjev za profilne valjarne. Večina valjev za univerzalna ogrodja je danes izdelanih po tem postopku. Profilni valji za težke konstrukcije zahtevajo tako globoke žlebove, da se uporabno plast lahko doseže le z enkratnim litjem. Pri profilnih valjih za zaključne prevleke so plašči naprešani, prilepljeni ali nakrčeni na gred. Za profilne valje se lahko uporabljajo kovani ali kompozitni plašči s katerimi je mogoče izboljšati obrabno obstojnost delovne površine ter istočasno tudi odpornost sredine valja proti prelomu [18, 19].

Valji za vroče valjanje pločevine se ulivajo po postopku centrifugalnega litja, kjer se najprej ulije plašč po tem omenjenem postopku in nato v plašč še jedro valja po postopku klasičnega litja. Zagotovitev pravilnega razmerja med trdnostjo ter duktilnostjo je zelo pomemben dejavnik za kvalitetno izdelavo valjev. To razmerje se lahko doseže z ustrezno toplotno obdelavo. Valji morajo biti toplotno obdelani tudi z namenom zmanjšanja segregacij in doseganja visoke zahtevane lastnosti površine. Odlična kvaliteta se doseže z martenzitno/bainitnim površinskim utrjevanjem, kateremu potem sledi še več žarilnih postopkov. Predvsem pri jeklenih valjih se lahko uporabi toplotna obdelava imenovana poboljšanje. Sestavljena je iz kaljenja, pri katerem se doseže visoka trdota zaradi martenzitne mikrostrukture ter nizka duktilnost, ter popuščanja. Nizka duktilnost je razlog, da se kaljeno jeklo popušča in se na račun znižanja trdote doseže večja duktilnost.

2.4.2. Materiali valjev

Vrste valjev za vroče valjanje pločevine [17]:

- HCI (High Chrome Iron) - valji iz litega železa z visokim deležom kroma;
- HCS (High Chrome Steel) – jekleni valji z visokim deležom kroma;
- HSS (High Speed Steel) valji iz hitroreznega jekla;
- ICI (Indefinite Chill Iron) valji z nedoločeno trdo plastjo.

Materiale za valje lahko razdelimo na dve glavni skupini, litoželezne ter jeklene valje. Litoželezne valje, katerih lastnosti sta krhkost in visoka obrabna obstojnost se pogosto uporablja na zaključnih ogroddjih. Jekleni valji, katerih lastnosti so višji koeficient trenja v primerjavi z litimi (rezultira k boljši zagrabitvi), višja trdnost zaradi katere lahko prenesejo večje upogibne in torzijske napetosti ter enakomerna trdnost do zadostne globine, se uporabljajo na primarnih in sekundarnih ogroddjih.



Slika 17: Razdelitev materialov za valje glede na strukturo delovnih plasti [18, 19].

Glavni legirni elementi jeklenih oz. litih valjev so ogljik (od 0,3 do 3,8 %), silicij (od 0,2 do 2,5 %), mangan (do 2,5%), krom (do 30 %), nikelj (do 5%), nikelj (do 4 %). V manjših količinah se kot legirni elementi pojavljajo tudi fosfor, žveplo, vanadij, volfram, niobij in titan [18, 19].

2.4.3. Mikrostruktura valjev

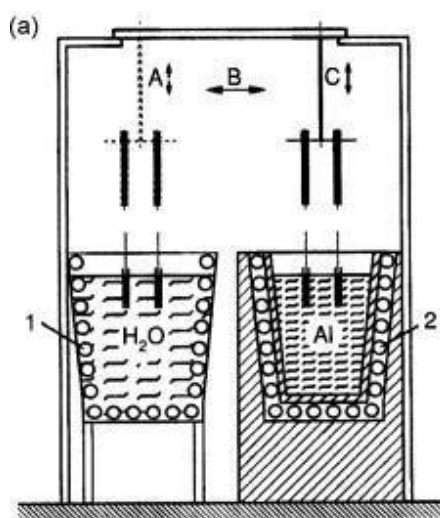
Kemijska sestava ter toplotna obdelava odločilno vplivata na mikrostrukturo valjev, tako na matrico, ki je lahko perlitna, martenzitna ali avstenitna, kot na delež, velikost ter porazdelitev karbidov/cementita ter grafita. Najpogosteje uporabljena sestava plašča je martenzitno/bainitna osnova. Jedro pa je iz feritno/ perlitne nodularne sive litine. Karbidi tipa $MxCy$ predstavljajo velik del mikrostrukture valjev zato sta njihova porazdelitev ter delež zelo pomembna dejavnika za dobre lastnosti valjev. K abrazijski odpornosti pri sobni temperaturi ter izjemni obrabni obstojnosti pri povišani temperaturi zelo pripomore cementit medtem, ko grafit bodisi lamelasti ali kroglasti v splošnem izboljša sposobnost ohlajanja

zaradi česar so valji manj občutljivi na utrujenostne razpoke ter zmanjša trenje v konstrukciji. Vrsta matrice ter dispergirane faze, trdota pri povišani (delovni) temperaturi in delež intersticijsko raztopljenega ogljika ali dušika so najpomembnejši parametri, ki vplivajo na obrabno obstojnost jekel. Termo šoki ter posledično temperaturno utrujanje, povzročajo na valjih razpoke. Od toplotne prevodnosti, termičnega raztezka, natezne trdnosti, duktilnosti ter mikrostrukture je odvisna občutljivost valjev na razpoke [17].

2.5. Testi termičnega utrujanja

V literaturi je mogoče zaslediti več različnih testov za termično utrujanje. Med seboj se razlikujejo po načinu ogrevanja in ohlajanja ter posledično generiranem temperaturnem polju, natančnosti ocene temperaturnega polja, vpetosti v orodje, generiranih napetostih in deformacijah, uporabljenih parametrih testiranja, možnosti variiranja testnih parametrov, ponovljivosti in kontrole relevantnih parametrov, itd. Natančno poznavanje in vodenje vseh teh testnih parametrov je ključnega pomena za dobro selektivno sposobnost testa.

Klobčar s sodelavci je za ogrevanje preizkušanca uporabil metodo izmeničnega potapljanja v talino aluminija ter v hladilno sredstvo. S tem so ustvarili zelo podobne pogoje, ki so primerljivi pogojem pri tlačnem litju aluminija. Pojavil se je problem natančnega prepoznavanja temperature zaradi lepljenja aluminija na vzorec. Test je zaradi dolgih ciklov zamuden ter zaradi kompleksnosti zahteva stalno prisotnost operaterja [10].



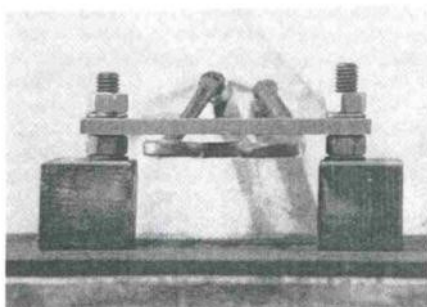
Slika 18: Shema naprave za testiranje termičnega utrujanja z izmeničnim potapljanjem v aluminij in vodo [10].

Leta 1991 sta Shen-Chin Lee in Lin-Chao Weng razvila test utrujanja s termo šoki, kjer se za ogrevanje uporablja indukcijsko tuljavo, vzorec pa je vpet med dva vijaka. Preizkušaneec je bil ogret na $820\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, nato pa gašen z vodno šobo z iste strani kot je bil ogrevan. Preizkušanci so imeli zarezo, ki je služila kot iniciator razpoke. Temperatura se je merila z optičnim pirometrom.

Slabosti testa [20]:

- nenatančno določeno ter zelo variabilno temperaturno polje;
- velika odstopanja pri maksimalni temperaturi;
- vzorec toga vpet zato ne ponuja možnosti termomehanskega utrujanja;
- meritve temperature na osnovi sevanja so manj natančne zaradi spremembe sevalnega koeficienta tekom testiranja.

Pomemben zaključek te raziskave je bila ugotovitev, da se z zmanjšanjem linearnega razteznostnega koeficienta močno poveča odpornost proti termičnemu utrujanju [20].

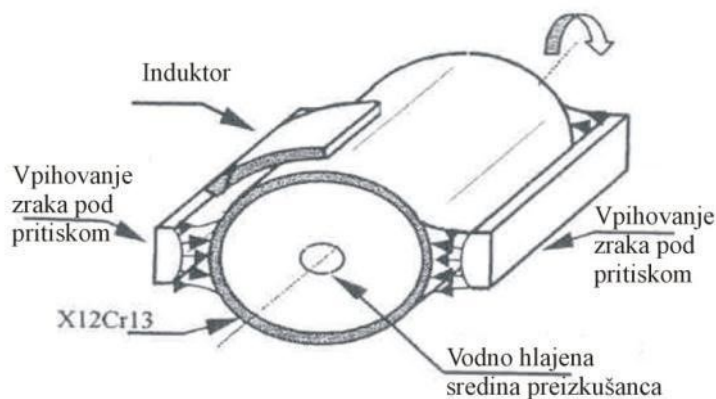


Slika 19: Naprava za termično utrujanje, ki sta jo uporabila Shen-Chin Lee in Lin-Chao Weng [20].

Leta 2000 so P. Revel, V. Bogard, D. Kircher predstavili test za termično utrujanje površine valjev. Valj je bil ogret z induktorjem, površina hlajena z stisnjenim zrakom, sredina pa s tekočo vodo.

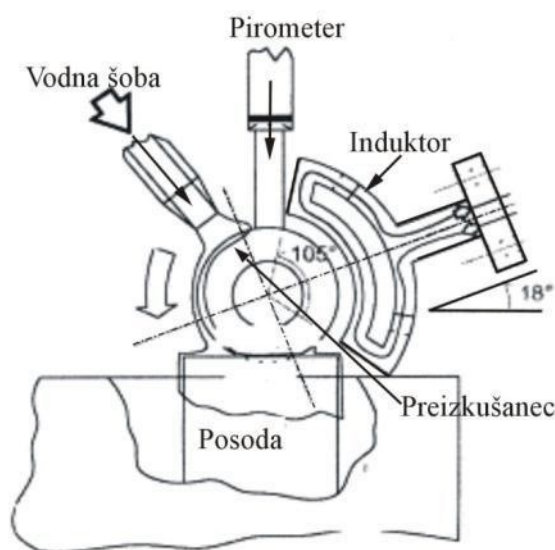
Slabosti testa [21]:

- merjenje temperature s pirometrom (enaki problemi kot pri testu po Shen-Chin Lee in Lin-Chao Weng);
- termoelementi nameščeni na pozicijah 2,5,17 in 21 mm od površine dajejo premalo natančne podatke o temperaturnem polju.



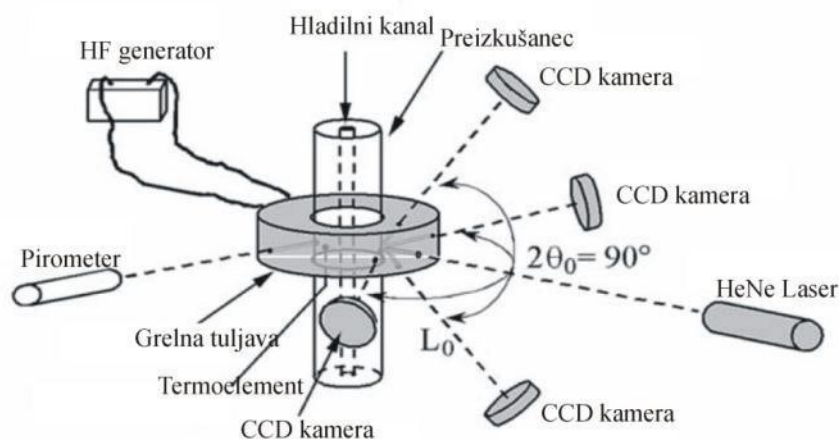
Slika 20: Shema naprave za termično utrujanje, ki so jo uporabili P. Revel, V. Bogard, D. Kircher [21].

M. Pellizzari, A. Molinari in G. Strafellini so leta 2001 razvili test pri katerem so površino valja ogrevali induktivno ter hladili z vodo, temperaturo površine pa so merili s pirometrom. Slabost testa je merjenje temperature na osnovi sevanja, prav tako pa ni znana temperatura površine preizkušanca v trenutku gašenja z vodo, kar onemogoča natančno določitev temperaturnega gradienta. Preizkušanci so bili izdelani iz jekla AISI H11, ki je bilo predhodno toplotno obdelano, površinsko plast pa so predhodno oplemenitili s postopki nitridiranja, nanašanja PVD CrN in ZrN ter nanosom obeh prevlek skupaj. Ugotovili so, da so nitridirani materiali bolj odporni na utrujanje, saj so razpoke lokalizirane na nitridirano plast. Spojinska plast, ki pri nitridiranju nastane mora imeti enofazno sestavo Fe_4N ali Fe_{2-3}N , saj to zvišuje duktilnost v primerjavi z večfazno sestavo. Pomembno je tudi, da debelina spojinske plasti ne preseže debeline $12\text{ }\mu\text{m}$, ker v nasprotnem primeru pride do luščenja [22].



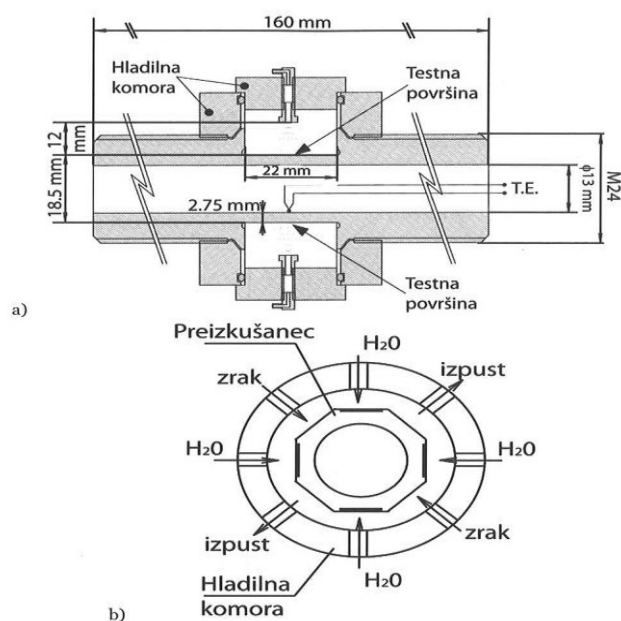
Slika 21: Naprava za termično utrujanje, ki so jo uporabili M. Pellizzari, A. Molinari in G. Strafellini [22].

A. Persson, S. Hogmark ter J. Bergström so leta 2004 razvili test na osnovi induktivnega ogrevanja površine palice na višje in visoke temperature ter s sredinskim hlajenjem z vodo, ki sodi med najbolj pogosto uporabljene teste v literaturi. Zaradi težav z določitvijo temperaturnega polja so leta 2005 naredili izboljšavo testa. Notranjost vzorca so hladili z vodo, zunanjo stran pa z zrakom ali argonom. Temperaturni cikel je bil voden tako, da so hitro ogreli na maksimalno temperaturo, nekaj časa držali na tej temperaturi, nato pa hladili na sobno temperaturo. Temperatura na površini je bila merjena s pirometrom in termoelementom, ki je bil privarjen na zunanjo površino. Temperatura je bila dobro merjena le na površini, kar onemogoča dobro določitev temperaturnega polja v vzorcu. Nastale napetosti so merili s pomočjo laserja in CCD sprejemnikov. Razpoke so imele mrežasto strukturo, kar je po izgledu precej dober približek realnemu stanju [23].



Slika 22: Naprava za termično utrujanje, ki so jo uporabili A. Persson, S. Hogmark ter J. Bergström [23].

Fazarinc je s sodelavci razvil test, ki omogoča tudi mehansko utrujanje in je nadgradnja ostalih testov. Izvaja se na napravi Gleeble 1500D. Osemkotni votli preizkušaneec omogoča testiranje štirih različnih materialov hkrati. Okoli preizkušaneca je izdelana komora za kontrolirano hlajenje površine. Termoelementi so nameščeni na notranji strani preizkušaneca in so privarjeni na različnih razdaljah od površine. Zadnji termoelement je vodilni in je privarjen na notranji del preizkušaneca, kar omogoča natančnejše vodenje temperature, ker na notranji strani ni vpliva oksidacije. Prednost tega testa pa so tudi velika gostota zajema podatkov, merjenje na štirih različnih površinah, možnost variacije geometrije preizkušaneca ter še nekaj drugih [24].



Slika 23: Shematski prikaz preizkušaneca s hladilno komoro. a) Vz dolžni presek, b) Prečni presek [24].

3. EKSPERIMENTALNI DEL

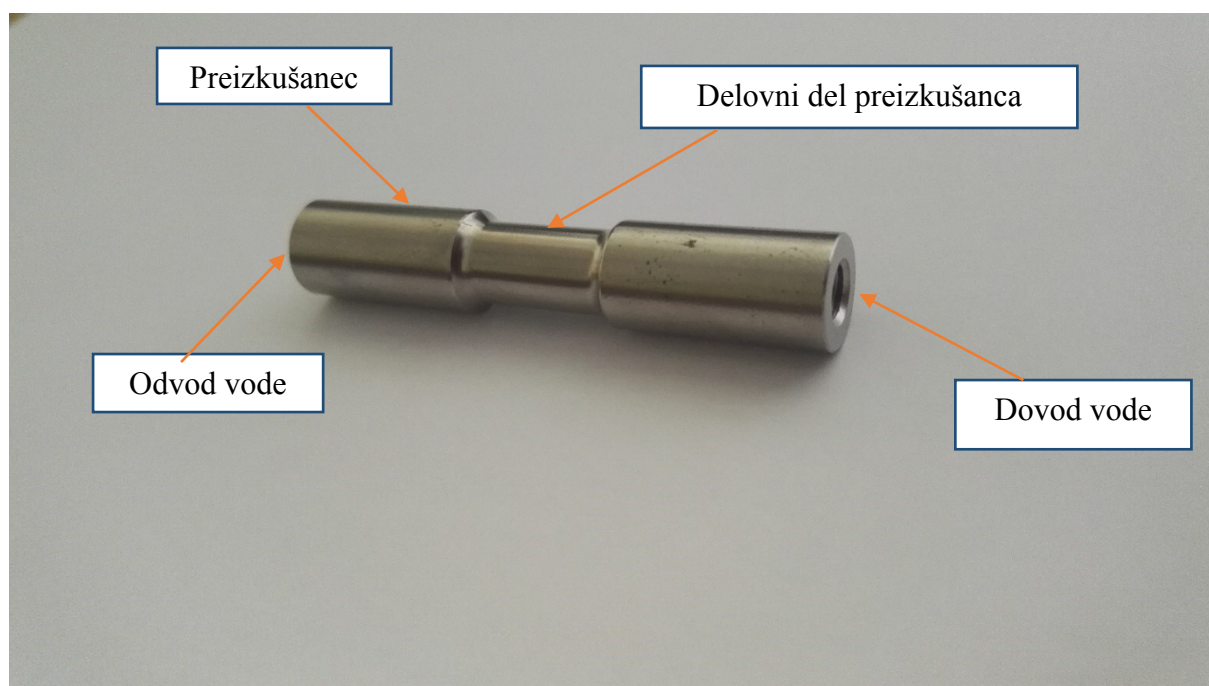
3.1. Uporabljeni material in preizkušane

V eksperimentalnem delu smo testirali odpornost materiala valjev za delo v vročem, s kemično sestavo podano v tabeli 1., na temperaturno utrujanje.

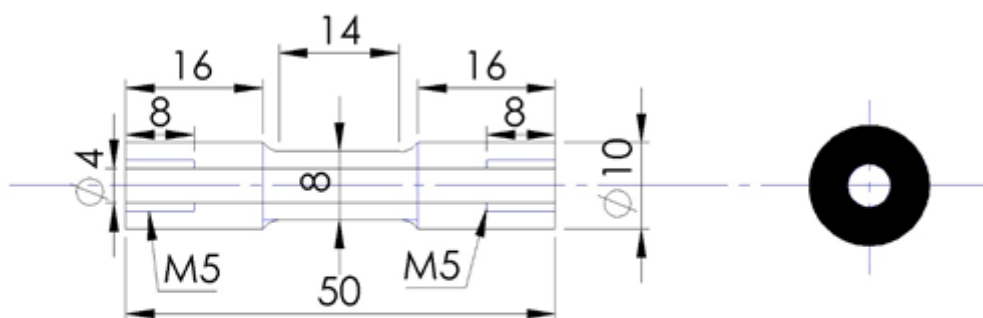
Tabela 1: Kemična sestava materiala valjev za delo v vročem v mas. %.

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Co	Ni	S	P	B	N
Mas. %	1.65	0.654	0.732	11,279	1.169	0.253	0.017	1.940	0.009	0.017	0.011	0.046

Preizkušane je v obliki valja s sredinskim ožjim presekom. V osni smeri je preizkušane votel saj je s tem omogočeno notranje hlajenje z vodo in zrakom (Slika 24-25). Na sredini preizkušanca je privarjen termoelement tipa K.



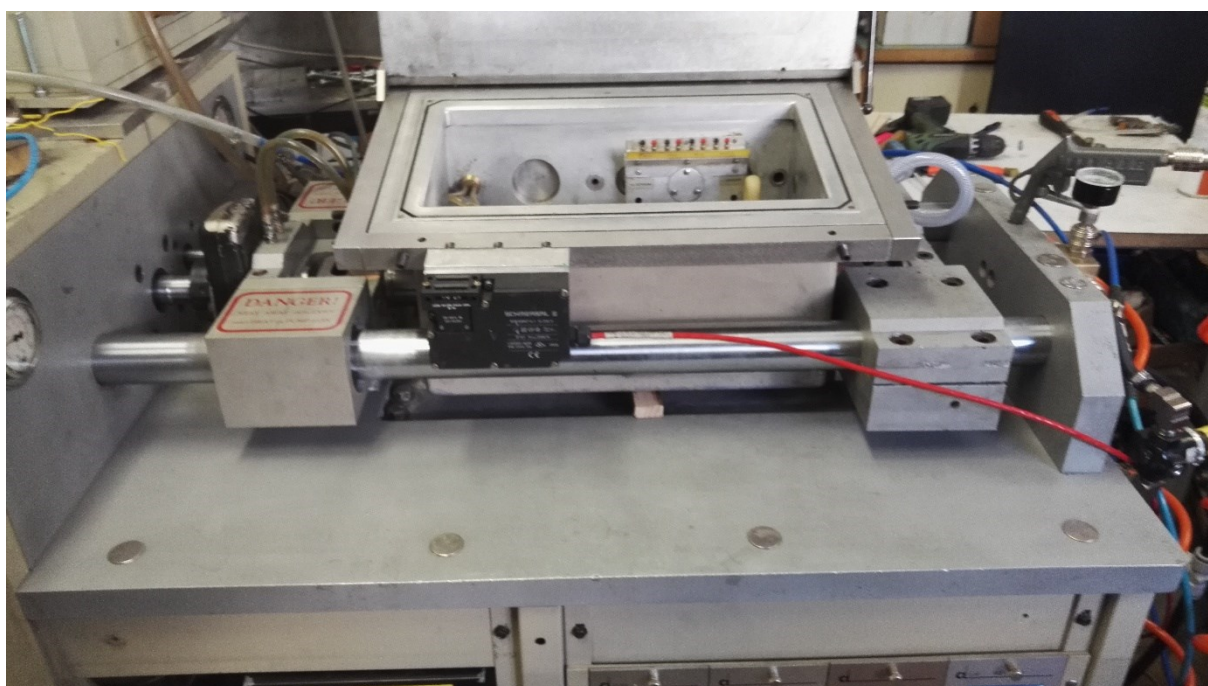
Slika 24: Preizkušane.



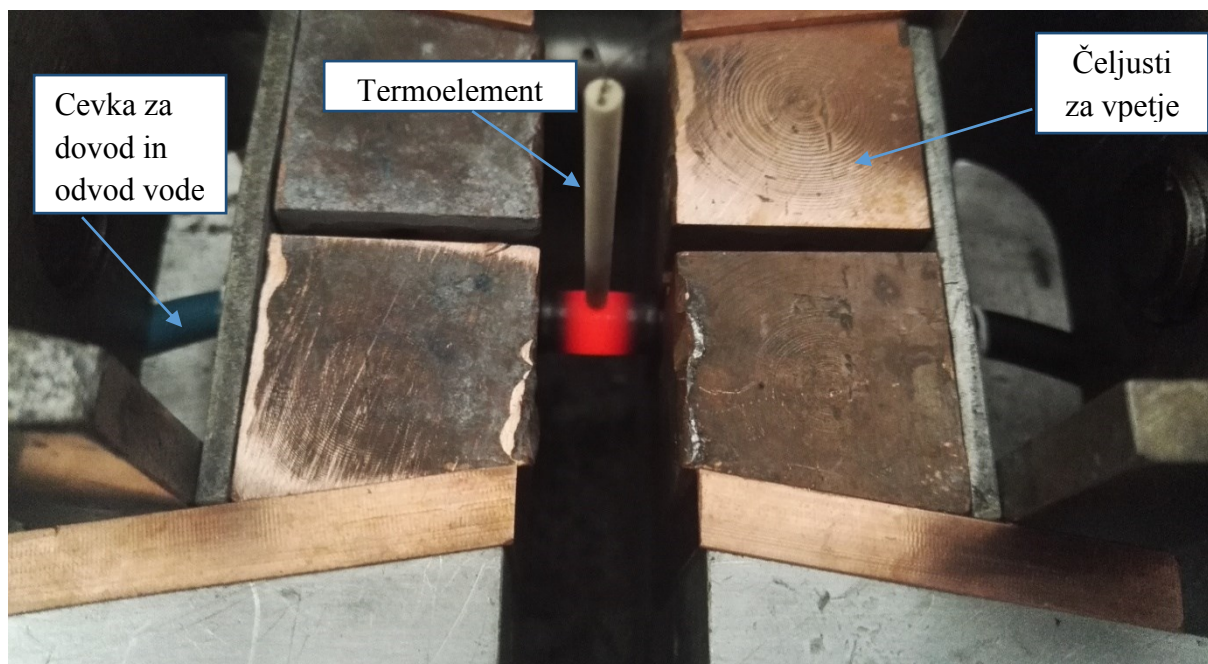
Slika 25: Dimenzije preizkušanca.

3.2. Opis testa temperaturnega utrujanja

Testi temperaturnega utrujanja so bili izvedeni na napravi Gleeble 1500D (Slika 26). Vzorec je bil vpet med bakrene čeljusti (Slika 27) pri čemer se je ogreval ter ohlajal po predpisanem programu (Slika 28).



Slika 26: Delovna celica naprave Gleeble 1500D



Slika 27: Preizkušanec vpet v čeljusti ter segret na testno temperaturo.

Naš namen je bil doseči pogoje, s katerimi bi se čim bolj približali pogojem pri vročem valjanju. V ta namen smo v programu za izvajanje preizkusa nastavili naslednje pogoje:

- čas ogrevanja: 2 s;
- čas zadržanja na temperaturi preizkušanja: 0,2 s;
- čas ohlajanja z vodo: 0,5 s;
- čas ohlajanja oz. izpihovanje vode iz preizkušanca z zrakom: 0,5 s;

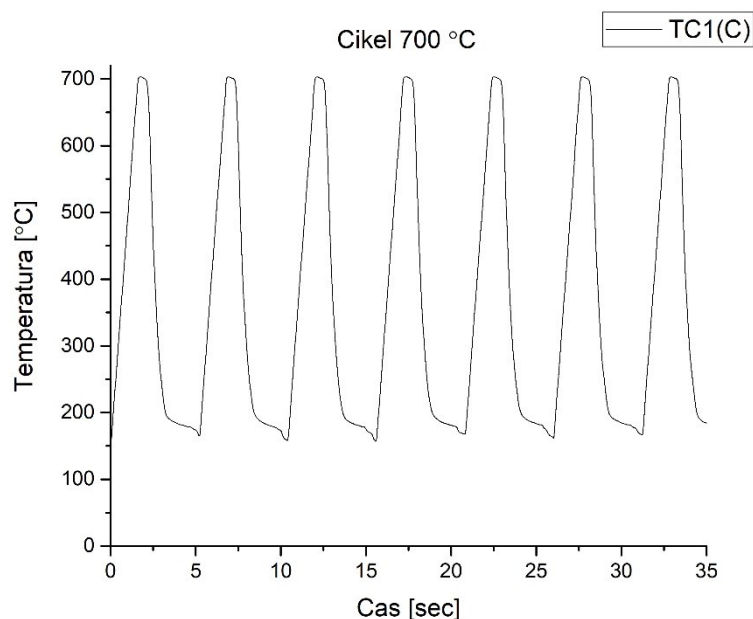
Celotni čas cikla je tako trajal 3,2 s.

Računalniško vodeno ogrevanje je bilo konduktivno, prav tako pa tudi računalniško vodeno ohlajanje s strujanjem vode skozi preizkušanece ter nato praznjenje preizkušanca z vpihovanjem zraka.

Temperature valjev med vročim valjanjem se gibljejo v območju od 500 °C do 700 °C zato smo tudi preizkušance testirali pri temperaturah 500 °C, 600 °C ter 700 °C. V tabeli 2 so podani pogoji pri katerih smo preizkušance testirali.

Tabela 2: Testni parametri temperaturnega utrujanja.

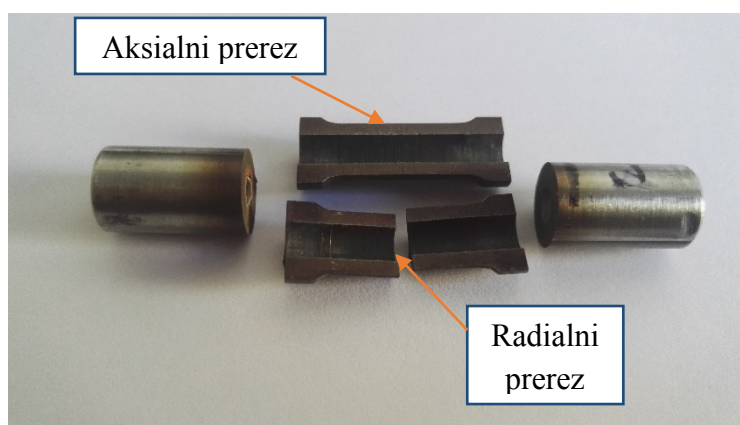
Material	Temperatura (°C)	Število ciklov
Jeklo za valje	500	200, 500, 1000, 2500
Jeklo za valje	600	200, 500, 1000, 2500
Jeklo za valje	700	200, 500, 1000, 2500



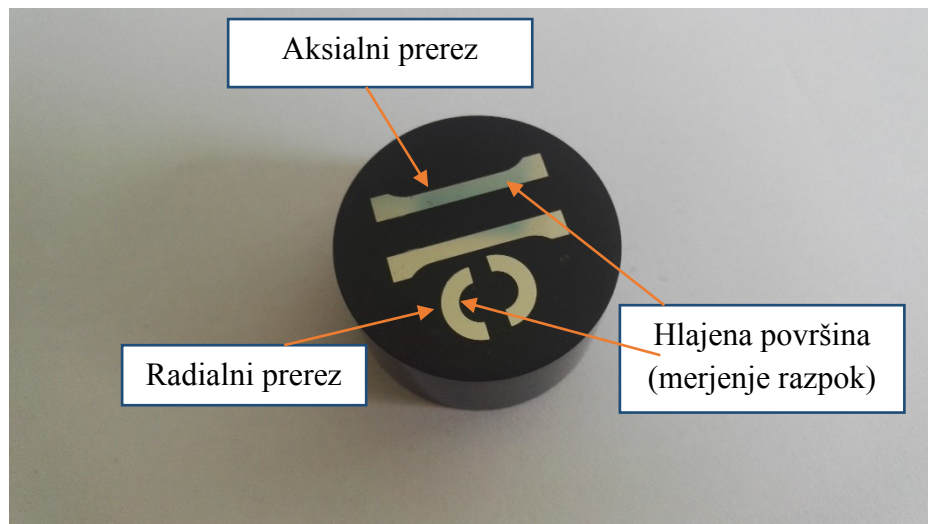
Slika 28: Temperaturni cikli med utrujanjem.

3.3. Priprava obrusa za metalografsko analizo

Preizkušance smo najprej razrezali aksialno po delovni dolžini vzorca, en del aksialno prerezanega vzorca pa smo razrezali še radialno (slika 29). Razrezane preizkušance smo vložili v maso za pripravo vzorca. Vzorce smo brusili in polirali po vnaprej predpisanem programu. Pričeli smo z brusnim papirjem granulacije 320 ter brušenje nadaljevali s ploščo MD-Largo 9 μm . Nato je sledilo še poliranje na ploščah MD-Dac 3 μm , MD-Mol 3 μm , MD-Nap 1 μm ter za konec še MD-Chem OP-A. Na sliki 30 je pripravljen obrus za preiskavo. Vzorce smo pregledali pod mikroskopom pri 200-kratni povečavi in izmerili dolžino razpok, globino razpok, dolžino notranjih razpok, oddaljenost notranjih razpok od površine ter površino potencialnih odkruškov. Iz dobljenih podatkov smo izračunali dolžine sedmih najdaljših razpok, povprečno dolžino vseh razpok in gostoto razpok.



Slika 29: Razrezan vzorec.

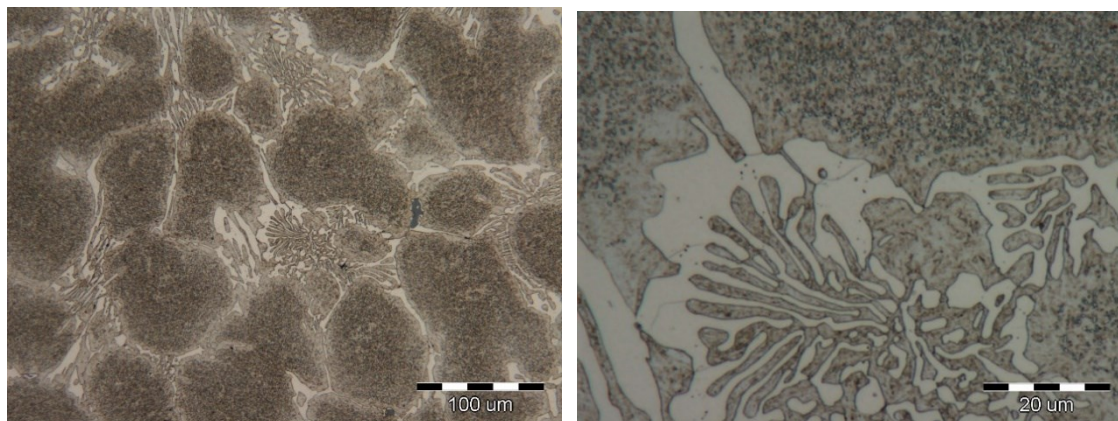


Slika 30: Obrus pripravljen za metalografsko analizo.

4. REZULTATI

4.1. Mikrostruktura in trdota preizkušane materiala

Na sliki 31 je prikazana mikrostruktura preizkušane materiala: matrica je iz popuščene martenzita v kateri so primarni, evtektični in sekundarni karbidi. Primarni karbidi dosežejo dimenzije do $10\mu\text{m}$ v širino ter do $50\mu\text{m}$ v dolžino. Evtektični karbidi so tako globularne kot tudi lamelaste oblike pri čemer je debelina lamel do $4\mu\text{m}$, dolžina pa do $35\mu\text{m}$. Ob robovih evtektika so vidni tudi masivnejši evtektiki.



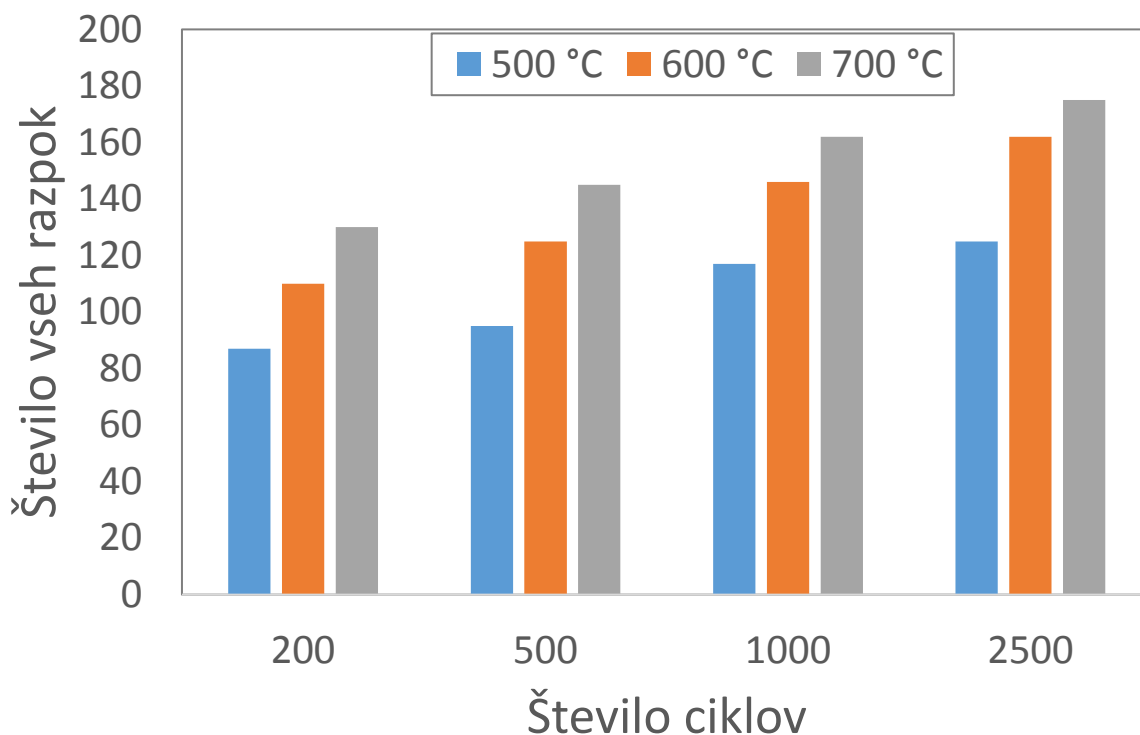
Slika 31: Mikrostruktura materiala valjev za delo v vročem.

Trdote preizkušancev se gibljejo v območju od 586 do 612 HV_{10} .

4.2. Kvantitativna ocena odpornosti testnega materiala na termično utrujanje

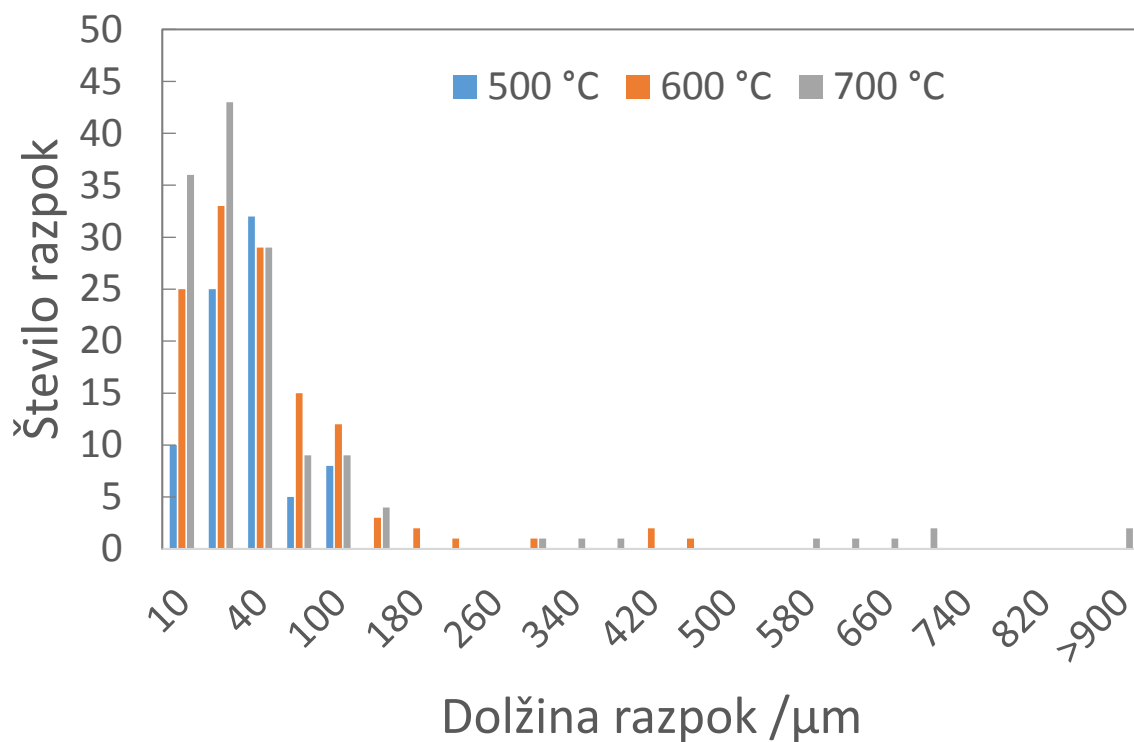
4.2.1. Porazdelitev razpok glede na dolžino

Na sliki 32 je prikazano skupno število razpok v odvisnosti temperature testiranja ter števila ciklov. Razvidno je, da število razpok narašča tako s številom ciklov kot s temperaturo. Tako je pri 200 ciklih in temperaturi 500 °C število razpok 87, pri temperaturi 600 °C 110 in pri temperaturi 700 °C 130. Pri 500 ciklih in temperaturi 500 °C je število razpok 95, pri temperaturi 600 °C 125 in pri temperaturi 700 °C 145. Pri 1000 ciklih in temperaturi 500 °C je število razpok 117, pri temperaturi 600 °C 146 in pri temperaturi 700 °C 172. Pri 2500 ciklih in temperaturi 500 °C je število razpok 125, pri temperaturi 600 °C 162 in pri temperaturi 700 °C pa 175. Torej število razpok tako s temperaturo kot tudi številom ciklov narašča.

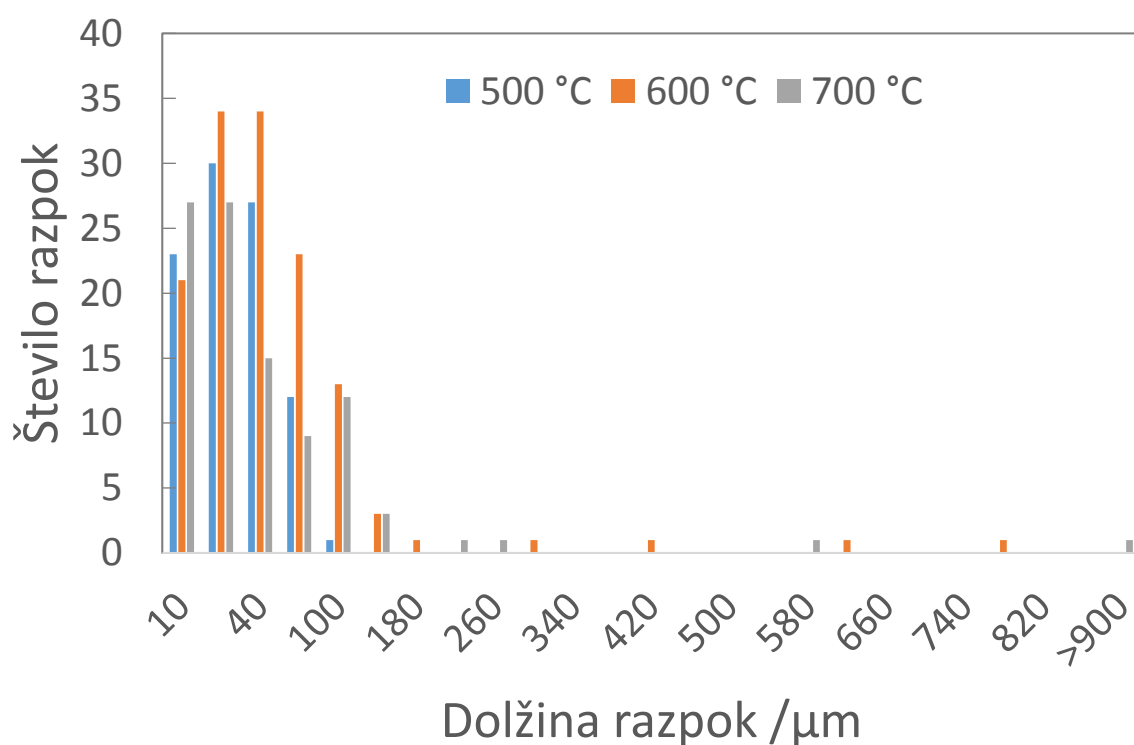


Slika 32: Skupno število razpok.

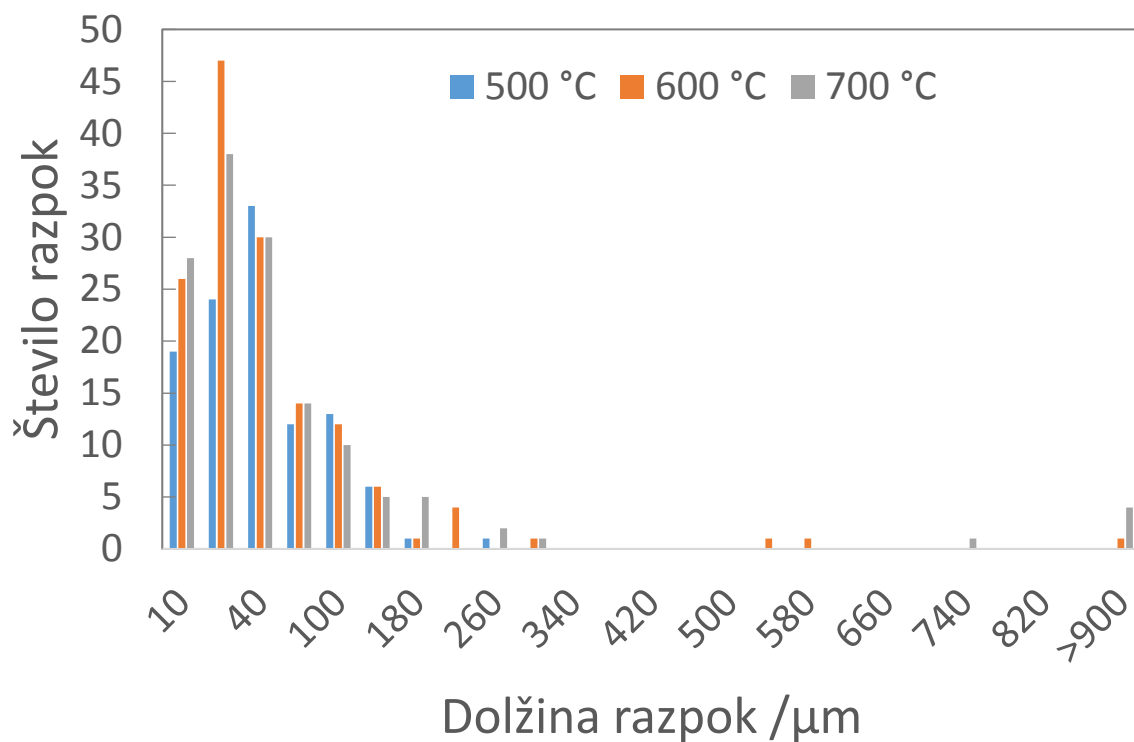
Na slikah 33, 34, 35 in 36 so prikazane dolžine vseh razpok po 200, 500, 1000 in 2500 ciklih. Opazimo lahko, da imata temperatura ter število ciklov velik vpliv na daljše razpoke, Število razpok daljših od 900 μm tako narašča predvsem s temperaturo pa tudi s številom ciklov. Pri 200 ciklih in temperaturi 700 °C sta dve razpoki daljši od 900 μm medtem, ko pri temperaturah 500 °C in 600 °C ni bilo opaziti tako dolgih razpok. Enako je pri 500 ciklih le, da je pri temperaturi 700 °C samo ena razpoka daljša od 900 μm . Pri 1000 ciklih se pojavi tudi prva razpoka daljša od 900 μm pri tempearturi 600 °C, pri temperaturi 700 °C pa so štiri take razpoke. Enako je pri 2500 ciklih le, da so pri temperaturi 700 °C tri razpoke daljše od 900 μm . Razpoke so pri višjih temperaturah ter višjih številih ciklov bolj razvejane, več pa je tudi zaključenih razpok, ki predstavljajo potencialne odkruške.



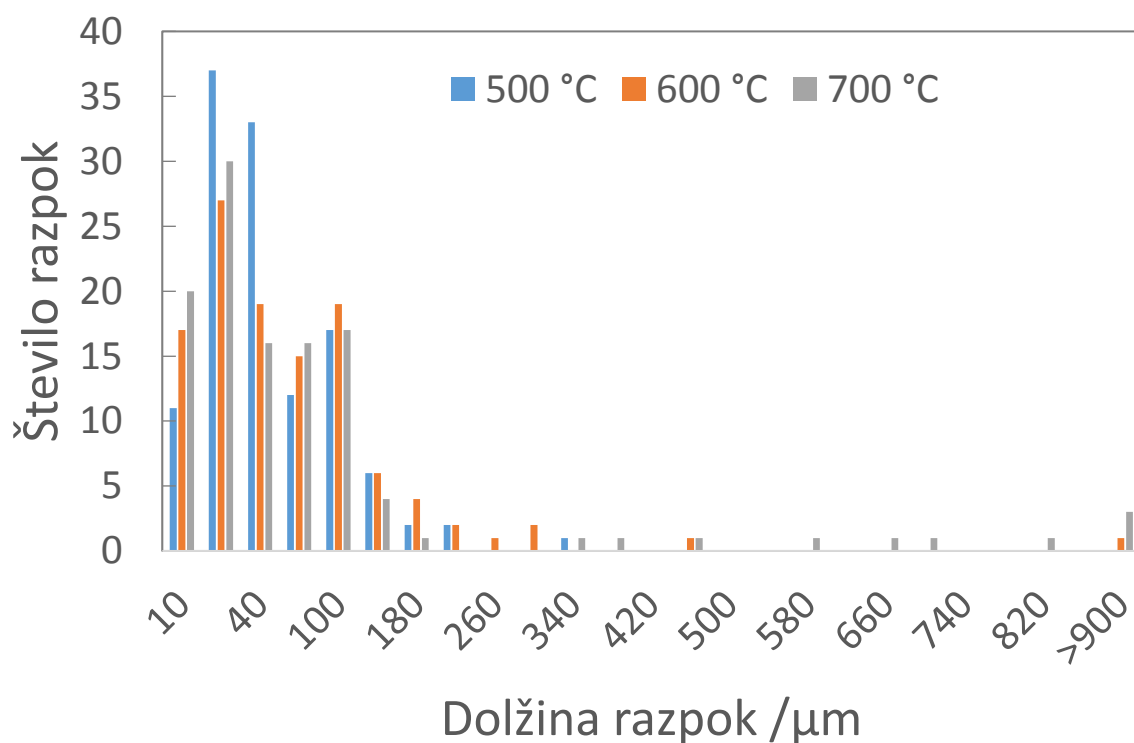
Slika 33: Število razpok po 200 ciklih in različnih temperaturah.



Slika 34: Število razpok po 500 ciklih in različnih temperaturah.

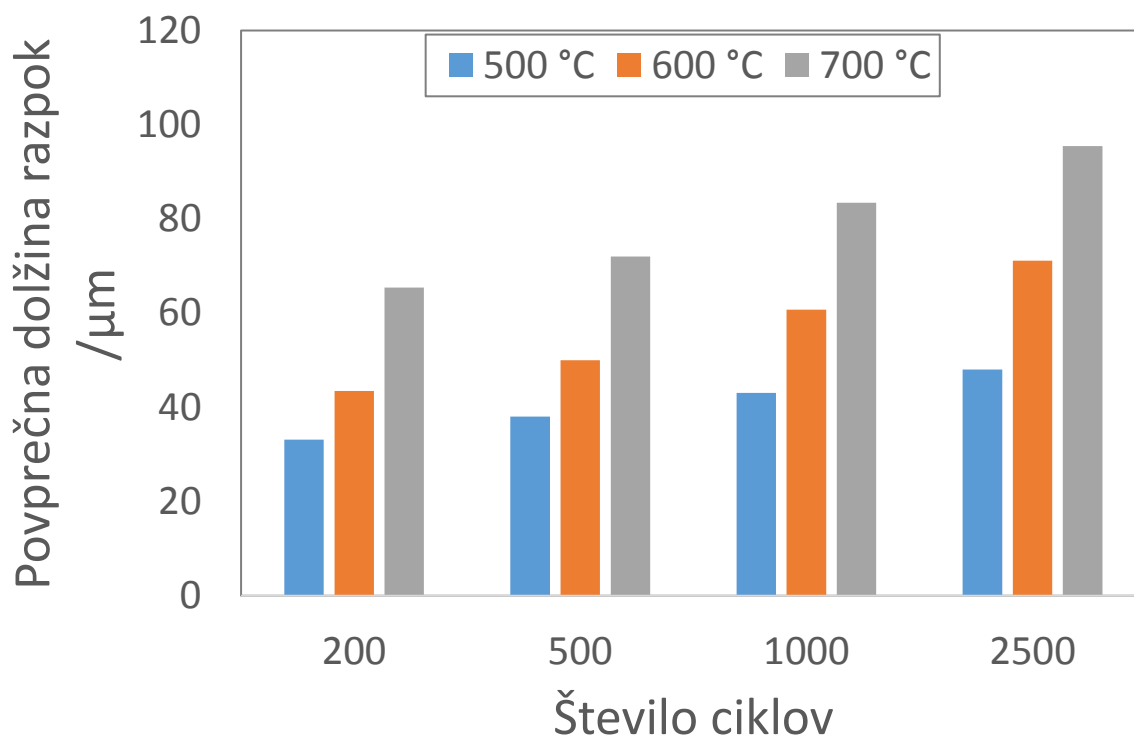


Slika 35: Število razpok po 1000 ciklih in različnih temperaturah.



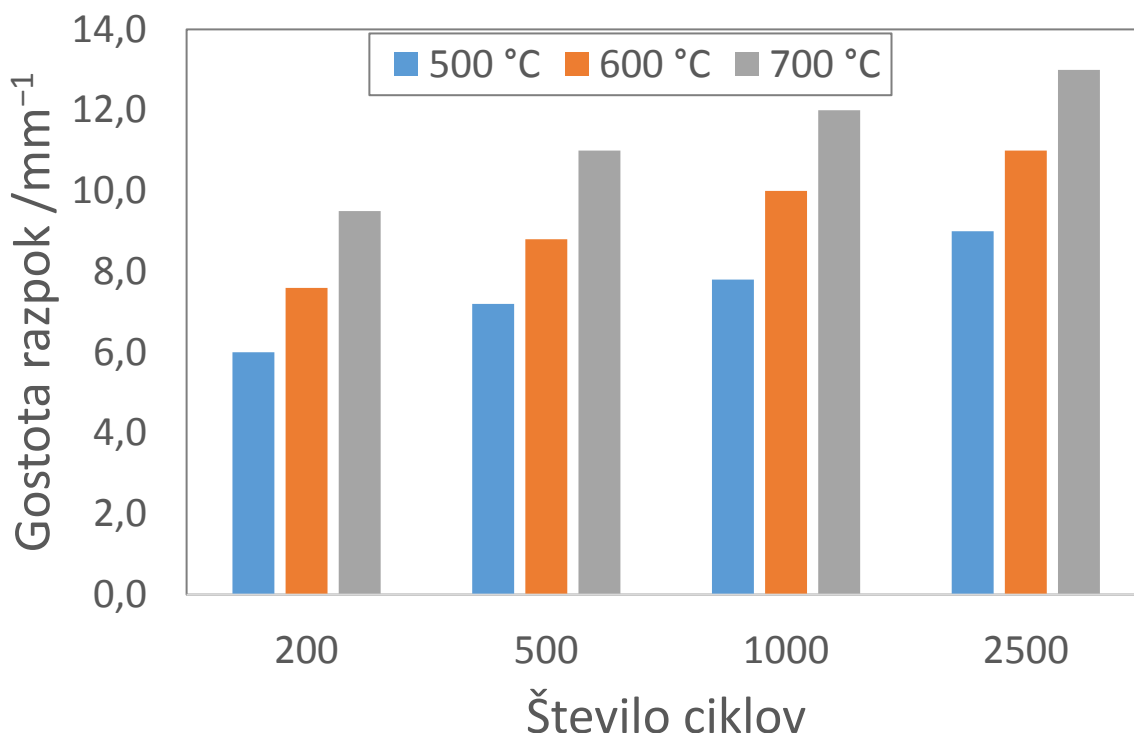
Slika 36: Število razpok po 2500 ciklih in različnih temperaturah.

4.2.2. Povprečna dolžina in gostota razpok



Slika 37: Povprečna dolžina razpok.

Povprečna dolžina razpok (Slika 37) narašča tako s številom ciklov kot s temperaturo. Pri 200 in 500 ciklih je največja razlika v povprečni dolžini razpok med temperaturama 600 °C in 700 °C in znaša pri 200 ter 500 ciklih 22 μm medtem, ko je razlika v povprečni dolžini razpok med temperaturama 500 °C in 600 °C manjša (približno 10 μm). Pri 1000 in 2500 ciklih so razlike približno enake. To si razlagamo z zmanjšanjem temperaturnih gradientov v globini preizkušanca, in s tem tudi napetosti po globini, kar vodi k zmanjševanju razlik povprečne dolžine razpok pri višjem številu ciklov. Po 200 ciklih so povprečne dolžine razpok pri temperaturi 500 °C 33 μm, pri temperaturi 600 °C 43,5 μm ter pri temperaturi 700 °C 65,5 μm. Po 500 ciklih so povprečne dolžine razpok pri temperaturi 500 °C 38 μm, pri temperaturi 600 °C 50 μm ter pri temperaturi 700 °C 72 μm. Po 1000 ciklih so povprečne dolžine razpok pri temperaturi 500 °C 43 μm, pri temperaturi 600 °C 61 μm ter pri temperaturi 700 °C 83 μm. Po 2500 ciklih so povprečne dolžine razpok pri temperaturi 500 °C 48 μm, pri temperaturi 600 °C 71 μm ter pri temperaturi 700 °C 95 μm.



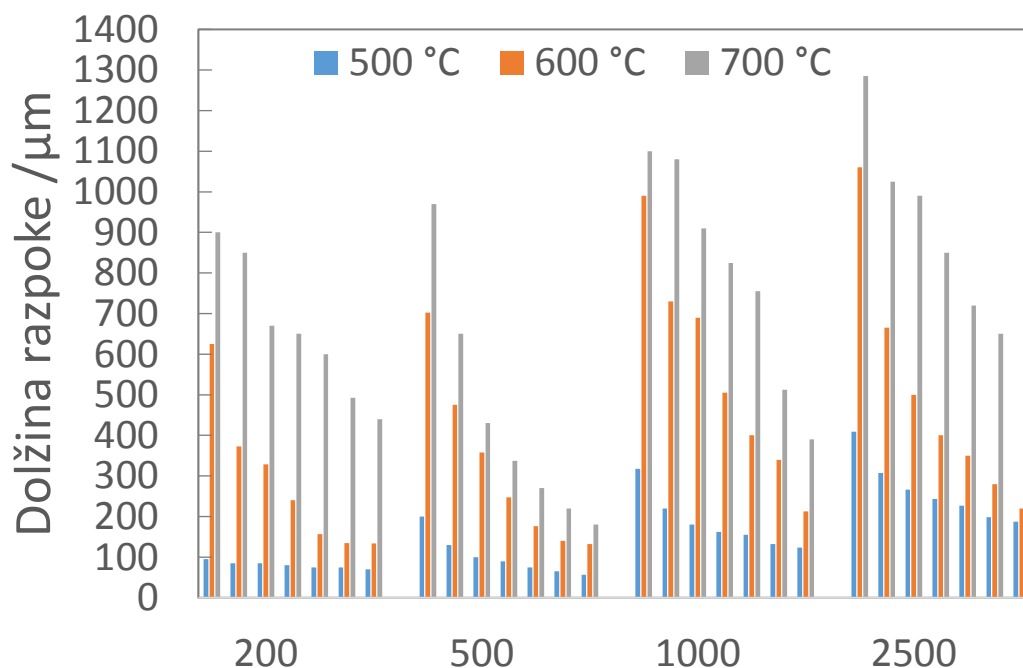
Slika 38: Gostota razpok.

Tudi gostota narašča s številom ciklov ter temperaturo. Na sliki 38 ni opaziti, da bi se razlike med gostotami pri posameznih testnih temperaturah spreminjale s številom ciklov. Po 200 ciklih so gostote razpok pri temperaturi 500 °C 6 /mm, pri temperaturi 600 °C 7,6 /mm ter pri temperaturi 700 °C 9,5 /mm. Po 500 ciklih so gostote razpok pri temperaturi 500 °C 7,2 /mm, pri temperaturi 600 °C 8,8 /mm ter pri temperaturi 700 °C 11 /mm. Po 1000 ciklih so gostote razpok pri temperaturi 500 °C 7,8 /mm, pri temperaturi 600 °C 10 /mm ter pri temperaturi 700 °C 12 /mm. Po 2500 ciklih so gostote razpok pri temperaturi 500 °C 9 /mm, pri temperaturi 600 °C 11 /mm ter pri temperaturi 700 °C 13 /mm.

4.2.3. Dolžina sedmih najdaljših razpok

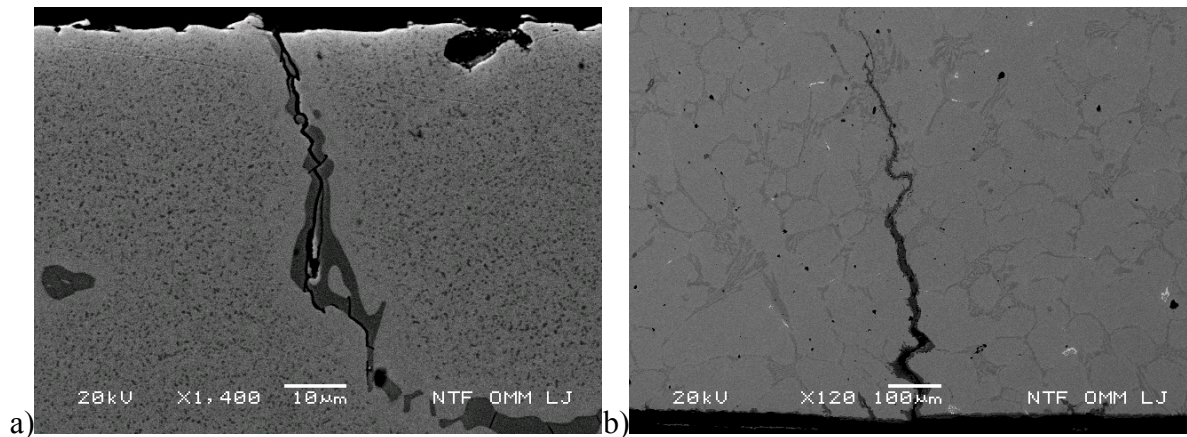
V praksi so ravno najdaljše razpoke najbolj kritične saj se lahko širijo in združujejo ter povzročijo luščenje materiala. Podatki o najdaljših razpokah so zaradi tega nujni. Na sliki 39 vidimo, da dolžina sedmih najdaljših razpok narašča tako s temperaturo kot s številom ciklov. Najbolj izstopajo dolžine sedmih najdaljših razpok pri temperaturi 700 °C saj so nekatere tudi do dvakrat daljše kot pri temperaturi 600 °C, najdaljša razpoka, ki je nastala po 2500 ciklih pri temperaturi 700 °C pa meri v globino kar 1285 μm . Torej, če bodo temperaturne konice na valjih dosegale vrednosti okrog 700 °C, se bodo daljše razpoke izrazito povečevale, kar lahko

vodi do luščenja materiala s površinske plasti valja oz. tudi do zloma valjev. Tudi pri temperaturi 600 °C so najdaljše razpoke lahko kritične saj najdaljša razpoka, ki je nastala pri tej temperaturi po 2500 ciklih meri 1060 μm medtem, ko je dolžina najdaljših razpok, ki so nastajale pri temperaturi 500 °C dosti manjša (najdaljša razpoka meri 580 μm).



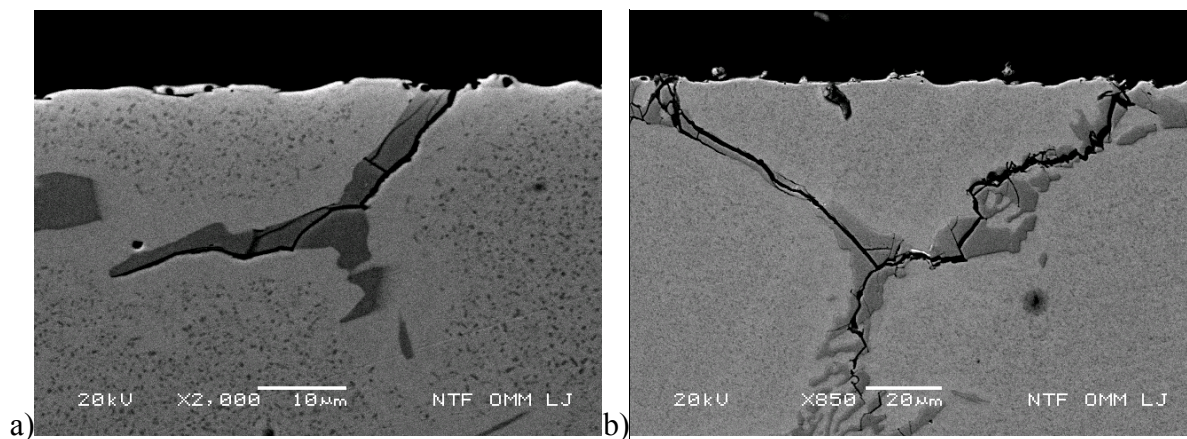
Slika 39: Dolžine posameznih sedmih najdaljših razpok.

4.3. Mikrostrukturni prikaz rasti razpok



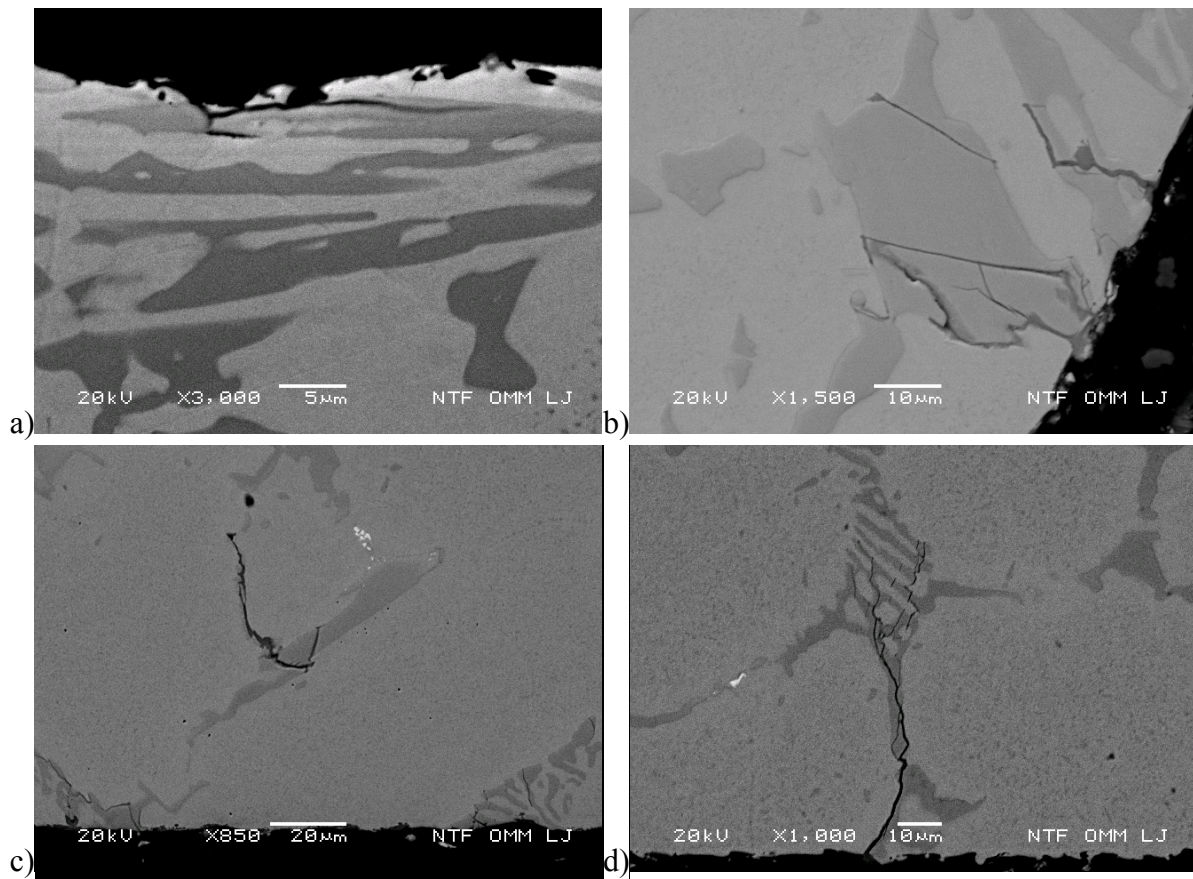
Slika 40: Inicijacija razpoke pri ozkem in dolgem karbidu na površini (a) (500 °C, 500 ciklov) ter rast razpoke po karbidni poti (b) (700 °C in 1000 ciklov).

Razpoke nastanejo ter napredujejo ob ozkih in dolгих karbidih kot je prikazano na sliki 40. Nukleacija razpok je posledica nateznih napetosti na površinski plasti, ki nastanejo zaradi temperaturnega gradienta med hlajeno površino ter materialom v notranjosti ter zaradi razlik v temperaturno razteznostnem koeficientu in mehanskih lastnostih karbidov ter matrice saj so karbidi bolj krhki od matrice, ki jih obkroža in imajo nižji temperaturno razteznostni koeficient. Med ogrevanjem in ohlajanjem, karbidi niso sposobni slediti raztezkom matrice, kar ima za posledico nukleacijo razpoke. Napredovanje razpoke je odvisno od orijentacije karbidov. Na sliki 40 se vidi, da v primeru, ko so karbidi orientirani pravokotno na površino so razpoke daljše in sledijo razporeditvi karbidov po mejah zrn. V primeru, ko so karbidi orientirani pod kotom glede na površino, bodo razpoke tvorile zaključena področja, ki predstavljajo potencialne odkruške. To lahko vidimo na sliki 41, kjer je nukleacija razpok pod kotom prikazana na sliki 41a. ter zaključeno področje, ki predstavlja potencialni odkrušek na sliki 41 b. Iz slike 40 in 41 lahko zaključimo, da je napredovanje razpoke skozi matrico oteženo ter, da razpoke lažje napredujejo po karbidih.



Slika 41: Inicijacija in rast razpoke pod kotom (500 °C, 500 ciklov) (a), združitev dveh razpok (700 °C, 1000 ciklov) (b).

Na podlagi orientacije, oblike, pozicije in razpršenosti karbidov je bilo opaženih več mehanizmov degradacije površine. Odkrušenje površine se pojavi, ko je področje med karbidi in površino zaključeno z razpokami kot prikazuje slika 41b. Včasih so lamelarni karbidi vzporedni s površino kot prikazuje slika 42a. V tem primeru se odkruši zunanja plast površine zaradi razpok, ki so se nukleirale v karbidu vzporedno s površino. Površina lahko degradira tudi ob prisotnosti karbidov, katerih debelina je velika (presega 10 μm) kot je vidno na sliki 42 b. Zaradi razlike v mehanskih lastnostih in temperaturno razteznostnem koeficientu med karbidi in matrico razpoke nukleirajo na različnih mestih, kar povzroči lom oz. Krušenje masivnejšega karbida. Tudi notranje razpoke so nastale na podoben način. Nukleirale so na debelejših karbidih ter napredovale in se razvejale po tanjših karbidih v bližini (slika 42c). Na sliki 42d lahko opazimo, da je bilo napredovanje razpoke ovirano z razvejanjem oz. dispergiranjem rasti razpoke po evtektskem karbidu. Vloga evtektskih karbidov je lahko zelo pomembna pri zmanjšanju hitrosti napredovanja razpoke. Pri zmanjšanju hitrosti napredovanja razpoke so evtektski karbidi učinkoviti le v primeru, če so blizu površine kot prikazuje slika 42d in, če so bolj globularne oblike. V primeru, ko so evtektski karbidi lamelarni in v bližini površine bo prišlo do odkrušenja le te (slika 42a).



Slika 42: Nukleacija in rast razpok; luščenje zaradi razpok v karbidih vzporedno z površino (700 °C, 500 ciklov) (a), iniciacija razpoke na masivnem karbidu ter njegovo krušenje (500 °C, 1000 ciklov) (b), nukleacija notranje razpoke pri masivnejšem karbidu ter njena rast (600 °C, 500 ciklov) (c) in upočasnitev rasti razpok na lamelarnem evtektiku (500 °C, 200 ciklov) (d).

5. ZAKLJUČKI

Izvedeni so bili laboratorijski testi termičnega utrujanja jekla z visoko vsebnostjo Cr (ca 12mas%), ki je namenjen za valje za delo v vročem. Testi so bili izvedeni pri treh različnih maksimalnih temperaturah, t.j. 500, 600 in 700°C. Testni vzorci so bili ogrevani ter notranje hlajeni pri čemer so bili tako sta bili obe fazi računalniško vodeni. Merjene so bile razpoke na delovni površini preizkušanca ter izračunani so bili povprečna dolžina razpok, gostota razpok ter dolžine sedmih najdaljših razpok. Razpoke so bile tudi metalografsko pregledane. Iz dobljenih rezultatov lahko zaključimo:

- Mikrostruktura testiranega Cr jekla za valje je iz popuščenega martenzita ter primarnih, evtektičnih in sekundarnih karbidov.
- Inicijacija razpok so mesta izločenih karbidov na notranji površini testiranega vzorca.
- Razpoke rastejo po karbidnih popteh, t.j. predvsem po ozkih ter dolgih karbidih.
- Hitrost rasti razpok se zmanjša ko razpoka doseže lamelarno obliko evtektika oz. globularno obliko evtektika.
- S plastično deformacijo in posledično drobljenjem karbidov bi se hitrost širjenja razpoke zmanjšala.
- Na masivnejših karbidih, ki so izločeni na testni površini oz. blizu testne površine, pride do pojava krušenja karbidov.
- Do krušenja površine pride tudi na mestih evtektikov, t.j. tako lamelarnih kot tudi globularnih evtektikov.
- Krušenje večjih delov nastane na osnovi spojitve dveh razpok pri njihovi rasti.
- Tako povprečna dolžina razpok, gostota razpok kot tudi dolžine najdaljših razpok se povečujejo z višanjem testne temperature kot tudi številom ciklov.
- Povprečna dolžina razpok pri 500 °C in 200 ciklih znaša 33 µm, gostota razpok 6/mm, dolžina najdaljše razpoke 95 µm. Pri 2500 ciklih in isti testni temperaturi pa povprečna dolžina razpok znaša 48 µm, gostota razpok 9/mm, dolžina najdaljše razpoke pa 408 µm.
- Povprečna dolžina razpok pri 700 °C in 200 ciklih znaša 65 µm, gostota razpok 9,5/mm, dolžina najdaljše razpoke 900 µm. Pri 2500 ciklih in isti testni temperaturi pa povprečna dolžina razpok znaša 95 µm, gostota razpok 13/mm, dolžina najdaljše razpoke pa 1285 µm.

6. LITERATURA

1. FAZARINC, M. *Temperaturno utrujanje materialov s funkcionalno porazdeljenimi lastnostmi: Doktorska disertacija*. Ljubljana, 2012, Str.5-19.
2. SMITH, E. Cracks and dislocation arrays in heterogeneous media. *International Journal of Fracture Mechanics*. 1968, Zv. 4, str. 397-409
3. WERONSKI, A. in HEJWOWSKI, T. *Thermal fatigue of metals*. New York : CRC Press, 1991. ISBN 0-8247-7726-3.
3. CHENG, A.S. in LAIRD, C. The transition from stage I to stage II fatigue crack propagation in copper single crystals cycled at constant strain amplitudes. *Materials Science and Engineering*. 1983, Zv. 60, str. 177 – 183.
4. KAWAGOISHI, N., CHEN, Q. in NISITANI, H. Significance of small crack. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2000, Zv. 31, str. 2005 – 2013.
5. RICE, J.R. Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue. *Fatigue Crack Propagation*, ASTM-STP 415. s.l. : American Society for Testing and Materials, 1967, str. 247 – 311.
6. NEUMAN, P. Coarse slip model of fatigue. *Acta Metallurgica*. 1969, Zv. 17, str. 1219 – 1225.
7. PELLOUX, R.M.N. Mechanisms of formation of ductile fatigue striations. *Transactions of American Society for Metals*. 1969, Zv. 62, str. 281 – 285.
8. VEHOFF, H. in NEUMANN, P. In situ SEM experiments concerning the mechanism of ductile crack growth. *Acta Metallurgica*. 1978, Zv. 27, str. 915 – 920.
9. SJÖRSTRÖM, J. in BERGSTRÖM, J. Thermal fatigue testing of chromium martensitic hot-work tool steel after different austenitizing treatments. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, Izv. 153-154, str. 1089–1096.
10. KLOBČAR, D., TUŠEK, D. in TALJAT, B. Thermal fatigue of materials for diecasting tooling. *Material Science and Engineering A*. 2008, Zv. 274, 1-2, str. 198207.
11. KLOBČAR, D., in drugi, in drugi. Thermo fatigue cracking of die casting dies. *Engineering Failure Analysis*. 2012, Zv. 20, str. 43-53.
11. SPERA, D.A. in MOWBRAY, D.F. *Thermal Fatigue of Materials and Components*. Baltimor : ASTM, 1976, str. 3-9.
12. *Valjanje [online]*. Wikipedija : prosta enciklopedija, 2017, obnovljeno 26.3.2013 [citirano dne 10. 8. 2017]. Dostopno na svetovnem spletu: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjanje>

13. ŽUŽEK, B. *Termično utrujanje valjev : diplomsko seminarsko delo*. Ljubljana, 2009, Str.2-9.
14. FAJFAR, P. *Dodatno gradivo pri predmetu Preoblikovanje*. Ljubljana, 2003.
15. ŽENDAR, L. *Testiranje orodnega jekla na odpornost proti temperaturnemu utrujanju : diplomsko seminarsko delo*. Ljubljana, 2016, str.4-11.
16. BOMBAČ, D., KUGLER, G., TERČELJ, M., TURK, R. *Preoblikovanje kovinskih materialov*. Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, 2008, 181 str.
17. ŽUŽEK, B. *Termično utrujanje valjev : diplomsko seminarsko delo*. Ljubljana, 2009, str.22-25.
18. ŽUŽEK, B. *Termično utrujanje valjev : diplomsko seminarsko delo*. Ljubljana, 2009, str.10-15.
19. SPUZIC, S. et al. *Wear of hot rolling mill rolls: an overview*. s.l. : Elsevier Science S.A., 1994, Zv. Wear 176.
20. LEE, S.C. IN WENG, L.C. On Thermal Shock Resistance of Austenitic Cast Irons. *Metalurgical Transactions A*. 1991, Vol. 22, A, str. 1821-1831.
21. REVEL, P., KIRCHER, D. IN BOGARD, V. Experimental and numerical simulation of a stainless steel coating subjected to thermal fatigue. *Materials Science and Engineering*. 2000, Vol. 2900, A, str. 25-32.
22. PELLIZZARI, M., MOLINARI, A. IN STRAFFELINI, G. Thermal fatigue of plasma duplex-treated tool steel. *Surface and Coatings Technology*. 2001, Izv. 142-144, str. 1109-1115
23. PERSSON, A., HOGMARK, S. IN BERGSTRÖM, J. Thermal fatigue of surface engineered hot work tool steels. *Surface and Coatings Technologies*. 2005, Vol. 191, str. 216-227.
24. FAZARINC, M. *Temperaturno utrujanje materialov s funkcionalno porazdeljenimi lastnostmi: Doktorska disertacija*. Ljubljana, 2012. 107 str.