

LOMNA ŽILAVOST K_{Ic} HITROREZNEGA JEKLA AISI M-2

FRACTURE-TOUGHNESS (K_{Ic}) OF HSS AISI M-2 TYPE

Borivoj Šuštaršič, Vojteh Leskovšek, Gorazd Jutriša

Inštitut za kovinske materiale, Lepi pot 11, Ljubljana, Slovenija
borivoj.sustarsic@imt.si

Prejem rokopisa – received: 2002-11-11; sprejem za objavo – accepted for publication: 2003-09-09

Določevali smo lomno žilavost K_{Ic} hitroreznega jekla AISI M2 pri cilindričnih preizkušancih z zarezo po obodu. Na mehko žarjenih preizkušancih smo z utrujanjem po vrtilno upogibnem načinu v korenu zareze pripravili atomsko ostro utrujenostno razpoko s kontrolirano globino. Preizkušance smo nato vakuumsko toplotno obdelali, temu pa je sledila natezna porušitev dinamično utrujenih vzorcev. S statistično obdelavo rezultatov smo izračunali lomno žilavost K_{Ic} . V prispevku je predstavljen postopek merjenja in nekatere izboljšave, uvedene pri spremljanju postopka utrujanja in porušitve vzorcev z obodno zarezo in utrujenostno razpoko.

Ključne besede: lomna žilavost, upogibno rotacijski način utrujanja, cilindrični preizkušanci z zarezo, metodologija in postopki preizkušanja

The fracture toughness of AISI M2 high-speed steel was determined on simple pre-cracked round-notched specimens. The atomic sharp fatigue crack in the notch root was obtained with rotating-bend loading of soft annealed specimens. These specimens were then subjected to a standard heat treatment in a vacuum furnace and then fractured in the tensile regime. Using a statistical analysis of the results of the obtained tensile strength, the fracture toughness was calculated. In this article the methodology for the fracture-toughness determination and some improvements to the tracing procedures of fatiguing and fracturing of round-notched specimens with a fatigue crack are presented.

Key words: fracture toughness, rotating-bend mode, cylindrical V-notched specimens with a fatigue crack, testing methodology and procedure

1 UVOD

Lomna žilavost je sposobnost materiala, da se upira napredovanju razpoke. Pri trdih in krhkih materialih, med katere spada preiskovano jeklo, je v kaljenem in popuščnem stanju vedenje linearno elastično do loma. V tem primeru lahko uporabimo koncept linearne elastomehanike loma (LEFM; angl.: Linear Elastic Fracture Mechanic)^{1,2}. Merilo za porušitev materiala z utrujenostno razpoko je faktor kritične intenzitete napetosti K_{Ic} , ki ga imenujemo tudi lomna žilavost materiala. Za določevanje lomne žilavosti K_{Ic} uporabljamo standardizirane in nestandardizirane preizkušance. Standardizirani obliki sta CT – (angl.: Compact Tension) in SENB – (angl.: Single Edge Noched-Bend) preizkušane¹⁻⁵, najpogosteje uporabljeni nestandardizirani preizkušanci pa so cilindrični natezni z zarezo po obodu in utrujenostno razpoko v dnu zareze^{6,7} (K_{Ic} -preizkušanci).

Lomno žilavost preizkušamo v razmerah ravninskega deformacijskega stanja, kar dosežemo z zadostno debelino preizkušanca⁸. Pri cilindričnih K_{Ic} -preizkušancih je pogoj ravninskega deformacijskega stanja izpolnjen že pri manjših premerih⁶⁻⁸ kot pri standardnih oblikah preizkušancev.

Prednost teh K_{Ic} -preizkušancev pred standardnimi je njihova radialna simetrija, zato so posebej primerni za študij vpliva mikrostrukture kovinskih materialov na

lomno žilavost. Izoblikovanje mikrostrukture po obodu je namreč zaradi radialno simetričnega odvajanja toplote popolnoma uniformno⁹.

Na raztros izmerjenih vrednosti lomne žilavosti hitroreznega jekla, ki jo določamo z uporabo K_{Ic} -preizkušancev, pri katerih izdelamo obodno utrujenostno razpoko v dnu zareze pred končno toplotno obdelavo, vpliva ekscentričnost utrujenega področja, razvejenje in otopitev atomarno ostre konice utrujenostne razpoke, heterogenost mikrostrukture in pojav šibkega mesta na prelomni površini^{6,7,9}.

Čeprav so ključni problemi teoretično utemeljeni in metodološko rešeni^{6,7,9}, smo želeli še izboljšati točnost in ponovljivost meritev. Zato smo pri izdelavi utrujenostne razpoke po rotacijsko-upogibnem načinu uvedli računalniško podprt sistem za merjenje osne sile, pri trganju K_{Ic} -preizkušancev pa spremljanje odvisnosti med silo in pomikom. Z uvedbo digitalnega merilnega mikroskopa za opazovanje zareze in prelomne površine K_{Ic} -preizkušancev smo izboljšali kontrolo izdelane utrujenostne razpoke po obodu v dnu zareze in povečali točnost meritev premera naglo zlomljenega dela in radialne oddaljenosti šibkega mesta od konice utrujenostne razpoke. Digitalni merilni mikroskop omogoča računalniško zajemanje merjenih veličin in njihovo lahko obdelavo v enem od standardnih orodij za delo s preglednicami (na primer Microsoft Excel). V nadaljevanju podajamo natančnejši opis izboljšav ter pridob-

ljeno znanje in izkušnje pri merjenju lomne žilavosti hitroreznega jekla AISI M2.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Material in geometrija preizkušancev

Konvencionalno izdelano jeklo AISI M2 je bilo dobavljeno v obliki valjanih luščenih mehko žarjenih (maks. trdota 234 HB) palic $\phi 20 \text{ mm} \times 3600 \text{ mm}$ iz iste šarže. Palice smo označili s črkami od A do G. Iz teh palic smo za vsako izbrano temperaturo popuščenja izdelali po dvajset K_{Ic} -preizkušancev (slika 1). Utrujenostno razpoko v dnu zarezne smo izdelali v vrtilno-upogibnem režimu še pred končno toplotno obdelavo.

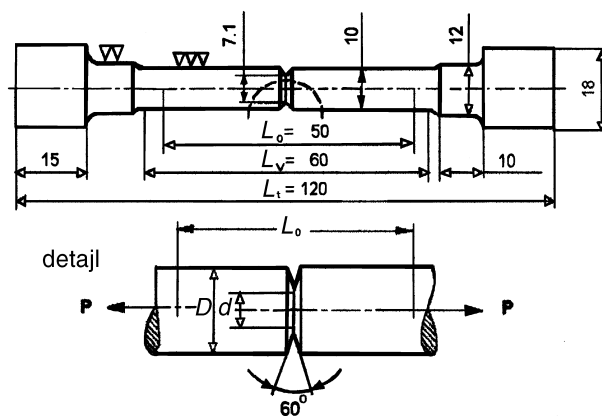
K_{Ic} -preizkušanci so bili kaljeni s temperature avstenitizacije $1230 \text{ }^\circ\text{C}$ v toku N_2 pri 5 bar do $80 \text{ }^\circ\text{C}$ in dvakrat po eno uro popuščeni v območju temperatur $500 \text{ }^\circ\text{C}$ in $630 \text{ }^\circ\text{C}$ v vakuumski peči. Osnove postopka, priprava vzorcev in rezultati meritev so bili že natančneje opisani¹⁰. Zato se na tem mestu ne bomo spuščali v podrobnosti, posvetili se bomo predvsem opisu uvedenih izboljšav merjenja K_{Ic} in ugotovitvam, ki so z njimi povezane.

2.2 Izdelava utrujenostne razpoke

Zaradi velike zarezne občutljivosti trdih in krhkih materialov, med katere po končni toplotni obdelavi spada tudi preiskovano hitrorezno jeklo M2, je izdelava utrujenostne razpoke izjemno težavna. Zato smo uvedli izdelavo utrujenostne razpoke na K_{Ic} -preizkušancih že pred končno toplotno obdelavo, ko so bili preizkušanci še v mehko žarjenem stanju. Predhodne preiskave⁷ so potrdile, da minimalna otopitev konice utrujenostne razpoke, ki nastane zaradi difuzije med toplotno obdelavo, nima vpliva na izmerjene vrednosti lomne žilavosti. Še več, po toplotni obdelavi smo odpravili tudi vse zaostale napetosti, ki smo jih vnesli v material med izdelavo utrujenostne razpoke.

Utrujanje izvajamo na rotacijsko-upogibni način na stroju, ki omogoča kontrolirano vpetje, vrtenje in istočasno upogibno obremenjevanje K_{Ic} -preizkušanca. S tem načinom izdelave utrujenostne razpoke se izognemo ekscentričnosti utrujenostnega področja, ki ima, če se le-ta pojavi, za posledico precenjene vrednosti lomne žilavosti⁷.

Osno silo, ki je potrebna za izdelavo utrujenostne razpoke v dnu zarezne K_{Ic} -preizkušanca, smo v preteklosti izbrali s horizontalnim pomikom trna z uležajenim kolescem, ki pritiska na sredino vrtečega se preizkušanca. Ta način je sicer preprost a nenatančen, saj ne omogoča aktivne nastavitve želene absolutne vrednosti obremenitve in njenega spremljanja med utrujanjem. Zato smo se odločili, da bomo utrujanje inštrumentirali in v trn vgradili senzor z analogno-digitalnim (AC/DC) pretvornikom za merjenje osne obremenitve, ki omogoča zvezno zajemanje vrednosti osne sile, s katero med



Slika 1: Shematični prikaz cilindričnega nateznega preizkušanca za merjenje lomne žilavosti z zarezno po obodu in utrujenostno razpoko v dnu zarezne (K_{Ic} -preizkušanec). Vse dimenzije so v mm.

Figure 1: Circumferentially-notched and fatigue pre-cracked tensile test specimen¹ (K_{Ic} -test specimen). All dimensions are in mm.

rotacijsko-upogibnim načinom utrivanja vležajeno kolesce trna pritiska na K_{Ic} -preizkušanec. Kot senzor smo izbrali merilno celico za vgradnjo ali tako imenovani PF-pretvornik, ki se v praksi najpogosteje uporablja kot univerzalni merilnik raztezka za jeklene konstrukcije. Z ustreznim umerjanjem omogoča tudi tehtanje ali določanje sil oziroma napetosti v vgrajenem strojnem elementu, napravi ali konstrukciji. Elastično (tlačno, natezno ali strižno) deformacijo pretvarja senzor preko uporovnih merilnih lističev, vezanih v Wheatstonov mostiček, v električni signal, ki ga ojačimo in pretvorimo v ustrezno merjeno veličino.

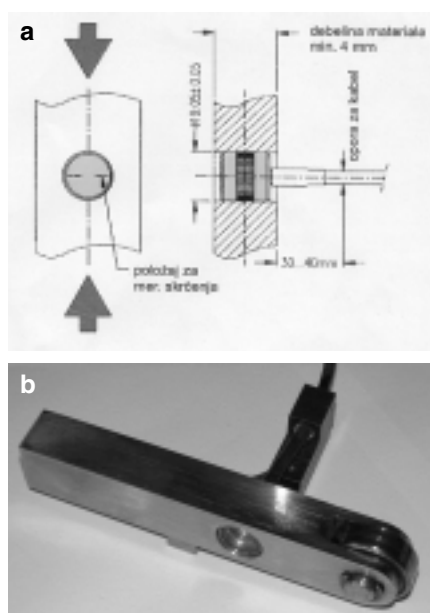
Delovno območje sensorja smo izbrali glede na praktično uporabljene pomike (povese ali upogibe). Za okvirni izračun sile smo uporabili osnovne enačbe iz nauka o trdnosti za enostavni, statično, točkovno in upogibno obremenjeni nosilec, podprt na dveh podporah¹¹. Shematični princip vgradnje sensorja in dejanski videz trna z vgrajenim senzorjem je prikazan na sliki 2.

Senzor je neposredno povezan z digitalnim prikazovalnikom sile (Tracker 240 Series, Data Track Process Instruments Ltd, Anglija) in preko njega ter vmesnika RS 232 še s prenosnim računalnikom. Izdelana je tudi ustrezna programska oprema, ki omogoča na računalniku zvezno spremljanje, zapis, shranjevanje in obdelavo merjenih veličin. Na sliki 3 je prikazano programsko okno za spremljanje sile v odvisnosti od časa utrivanja.

Na sliki 4 pa je prikazan celoten sistem, tako načina utrivanja kot tudi njegovega spremljanja.

2.3 Kvazistatično trganje utrujenih preizkušancev

Po izdelavi utrujenostne razpoke s programirano globino razpoke v dnu zarezne K_{Ic} -preizkušancev in njihovi toplotni obdelavi sledi še njihovo kvazistatično natezno obremenjevanje do porušitve. To operacijo

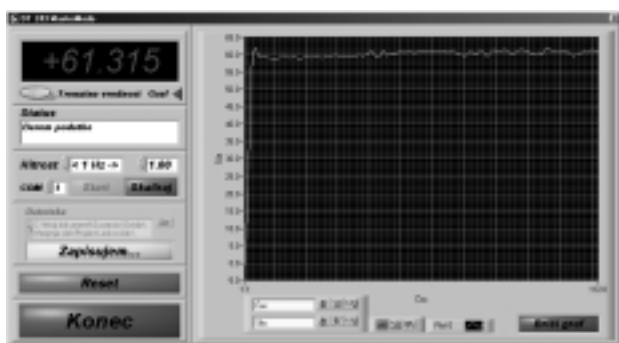


Slika 2: Trn za izvajanje upogibne obremenitve z vgrajenim senzorjem: a) shematični princip vgradnje senzorja in b) dejanski videz trna z vgrajenim senzorjem

Figure 2: Piston for the bend loading of samples: a) the built in schematic view of the Ramsey PF sensor and b) the actual piston view with sensor and bearing wheel

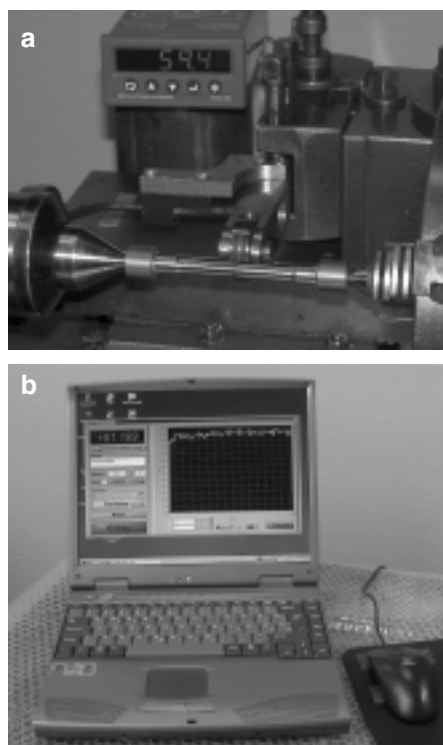
izvajamo na 500 kN univerzalnem servo-hidravličnem natezno-tlačnem preizkuševalnem stroju Instron 1255 (slika 5), ki smo ga nadgradili s sistemom za zajemanje in analogno/digitalno pretvorbo merjenih vrednosti sile in pomika.

Senzorja sile in pomika smo povezali preko SCXI (angl.: Signal Conditioning System) – modulov tipa SCXI-1305 in SCXI-1321 podjetja National Instruments z osebnim računalnikom. Moduli skrbijo za ustrezno zajemanje, uravnavanje, prenos in obdelavo merjenih vrednosti. V okolju oken smo z grafičnim programskim jezikom za inštrumentiranje LabVIEW 5.0 izdelali ustrezno programsko opremo, ki omogoča umerjanje senzorjev, izračunavanje ter vizualno in grafično predstavitev odvisnosti med silo in pomikom (slika 6).



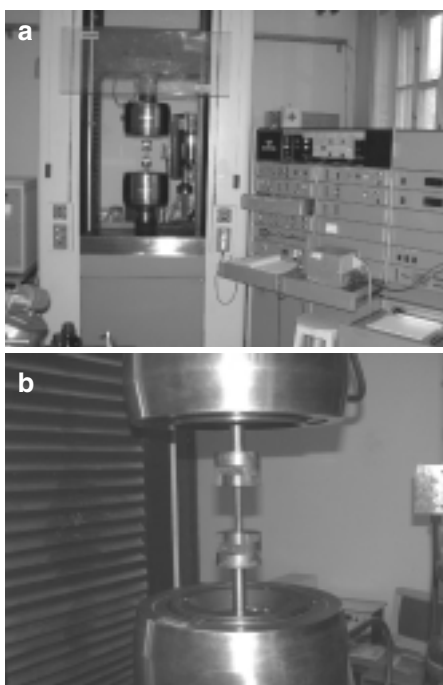
Slika 3: Videz programskega okna na zaslonu osebnega računalnika (PC) za spremljanje sile v odvisnosti od časa utrujanja

Figure 3: View into the program window for the tracing of the load during sample fatigue, visible on the monitor of a PC



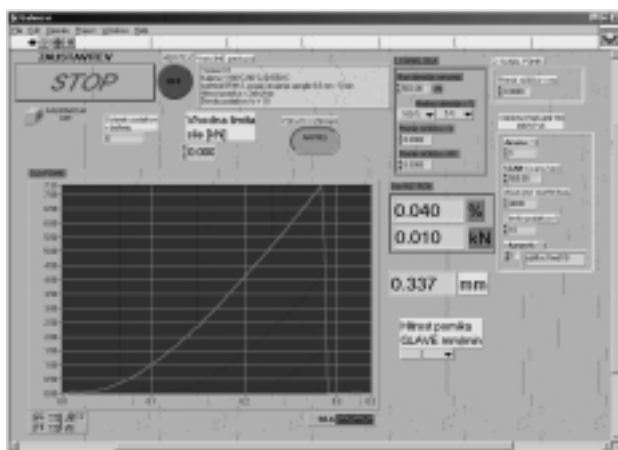
Slika 4: Prikaz celotnega sistema za pripravo razpoke z utrujanjem na rotacijsko-upogibni način: a) utrujanje preizkušancev in b) spremljanje sile med utrujanjem na prenosnem računalniku

Figure 4: Complete system for the fatigue-crack growing in the rotating-bend mode: a) sample fatiguing and b) monitoring and registering of the bending load with a PC



Slika 5: Kvazistatično natezno trganje utrujenih preizkušancev: a) univerzalni statično-dinamični servo-hidravlični preizkuševalni stroj Instron 1255 in b) detajl načina vpetja preizkušanca

Figure 5: Quasi-static tensile fracturing of precracked samples: a) universal static-dynamic servo-hydraulic testing machine Instron 1255 and b) detail of specimen fixing



Slika 6: Videz programskega okna na zaslonu PC za spremljanje sile v odvisnosti od pomika med trganjem preizkušanca z izdelano utrujenostno razpoko

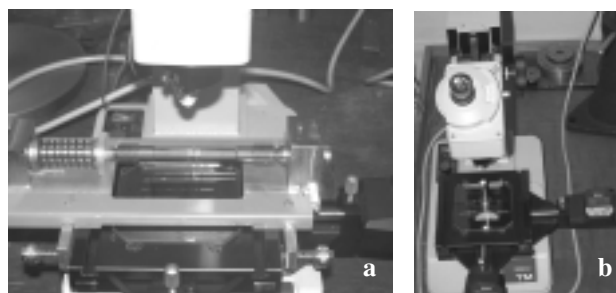
Figure 6: View into the program window for tracing the dependence load vs. displacement during the quasi-static tensile loading to fracture of a precracked sample on the PC monitor

Sistem ni opremljen z aktuatorji za avtomatski zagon/ustavitev preko PC. Zato sta potrebna ročni zagon in ustavitev preizkuševalnega stroja ter merjenja in je potrebno sinhronizirano delo dveh operaterjev; enega, ki upravlja računalnik, in drugega, ki upravlja preizkuševalni stroj. Sistem je bil uspešno preizkušen in se sedaj že uporablja pri standardnem inženirskem nateznem preizkusu ter preizkusu določevanja stisljivosti kovinskih prahov¹². Na tem mestu pa poročamo še o njegovi uspešni uporabi pri določevanju lomne žilavosti K_{Ic} oziroma merjenju odvisnosti med silo in pomikom pri natezanju K_{Ic} -preizkušancev. Natančna določitev sile pri porušitvi te vrste preizkušancev je namreč zelo pomembna, saj je le-ta ena od osnovnih parametrov v enačbi¹⁰ za izračun pogojne lomne žilavosti K_Q oziroma določitev prave vrednosti K_{Ic} . Poleg natančne določitve sile porušitve je pomembna tudi oblika odvisnosti med silo in pomikom. Ta odvisnost mora biti linearna do loma, kar kaže na to, da so bili v celoti izpolnjeni zakoni ravninskega deformacijskega stanja in LEFM. Pri manjših odmikih od LEFM (v primeru bolj žilavih jekel) so sicer možni nekateri popravki, ki pa so zaradi digitalnega zapisa te odvisnosti tudi mnogo lažje obvladljivi (izračun površine pod krivuljo, 5-odstotna sekantna metoda itd.)^{3-5,13}.

2.4 Določitev velikosti utrujenostne razpoke

Optično kontrolo izdelave utrujenostne razpoke po obodu v dnu zareze in večjo točnost meritev premera naglo zlomljenega dela in radialne oddaljenosti šibkega mesta od konice utrujenostne razpoke smo izboljšali z uvedbo digitalnega merilnega mikroskopa za opazovanje zareze (**slika 7 a**) in prelomne površine K_{Ic} -preizkušancev (**slika 7b**).

Pri določevanju lomne žilavosti K_{Ic} sta namreč zelo pomembna točnost izmerjenega premera naglo zlomlje-



Slika 7: Optični merilni mikroskop: a) način opazovanja zareze in b) način opazovanja prelomne površine in merjenje parametrov utrujenostne razpoke (povečava od 3- do 10-krat)

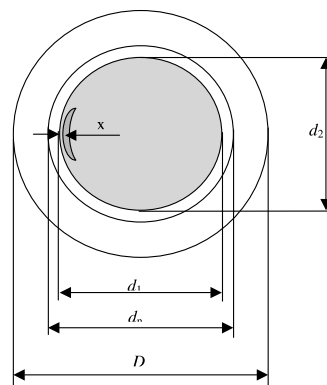
Figure 7: Optical measuring microscope: a) the method of notch sample observation and b) the method of observation of the fracture surface and a measure of the parameters of the fatigue crack (magnification 3 to 10-times)

nega dela (d_1 oziroma d_2) in radialna oddaljenost šibkega mesta od vrha utrujenostne razpoke x (**slika 8**), saj sta ti dve merjeni veličini osnovna parametra pri določevanju lomne žilavosti K_{Ic} ⁷.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

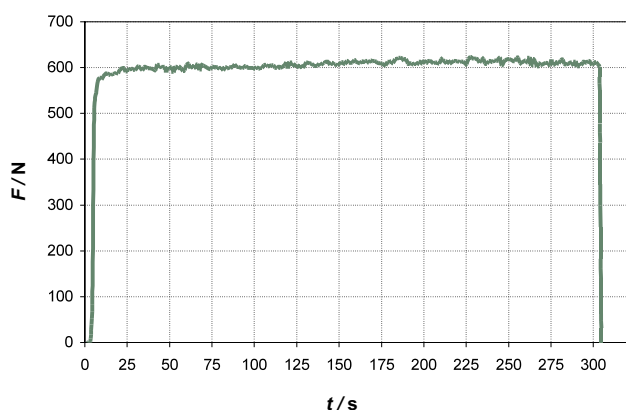
Z uvedbo novega merilnega sistema pri izdelavi utrujenostne razpoke smo pričakovali, da bo mogoče med utrujanjem K_{Ic} -preizkušancev spremljati nastanek in napredovanje utrujenostne razpoke pri konstantni osni sili. Pričakovali smo, da bo med porajanjem razpoke in njenim napredovanjem prišlo do vidnega popuščanja sile. Pokazalo pa se je, da je pri relativno majhni osni sili (cca. 600 N), ki je potrebna za nastanek in napredovanje utrujenostne razpoke celoten sistem merjenja osne sile premalo tog in občutljiv, da bi lahko pri izbranih pogojih utrujanja, ko še ne prihaja do pretiranega in nedovoljenega utrjevanja materiala, zaznali iniciacijo in napredovanje (rast) razpoke.

Značilen zapis odvisnost obremenitve F od časa utrujanja t , ki jo zapišemo z zgoraj opisanim merilnim sistemom pri izdelavi utrujenostne razpoke (globina



Slika 8: Shematični prikaz merjenja geometričnih parametrov prelomne površine preizkušanca in oddaljenosti šibkega mesta x

Figure 8: Schematic representation of the measuring of the geometrical parameters of specimens' fracture surface and weak spot distance x



Slika 9: Značilen zapis odvisnost velikosti obremenitve F od časa utrujanja t , pri izdelavi utrujenostne razpoke v rotacijsko-upogibnem režimu pri K_{Ic} -preizkušanju

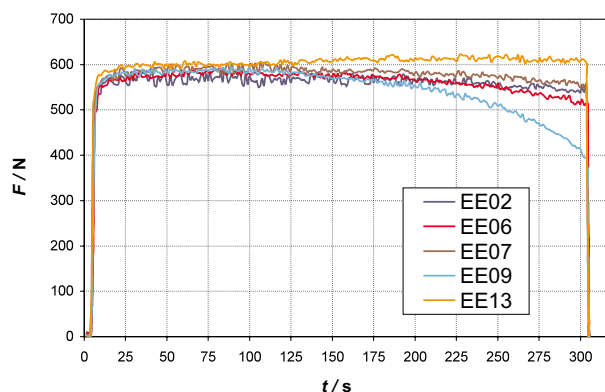
Figure 9: Typical dependence between load F and fatiguing time t , recorded during the crack formation in the rotating bending mode

razpoke $\approx 0,6$ mm) v rotacijsko-upogibnem režimu pri K_{Ic} -preizkušanju je prikazan na **sliki 9**.

Iz diagrama je razvidno, da se material pri napredovanju utrujenostne razpoke med utrujanjem pred njo rahlo utrjuje, saj lahko opazimo postopno naraščanje osne sile. S sistemom merjenja sile torej lahko zaznavamo utrjevanje materiala med utrujanjem pred konico utrujenostne razpoke, po pričakovanju pa tudi začetek izrazitega napredovanja rasti razpoke (hitro upadanje osne sile) v primeru, ko se v smeri napredovanja utrujenostne razpoke v materialu pojavijo večje nehomogenosti. Podoben zapis kot na **sliki 9** smo ugotovili pri večini K_{Ic} -preizkušancev, ki so bili izdelani iz preiskovanega jekla v mehko žarjenem stanju.

Po pričakovanju se je pokazalo merjenje osne sile pri izdelavi utrujenostne razpoke koristno tudi v primeru, ko se v smeri napredovanja utrujenostne razpoke v materialu pojavijo manjše ali večje nehomogenosti, kot so skupki evtektičnih karbidov in nekovinski vključki. Primer hitrega upadanja osne sile smo ugotovili pri izdelavi utrujenostne razpoke pri skupini K_{Ic} -preizkušancev, ki so bili izdelani iz palice z oznako E. Pri vseh K_{Ic} -preizkušancih smo izdelovali utrujenostno razpoko v enakih razmerah, vendar pa smo pri štirih K_{Ic} -preizkušancih ugotovili postopno zmanjšanje osne sile, iz katerega smo sklepali, da je pri teh K_{Ic} -preizkušancih razpoka hitreje napredovala (**slika 10**).

V diagramu (**slika 10**) so prikazani zapisi meritev osne sile pri petih K_{Ic} -preizkušancih, izdelanih iz palice E. Po približno 125 s utrujanja je začela osna sila pri K_{Ic} -preizkušancih EE02, 06, 07 in 09 močno padati, iz česar lahko sklepamo, da je pri teh K_{Ic} -preizkušancih utrujenostna razpoka napredovala hitreje kot pri K_{Ic} -preizkušancu z oznako EE13, ki ima značilen zapis za vse, razen za zgoraj navedene preiskovane vzorce. Pregled prelomne površine je potrdil to predpostavko, saj je iz slik prelomne površine K_{Ic} -preizkušanca EE13 in EE09 jasno razvidno (**slika 11**), da je premer naglo



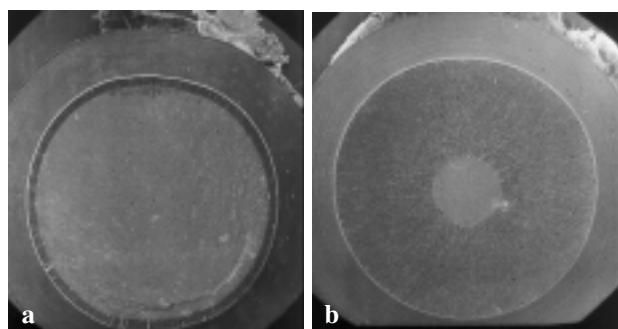
Slika 10: Merjena sila F med utrujanjem petih različnih preizkušancev, izdelanih iz istega materiala

Figure 10: Measured load F during fatigue-crack growth on five different specimens from the same material

zlomljenega dela d pri K_{Ic} -preizkušanju EE09 bistveno manjši kot pri K_{Ic} -preizkušanju EE13.

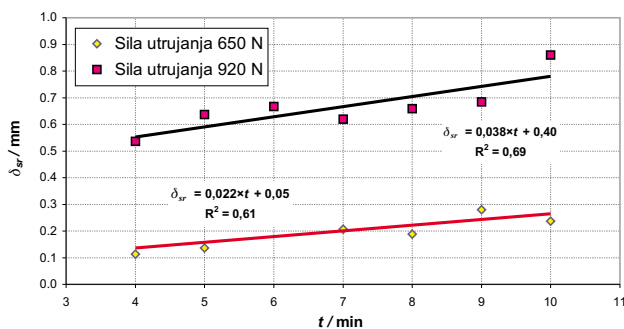
Iz analize prelomnih površin K_{Ic} -preizkušanca EE13 in EE09 pri večji povečavi smo ocenili, da je na prelomnih površinah K_{Ic} -preizkušanca EE09 v primerjavi s prelomnimi površinami K_{Ic} -preizkušanca EE13, prisotna precej večja količina relativno velikih evtektičnih karbidov, ki so lokalno združeni tudi v večje karbidne skupke. Iz **slike 11** je razvidno, da se z izdelavo utrujenostne razpoke v rotacijsko-upogibnem načinu izognemo ekscentričnosti utrujanega območja, globina utrujenostne razpoke pa je enakomerna po obodu.

Merilni sistem, ki ga uporabljamo pri izdelavi utrujenostne razpoke nam omogoča, da za različne materiale, za katere želimo izmeriti lomno žilavost izberemo optimalne pogoje za izdelavo utrujenostne razpoke v dnu zareze K_{Ic} -preizkušancev. V tem primeru na osnovi izkušenj izberemo nekaj različnih obremenitev in različnih časov utrujanja. Nato vzorce prelomimo in izmerimo globino razpok, ki so nastale pri izbranih razmerah utrujanja, narišemo odvisnost med globino



Slika 11: SEM-slika preloma K_{Ic} -preizkušanca EE13 in EE09: a) pravilno izdelana utrujenostna razpoka, EE13 in b) pri katerem je prišlo do pretiranega napredovanja utrujenostne razpoke v dnu zareze; originalna povečava 10-krat

Figure 11: SEM image of the fracture surface of a cylindrical round-notched and fatigue precracked tensile specimen: a) with normal crack size and b) with exaggerated crack growth, original magnification: 10 times



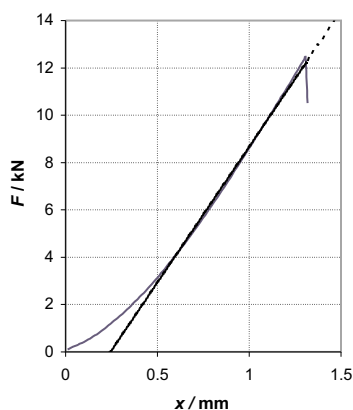
Slika 12: Odvisnost med velikostjo utrujenostne razpoke δ_{sr} in časom utrujanja t za izbrani obremenitvi (sili) utrujanja

Figure 12: The dependence of crack length δ_{sr} and the time of fatigue t for the selected loads, which shows the fatigue crack formation rate

razpoke in časom utrujanja za dano obremenitev (**slika 12**) ter izberemo optimalne razmere utrujanja. Iz nagiba premic lahko ocenimo tudi hitrost napredovanja razpoke $d\delta/dt$ v območju izbranih razmer utrujanja.

Pri določevanju lomne žilavosti K_{Ic} tako krhkih materialov, kot je preiskovano hitrorezno jeklo, je zelo pomembno pravilno registriranje sile pri prelomu K_{Ic} -preizkušanca. To nam omogoča zgoraj opisani sistem za zajemanje, prenos in obdelavo merjenih vrednosti. Merjene vrednosti prenesemo v obliki računalniške datoteke v enega od programov za delo s preglednicami. Z njim narišemo izmerjeno odvisnost med silo in pomikom ter določimo silo, potrebno za porušitev posameznega K_{Ic} -preizkušanca. Značilen zapis, dobljen med kvazistatičnim natezanjem toplotno obdelanih K_{Ic} -preizkušancev do porušitve, je prikazan na **sliki 13**.

Za cilindrični natezni preizkušavec z zarezo po obodu in utrujenostno razpoko v dnu zareze (**slika 1**) zapišemo enačbo za računanje lomne žilavosti v naslednji obliki:



Slika 13: Značilen zapis obremenitev F – pomik vpenjalne glave stroja x , dobljen na univerzalnem statično-dinamičnem servo-hidravličnem preizkuševalnem stroju Instron 1255 pri kvazistatičnem nateznem obremenjevanju toplotno obdelanega preizkušanca do porušitve

Figure 13: Typical diagram load F vs. displacement x , obtained for a quasi-static tensile loading of the finally heat-treated precracked specimens on the universal static-dynamic servo-hydraulic testing machine

$$K_Q = \frac{P}{D^{3/2}} \left(-1,27 + 1,72 \cdot \frac{D}{d} \right) \quad (1)$$

kjer je d premer naglo zlomljenega dela in P obremenitev pri lomu preizkušanca. Enačba (1) velja za razmerje $0,5 < d/D < 0,8$.

Iz diagrama na **sliki 13** je razvidno, da je vedenje K_{Ic} -preizkušanca do loma praktično popolnoma linearno elastično. Samo v začetnem delu krivulja odstopa od linearosti in kaže neko navidezno (posledica prilagoditve celotnega sistema preizkuševalni stroj – vpenjalne glave – preizkušavec; npr. zračnost med preizkušancem in vpenjalnim sistemom itd.), lahko pa tudi dejansko (otopitev konice utrujenostne razpoke) lokalno plastifikacijo materiala. Najverjetneje je to posledica prilagoditve celotnega sistema (preizkuševalni stroj – vpenjalne glave – preizkušavec; na primer zračnost med preizkušancem in vpenjalnim sistemom itd.) na naraščajočo obremenitev. Ker pri vseh preizkusih dobljena odvisnost med silo F in pomikom x pred porušitvijo preizkušanca ni kazala značilnosti duktilnega loma, smo lahko v vseh primerih za izračun lomne žilavosti uporabili enačbo (1).

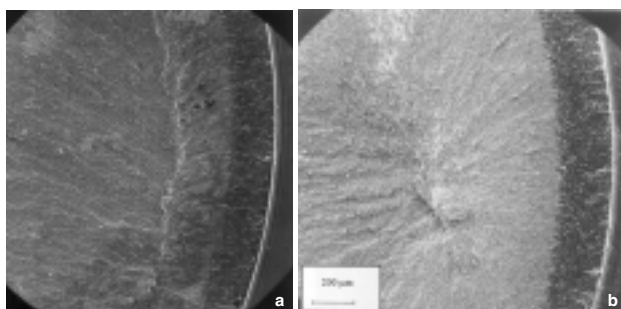
Poleg sile, potrebne za porušitev preizkušanca, moramo določiti še povprečni premer naglo zlomljenega dela $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ in radialno oddaljenost šibkega mesta x

od konice utrujenostne razpoke, ki ima korenski radij približno $0,7 \mu\text{m}$, kot je bilo ocenjeno že v predhodnih raziskavah^{7,9}. Premer naglo zlomljenega dela d in oddaljenost šibkega mesta x od konice utrujenostne razpoke merimo z optično merilno napravo Mitutoyo (**slika 7 b**) pri 10-kratni povečavi, kot je shematsko prikazano na **sliki 8**.

Pravo lomno žilavost preiskovanega materiala K_{Ic} pa določimo s statistično zanesljivostjo pri skupini najmanj šestnajstih K_{Ic} -preizkušancev, saj na pravo vrednost lomne žilavosti K_{Ic} vpliva še radialna oddaljenost šibkega mesta x od konice utrujenostne razpoke (**slika 8**). Sistematične raziskave⁹ so namreč pokazale, da pravo lomno žilavost materiala lahko določimo dovolj konservativno le z linearno aproksimacijo izračunanih pogojnih lomnih žilavosti K_Q v konico utrujenostne razpoke ($x = 0$).

Na osnovi opazovanja velikega števila prelomov hitroreznega jekla, ki je bilo različno izdelano, smo ugotovili, da je oblika šibkega mesta lahko različna. Pri konvencionalno izdelanem hitroreznem jeklu z relativno nizko stopnjo vroče plastične predelave so navadno v matriksu neenakomerno porazdeljena relativno velika neraztopljena karbidna zrna, ki so pogosto združena v skupke, zato se pojavi t. i. kumulativno šibko mesto na prelomni površini, ki se razteza preko določenega področja (**slika 14 a**).

Pri hitroreznih jeklih, ki so bila izdelana po postopku pretaljevanja pod žlindro (EPŽ) ali po postopku metalurgije prahov (P/M-HIP), dobimo po vroči plastični



Slika 14: SEM-posnetek šibkega mesta a) z značilno kumulativno in b) lokalno ozko točkovno omejeno obliko na prelomni površini preizkušanca z dobro vidnimi t. i. Chevronovimi linijami napredovanja preloma; originalna povečava 50-krat

Figure 14: SEM image of a weak spot with: a) characteristic cumulative ligament and b) local point shape on the fracture surface of a specimen; original magnification: 50 times

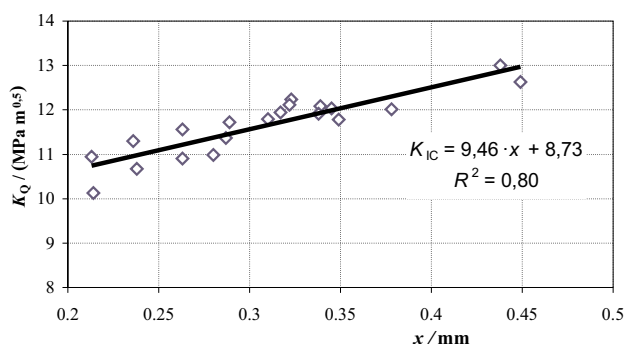
predelavi mikrostrukturo, ki ima enakomerno porazdeljena relativno drobna neraztopljena karbidna zrna brez izrazitih skupkov. V tem primeru se šibko mesto pojavi v t. i. točkasti obliki, **slika 14 b**. O različnih oblikah šibkega mesta poročajo tudi drugi raziskovalci¹⁴. Značilna odvisnost med radialno oddaljenostjo šibkega mesta x od konice utrujenostne razpoke in izmerjeno lomno žilavostjo K_Q , dobljeno za serijo dvajsetih K_{Ic} -preizkušancev, ki so bili enako toplotno obdelani, je prikazana na **sliki 15**. V tem primeru prava vrednost lomne žilavosti K_{Ic} sledi iz ekstrapolacije k $x = 0$, to je v konico utrujenostne razpoke.

V konkretnem primeru je bila izmerjena lomna žilavost K_Q ($11,66 \pm 1,53$) MPa m, prava lomna žilavost K_{Ic} pa 8,73 MPa m. Povprečna trdnost krhkega loma pa (254 ± 30) MPa.

4 SKLEPI

Poznanje pravih oz. dovolj konservativnih vrednosti lomne žilavost K_{Ic} različnih kovinskih materialov je zelo pomembno. Danes se le-ta uporablja kot ena od osnovnih mehanskih lastnosti materiala tudi pri konstruiranju različnih orodij za delo v hladnem, ki so izdelana iz hitroreznih jekel. Uporabniki od proizvajalca jekla zahtevajo zanesljivo metodologijo meritev lomne žilavosti K_{Ic} , ki daje točne in ponovljive rezultate. Zato smo v obstoječo metodologijo merjenja lomne žilavosti s cilindričnimi nateznimi preizkušanci z zarezo po obodu in utrujenostno razpoko v dnu zareze uvedli nekatere izboljšave, ki so pokazale, da:

- inštrumentirano merjenje osne sile med rotacijsko-upogibnim utrujanjem omogoča pripraviti utrujenostno razpoko v dnu zareze K_{Ic} -preizkušancev tako, da so zadoščeni vsi pogoji za veljavno izvedbo meritev lomne žilavosti;
- sistem, ki je povezan z osebnim računalnikom in sproti shranjuje merjene veličine omogoča zanesljivo kontrolo izdelave utrujenostne razpoke in pravočasno izločanje tistih K_{Ic} -preizkušancev, pri katerih je



Slika 15: Izmerjene vrednosti lomne žilavosti K_Q v odvisnosti od oddaljenosti šibkega mesta x od roba utrujenostne razpoke za skupino enako toplotno obdelanih preizkušancev

Figure 15: Measured values for fracture toughness K_Q versus the radial distance x of the main crack initiation site from the fatigue crack frontline for a group of specimens with the same heat treatment

globina razpoke prevelika in ni zadoščeno pogoju: $0,5 < d/D < 0,8$;

- inštrumentirano računalniško podprto spremljanje sile med kvazistatičnim obremenjevanjem K_{Ic} -preizkušancev na univerzalnem preizkuševalnem stroju Instron 1255 omogoča zelo natančno spremljanje in kasnejšo analizo vedenja K_{Ic} -preizkušancev do loma ter natančno odčitavanje sile pri njihovi porušitvi, kar je pri jeklih s tako nizkimi vrednostmi lomne žilavosti izjemno pomembno;
- zelo smo izboljšali natančnost in ponovljivost meritev premera naglo zlomljenega dela d in radialne oddaljenosti šibkega mesta x od konice utrujenostne razpoke na prelomni površini K_{Ic} -preizkušancev z uporabo digitalnega merilnega mikroskopa.

Rezultati meritev lomne žilavosti K_{Ic} konvencionalno izdelanega jekla M2, ki so objavljeni v ref.¹⁰, so potrdili upravičenost uvedbe omenjenih izboljšav pri določevanju lomne žilavosti hitroreznih jekel s K_{Ic} -preizkušanci, pridobljene izkušnje pa uspešno prenašamo tudi na naslednjo skupino jekel, in sicer na orodna jekla za delo v vročem.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujemo Tomažu Španu iz podjetja Conphis, Medvode, za izdelavo programske opreme ter kolegoma Borisu Arzenšku in Tomažu Ahačiču iz IMT, Ljubljana, kakor tudi Tatjani Večko Pirtovšek in Ferdinandu Grešovniku iz Metala Ravne za pomoč pri izvajanju eksperimentalnega dela. Avtorji se zahvaljujejo tudi MŠZŠ Republike Slovenije, ki je finančno podprlo projekt L2-3070 in RP 206-503 ter s tem omogočilo izvedbo raziskav in uvedbo pričujočih izboljšav.

5 LITERATURA

- ¹ F. Nilsson: Fracture Mechanics – From Theory to Application, KTH (Royal Institute of Technology), Stockholm, 2001

- ² M. Janssen, J. Zuidema, R. J. H. Wanhill: Fracture Mechanics, 2-nd Edition, Delft University Press, Delft, 2002
- ³ K. H. Schwalbe, B. K. Neale, J. Heerens: The GKSS test procedure for determining the fracture behaviour of materials, Report GKSS 94/E/60, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, 1994
- ⁴ ASTM E 399-90: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM Standards, april 1991
- ⁵ ASTM E 1820-96: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM Standards, februar 1997
- ⁶ B. Ule et al., Engineering Fracture Mechanic, 65 (2000) 559-572
- ⁷ B. Tuma, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1997, Bachelor's Degree
- ⁸ Shen Wei et al., Engineering Fracture Mechanic, 16 (1982) 69-82
- ⁹ V. Leskovšek, University of Zagreb, 1999, Ph. D. thesis
- ¹⁰ V. Leskovšek et al.: Fracture toughness K_{Ic} , measure for the selection of heat treatment of high-speed steels, Materiali in Tehnologije, 36 (2002) 6, 337-341
- ¹¹ B. Kraut: Pocket handbook of mechanical engineering, TK Zagreb, 1964
- ¹² B. Šuštaršič et al.: Instrumental cell for the behaviour analysis of metal powders during cold uniaxial compaction, Materiali in Tehnologije, 35 (2001) 6, 351-360
- ¹³ Dj. Dobi, B. Šuštaršič: Determination of stress intensity factor K_{Ic} , Instruction manual for experimental testing at IMT, Internal material, Ljubljana 2000
- ¹⁴ I. Dlouchy, Z. Chlup, M. Holzman: Local characteristics of brittle failure assessed from Charpy type specimen, Notch Effects in Fatigue and Fracture, NATO Sciences Series, II. Math., Phys. & Chemistry, Vol. 11, Cluver Academic Publishers, London, 2000