

## LEZENJE PRI UPOGIBNEM OBREMENJEVANJU DISKA

### CREEP PROCESSES DURING DISC BEND LOADING

**BORIS ULE<sup>1</sup>, A. JAKLIČ<sup>1</sup>, B. BRESKVAR<sup>1</sup>, T. ŠUŠTAR<sup>2</sup>, F. DOBEŠ<sup>3</sup>,  
K. MILIČKA<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup>Center za računalništvo v mehaniki kontinuuma, Vandotova 55, 1000 Ljubljana

<sup>3</sup>Institute of Physics of Materials, Academy of Science of the Czech Republic, Žižkova 22, 61662 Brno

*Prejem rokopisa - received: 1998-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1998-10-19*

Merjenje lezenja z majhnim batom je novejša preskusna metoda, ki je bila razvita zato, da bi dobili podatke o lezenju s preizkušanci majhnega volumna. Pri takšni metodi, ki je znana tudi kot metoda preizkušanja z upogibanjem diska, je tanek okrogel disk položen v orodje z odprtino in obremenjen s konstantno obremenitvijo. Disk se najprej plastično deformira, ko pa se intenziteta napetosti v njem zmanjša se še naprej upogiba zaradi lezenja.

Ugotovljeno je bilo, da lahko čas do loma pri tovrstnem preskušanju opišemo z enačbo Dornovega tipa, v kateri pa je napetost zamenjana z obremenitvijo. Aktivacijske energije za lezenje, izračunane s takšno enačbo, pa so celo do ene četrte nižje od tistih, izmerjenih pri konvencionalnem enoosnem merjenju. Skoraj konstantna vrednost obremenitvenega eksponenta v tako modificirani Dornovi enačbi pomeni eksperimentalno potrditev hipoteze, po kateri je preskus z majhnim batom skoraj iso-napetostni.

**Ključne besede:** lezenje, preskušanje z majhnim batom, jekla odporna proti lezenju

The Small Punch creep testing is a recent test technique which is being developed in order to acquire creep properties data from small volume specimens. At such test, also known as a disc bend test, a thin circular disc is placed over a receiver hole and loaded with constant load. The disc first undergoes plastic deformation and when the stress intensity is reduced, it further bulges due to creep process.

It was confirmed that, in the case of small punch test, the time to fracture can be calculated using an equation of the Dorn type, in which load is substituted for stress. If creep activation energies are calculated according to this equation, then the values obtained are even up to one quarter lower than those calculated using data relating to the conventional uniaxial creep test. The almost constant value of the load exponent in the so-modified Dorn equation provides experimental confirmation of the hypothesis that small punch test is in fact isostress creep test.

**Key words:** creep, small punch testing, creep resistant steels

## 1 UVOD

V svetu se je v zadnjih letih uveljavilo preizkušanje mehanskih lastnosti kovinskih materialov s preizkušanci majhnih dimenzij. Ena od takšnih metod je določevanje mehanskih lastnosti z majhnim batom (Small Punch Testing Method), znana tudi kot metoda preizkušanja z upogibanjem majhnega diska (Miniature Disc Bend Testing Method). Osnovni namen te in njej podobnih metod je ugotavljanje mehanskih lastnosti iz najmanjšega možnega volumna materiala. Povzetek zgodnejših raziskovalnih dosežkov na tem področju najdemo v člankih G.E.Lucasa<sup>1-3</sup>. Pri določevanju mehanskih lastnosti kovin z majhnim batom deluje le-ta na tanek disk in ga plastično deformira v odprtino orodja, v katerem je disk nameščen. Pri tem zvezno zapisujemo odvisnost med obremenitvijo in pomikom bata vse do porušitve diska. Manahan et al.<sup>4,5</sup> pa tudi Y. Xu in Z. Zhao<sup>6</sup> sta uporabljala metodo preizkušanja z upogibanjem majhnega diska za določevanje mehanskih lastnosti neobsevanega in obsevanega materiala. Harling et al.<sup>7</sup> je dokazal, da prvi odmik od linearnosti na krivulji obremenitev-pomik bata približno sovпада z enoosno napetostjo tečenja preskusnega materiala in da se s tovrstnim preizkušanjem lahko izmeri tudi druge mehanske lastnosti, na primer duktilnost obsevanih zlitin<sup>8</sup>, ekviva-

lentna lomna duktilnost in lomna žilavost<sup>9</sup> ter plastično delo, potrebno za določitev temperature prehoda iz žilavega v krhko stanje<sup>10</sup>.

V literaturi smo našli le nekaj poizkusov uporabe metode preizkušanja z majhnim batom za sledenje lezenja kovin pri povišanih temperaturah<sup>11,12</sup>. Purmensky in Kupka<sup>11</sup> sta poročala o preskušanju s kroglastimi in cilindričnimi penetratorji različnih dimenzij, Parker in James<sup>12</sup> pa sta dokazala, da so preskusi lezenja majhnih diskastih preizkušancev iz jekla 1/2 Cr 1/2 Mo 1/4 V ponovljivi, preizkušanci pa kažejo deformacijske karakteristike, podobne onim pri konvencionalnih preskušanjih lezenja. Še več, merjenja minimalne hitrosti pomika bata v odvisnosti od obremenitve in temperature so pokazala, da sta izmerjena obremenitveni eksponent in aktivacijska energija blizu vrednostim, ki so značilne za preskušano jeklo. Z našimi raziskavami pa smo želeli poiskati temeljno odvisnost med začetno napetostjo pri konvencionalnem enoosnem merjenju lezenja (pri konstantni obremenitvi) ter obremenitvijo pri merjenju lezenja z majhnim batom, ki dajeta enak čas do loma.

## 2 EKSPERIMENTALNO DELO

Za raziskave smo uporabili dve legirani jekli, odporni proti lezenju pri povišanih temperaturah, namreč nizko-

legirano jeklo 14 MoV 6 3 ter visokolegirano jeklo X 20 CrMoV 12 1 standardne sestave. Jekli sta bili dobavljeni v obliki dveh cevnih kolen z debelino stene 27 mm (14 MoV 6 3) oziroma 22,5 mm (X 20 CrMoV 12 1) in ravnim delom dolžine 250 mm. Cevni kolena sta bili toplotno obdelani v skladu z veljavnimi standardi, dosežene pa so bile naslednje mehanske lastnosti:  $R_{p0,2} = 346$  MPa,  $R_m = 394$  MPa,  $A = 29,8\%$  in  $Z = 80\%$  (14 MoV 6 3) ter :  $R_{p0,2} = 561$  MPa,  $R_m = 794$  MPa,  $A = 20,5\%$  in  $Z = 48\%$  (X 20 CrMoV 12 1).

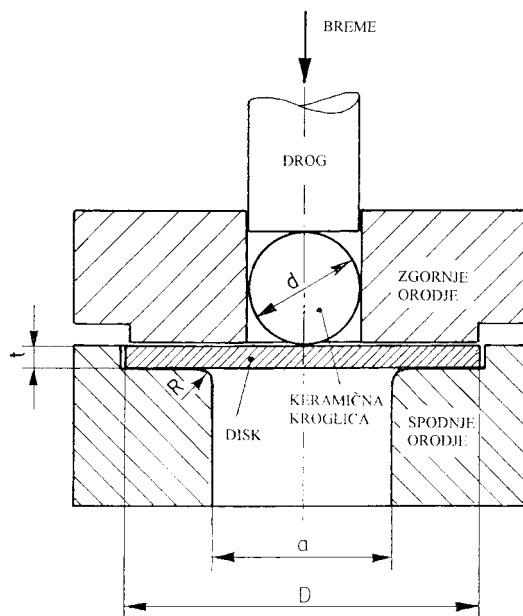
Za konvencionalna enoosna merjenja lezenja smo iz ravnega dela obeh cevnih kolen izdelali večje število cilindričnih nateznih preizkušancev premera 6 mm in merilne dolžine 30 mm. Preizkušanci so bili odvzeti iz sredine stene cevi, vzporedno z njeno vzdolžno osjo. Nasprotno od cilindričnih preizkušancev pa so bili diski premera 8 mm orientirani tako, da je njihova normala sovpadala z radialno smerjo cevi. Tudi diski so bili odvzeti iz sredine stene cevi, pred uporabo pa so bili metalografsko polirani na končno debelino 0,5 mm z dovoljenim odmikom  $\pm 1 \mu\text{m}$ .



**Slika 1.** Preskusna naprava z majhnim batom v laboratoriju za lezenje na IMT v Ljubljani  
**Figure 1.** Small Punch testing equipment in the creep laboratory at the IMT Ljubljana

Eksperimentalno delo je obsegalo konvencionalna enoosna merjenja lezenja, bodisi pri konstantni obremenitvi bodisi pri konstantni napetosti, pri temperaturah 550, 575, 600, 625 in 650 °C. Obremenitve in temperature so bile izbrane tako, da so posamezni preizkusi trajali od nekaj dni pa do nekaj mesecev. Vsi preizkusi so bili opravljeni v zaščitni atmosferi argona. Občutljivost merjenja deformacije je pri uporabljeni merilni dolžini preseгла  $10^{-5}$ , deformacijo pa smo zvezno registrirali s PC-jem.

Merjenja na preskusni napravi z majhnim batom (tako imenovana preskusna naprava Small Punch), prikazani na **sliki 1**, so bila opravljena pri enakih temperaturah kot konvencionalna enoosna merjenja lezenja. Shematsko je osrednji del te naprave prikazan na **sliki 2**, kjer je disk premera  $D = 8$  mm in debeline  $t = 0,5$  mm nameščen v utor v spodnjem delu orodja, čezenj pa je poveznjen zgornji del orodja. Oba dela orodja sta ohlapno spojena, tako da je med diskom in zgornjim delom orodja tanka špranja. Med preskušanjem deluje na disk konstantna obremenitev, ki se prenaša nanj po potisnem drogu in keramični kroglici premera  $d = 2,5$  mm. Disk se zaradi točkasto delujoče obremenitve v začetku najprej plastično deformira in upogne v odprtino premera  $a = 4$  mm v spodnjem delu orodja. Rob te odprtine ima radij  $R = 0,2$  mm. Zaradi upogibanja diska se oprijemni kot med diskom in kroglico povečuje, napetosti v disku se zmanjšajo in lezenje postane regularno. Temperaturo diska smo merili s termoelementom, ki je bil s spodnjo stranjo diska v neposrednem stiku, dovoljeno temperaturno nihanje pa je bilo  $\pm 1$  °C. Upogibanje diska oziroma pomik obremenilnega droga smo merili z vzporedno prigradenim indukcijskim merilnikom pomika



**Slika 2.** Shematski prikaz osrednjega dela preskusne naprave z majhnim batom  
**Figure 2.** Schematic illustration of the central part of the Small Punch testing equipment

z natančnostjo 1  $\mu\text{m}$ , pomik pa smo zvezno registrirali s PC-jem.

### 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

V diagramih na slikah 3 in 4 je prikazana eksperimentalno dobljena odvisnost med časom do loma in uporabljeno napetostjo za obe preiskani jekli<sup>13</sup>. Rezultate smo opisali z enačbo Arrheniusovega tipa:

$$t_f = A_f \sigma^{-n_f} \exp(Q_f/RT)$$

pri čemer je  $t_f$  čas do loma,  $A_f$  konstanta,  $\sigma$  začetna uporabljena napetost,  $n_f$  napetostni eksponent,  $Q_f$  navidezna aktivacijska energija (izračunana iz časa do loma),  $R$  splošna plinska konstanta,  $T$  pa je absolutna temperatura.

Multipna linearna regresijska analiza rezultatov dvajsetih preskusov lezenja pri konstantni obremenitvi, opravljenih na jeklu 14 MoV 6 3 na IMT v Ljubljani, je dala naslednje vrednosti:

$$n_f = 10,7 \pm 0,6$$

$$Q_f = 431 \pm 17 \text{ kJ/mol}$$

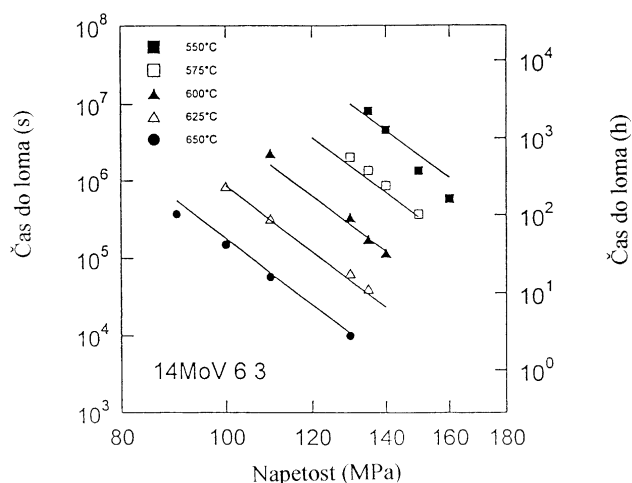
Izmerjena aktivacijska energija se dokaj dobro ujema z literturnimi vrednostmi za podobne vrste jekel in se odlično ujema z vrednostjo, izmerjeno v referenčnem laboratoriju CISE v Milanu (433 kJ/mol).

Podobna analiza rezultatov dvajsetih preskusov lezenja pri konstantni obremenitvi, opravljenih na jeklu X 20 CrMoV 12 1 na IMMT v Krakowu, pa je dala naslednje vrednosti:

$$n_f = 10,6 \pm 0,9$$

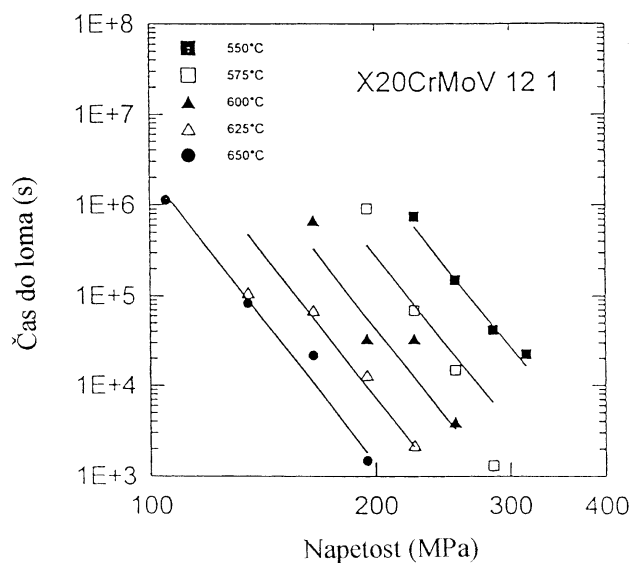
$$Q_f = 461 \pm 44 \text{ kJ/mol}$$

Odmiki pri aktivacijski energiji so v tem primeru sicer nekoliko večji, vendar se izmerjena vrednost tudi



Slika 3. Eksperimentalno ugotovljena odvisnost med časom do loma in uporabljeno napetostjo za jeklo 14 MoV 6 3 /IPM Brno<sup>13</sup>/

Figure 3. Experimentally determined relationship between time to fracture and applied stress for the 14 MoV 6 3 steel /IPM Brno<sup>13</sup>/

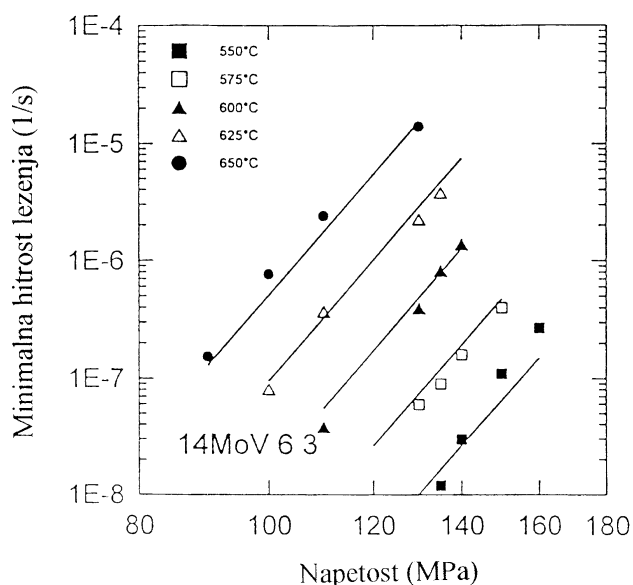


Slika 4. Eksperimentalno ugotovljena odvisnost med časom do loma in uporabljeno napetostjo za jeklo X 20 CrMoV 12 1 /IPM Brno<sup>13</sup>/

Figure 4. Experimentally determined relationship between time to fracture and applied stress for the X 20 CrMoV 12 1 steel /IPM Brno<sup>13</sup>/

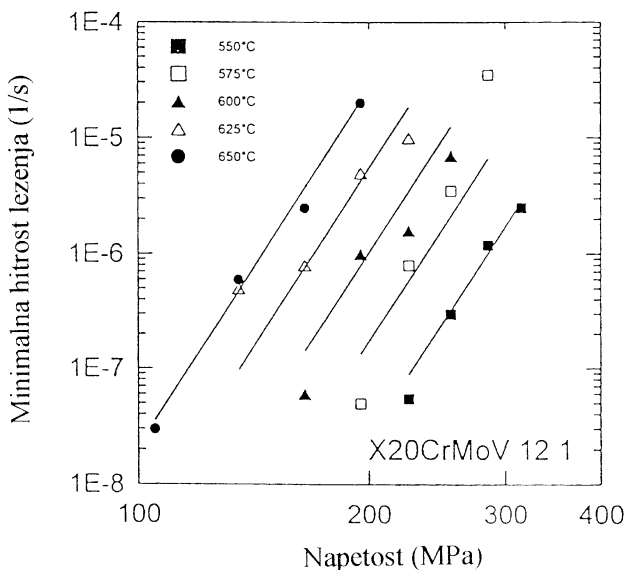
tokrat dokaj dobro ujema s tisto v referenčnem laboratoriju CISE v Milanu (481 kJ/mol).

Odvisnosti med minimalno hitrostjo lezenja in uporabljeno začetno napetostjo pri lezenju pri konstantni obremenitvi smo dobili z odvajanjem krivulj lezenja po času. Te odvisnosti so za obe preiskani jekli prikazane v diagramih na slikah 5 in 6<sup>13</sup>. Tudi tokrat smo rezultate opisali z enačbo Arrheniusovega oziroma Dornovega tipa:



Slika 5. Eksperimentalno ugotovljena odvisnost med minimalno hitrostjo lezenja in uporabljeno napetostjo za jeklo 14 MoV 6 3 /IPM Brno<sup>13</sup>/

Figure 5. Experimentally determined relationship between minimum creep rate and applied stress for the 14 MoV 6 3 steel /IPM Brno<sup>13</sup>/



Slika 6. Eksperimentalno ugotovljena odvisnost med minimalno hitrostjo lezenja in uporabljeno napetostjo za jeklo X 20 CrMoV 12 1 /IPM Brno<sup>13/</sup>

Figure 6. Experimentally determined relationship between minimum creep rate and applied stress for the X 20 CrMoV 12 1 steel /IPM Brno<sup>13/</sup>

$$\dot{\epsilon}_{\min} = A_c \sigma^{n_c} \exp(-Q_c/RT)$$

pri čemer je  $\dot{\epsilon}_{\min}$  minimalna hitrost lezenja,  $A_c$  konstanta,  $\sigma$  začetna uporabljena napetost,  $n_c$  napetostni eksponent,  $Q_c$  navidezna aktivacijska energija (izračunana iz minimalne hitrosti lezenja),  $R$  splošna plinska konstanta,  $T$  pa absolutna temperatura.

Meritve, opravljene na jeklu 14 MoV 6 3 na IMT v Ljubljani, so dale naslednje vrednosti:

$$n_c = 13 \pm 0,7$$

$$Q_c = 463 \pm 18 \text{ kJ/mol}$$

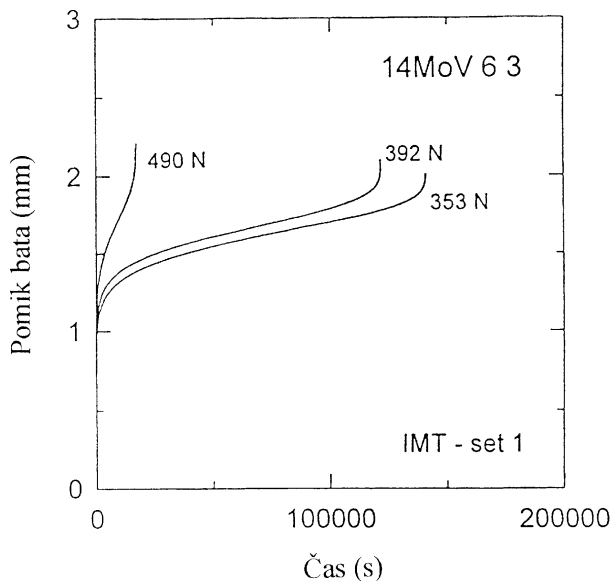
medtem ko je dala analiza meritev, opravljenih na jeklu X 20 CrMoV 12 1 na IMMT v Krakowu, naslednje vrednosti:

$$n_c = 10,3 \pm 0,9$$

$$Q_c = 438 \pm 47 \text{ kJ/mol}$$

Aktivacijska energija, izračunana iz minimalne hitrosti lezenja, se pri jeklu X 20 CrMoV 12 1 razlikuje od vrednosti, ki je bila izmerjena v CISE Milano (513 kJ/mol pri preskusih lezenja, opravljenih pri začetni napetosti 195 MPa). Ker mora biti  $Q_c > Q_f$ , se zdi vrednost, izmerjena pri CISE, natančnejša od one pri IMMT v Krakowu.

V diagramu na sliki 7 je prikazanih nekaj krivulj lezenja jekla 14 MoV 6 3 na preskusni napravi Small Punch na IPM v Brnu<sup>14/</sup>. Krivulje prikazujejo odvisnost med pomikom bata (v mm) in časom (v s). Podobne krivulje smo dobili tudi z enako preskusno napravo na IMT v Ljubljani. Ponovljivost merjenja na isti napravi oziroma v istem laboratoriju je dokaj dobra in se lahko



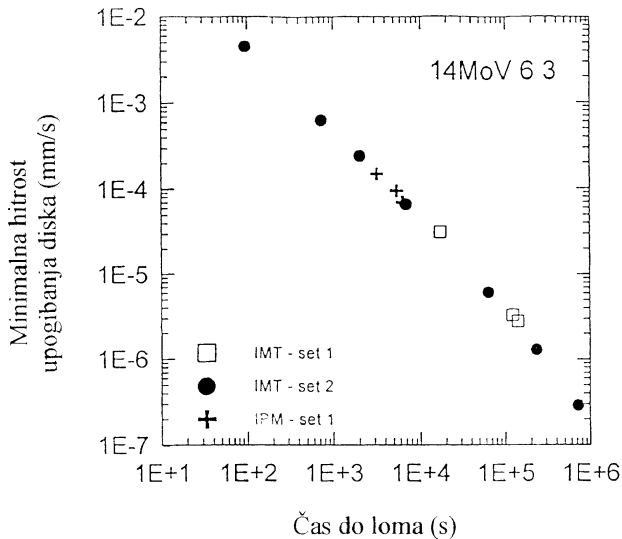
Slika 7. Podajanje diska v odvisnosti od časa za jeklo 14 MoV 6 3 pri temperaturi 600 °C in obremenitvah 353, 392 in 490 N /IPM Brno<sup>14/</sup>

Figure 7. Deflection of the disc plotted against time for the steel 14 MoV 6 3 at a temperature of 600 °C for loads of 353, 392 and 490 N /IPM Brno<sup>14/</sup>

primerja s tisto pri klasičnem merjenju lezenja z enoosnimi nateznimi preizkušanci. Večje pa so bile ugotovljene razlike med posameznimi laboratoriji, to je med različnimi preskusnimi napravami iste vrste. Predpostavljamo, da so te razlike posledica majhnih geometričnih nenatančnosti same naprave pa tudi preizkušancev. Ugotovili smo namreč, da že odmiki pri debelini diska za 1  $\mu\text{m}$  povzročijo spremembo časa do loma za 2 %. Vendar pa tudi nenatančnost pri merjenju temperature za več kot 1 °C povzroči napako pri času do loma celo večjo od 5 %. Nenatančnost pri obremenitvi ima podoben vpliv, kot tista pri temperaturi, vendar pa je obremenitev moč natančno vzdrževati.

S krivulj na sliki 7 je razvidno, da je velik začetni pomik bata (v posameznih primerih za več kot 1 mm v manj kot 1 minuti) posledica začetne plastične deformacije diska v vročem, ko obremenitev deluje na disk še točkasto in so zato lokalne napetosti v njegovem centru zelo velike. Zaradi upogibanja diska se hitro povečuje oprijemni kot med njim in keramično kroglico, napetosti v njem pa se zato močno zmanjšajo. Plastična deformacija postaja vedno bolj zanemarljiva, nadaljnja deformacija pa se odvija le še z lezenjem. Čas do loma lahko odčitamo neposredno s krivulj, kakršne so prikazane na sliki 7, z odvajanjem le-teh po času pa dobimo tudi minimalno hitrost upogibanja diska (minimum deflection rate) v mm/s.

Odvisnost med minimalno hitrostjo upogibanja diska in časom do loma je za jeklo 14 MoV 6 3 prikazana na sliki 8. Tudi pri merjenju lezenja na preskusni napravi Small Punch torej velja podobna Monkman-Grantova odvisnost, kot je pri klasičnem preskušanju lezenja z



Slika 8. Minimalna hitrost podajanja diska v odvisnosti od časa do loma za jeklo 14 MoV 6 3 pri temperaturi 600 °C /IPM Brno<sup>14/</sup>

Figure 8. Minimum deflection rate plotted against time to fracture for the steel 14 MoV 6 3 at a temperature of 600 °C /IPM Brno<sup>14/</sup>.

enoosnimi nateznimi preizkušanci<sup>14</sup>. Posredno to pomeni, da je lezenje res dominantni proces deformacije pri takem preskušanju.

Rezultate merjenj lezenja na tej napravi smo opisali z modificirano enačbo Dornovega tipa, kot sta to predložila že Parker in James<sup>12</sup>. Uporabili smo torej enačbo:

$$t_f = B_f P^{-n_f} \exp(Q_f / RT)$$

kjer je  $t_f$  čas do loma,  $B_f$  konstanta,  $P$  uporabljena obremenitev,  $n_f$  obremenitveni eksponent,  $Q_f$  pa navidezna aktivacijska energija (izračunana iz časa do loma).

Analiza rezultatov, opravljena z multipno linearno regresijo<sup>13,15</sup>, je dala za jeklo 14 MoV 6 3 pri preskušanju z napravo Small Punch na IMT v Ljubljani naslednje vrednosti:

$$n_f = 7,2 \pm 0,3$$

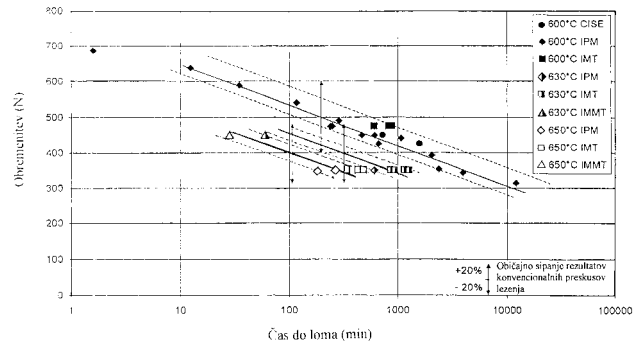
$$Q_f = 320 \pm 10 \text{ kJ/mol}$$

medtem ko so na IPM v Brnu dobili:

$$n_f = 9,3 \pm 0,5$$

$$Q_f = 310 \pm 25 \text{ kJ/mol}$$

Aktivacijska energija, ki smo jo izmerili pri konvencionalnem preskusu lezenja na enoosnih nateznih preizkušancih pri konstantni začetni obremenitvi, je za jeklo 14 MoV 6 3 zelo blizu vrednostim, ki jih v literaturi najdemo za tovrstna malolegirana jekla (približno 430 kJ/mol). Pri preskusu Small Punch pa smo pri istem jeklu izmerili aktivacijske energije, ki so približno za eno četrtino nižje (le 310 do 320 kJ/mol). Do podobnih sklepov smo prišli tudi pri jeklu X 20 CrMoV 12 1, kjer smo pri takem preskusu dobili aktivacijsko energijo približno 444 kJ/mol, pri konvencionalnem preskusu lezenja na enoosnih nateznih preizkušancih pri konstantni začetni obremenitvi pa vrednosti med 460 in 480 kJ/mol (CISE



Slika 9. Uporabljeni obremenitvi v odvisnosti od časa do loma za jeklo 14 MoV 6 3 pri temperaturah 600, 630 in 650 °C. Na sliki so zbrani rezultati iz štirih različnih laboratorijev za lezenje /CISE Milano<sup>16</sup>, MPA Stuttgart<sup>17/</sup>

Slika 9. Applied load plotted against time to fracture for the steel 14 MoV 6 3 at temperatures of 600, 630 and 650 °C. Included in the figure are the results from four different creep laboratories /CISE Milano<sup>16</sup>, MPA Stuttgart<sup>17/</sup>

Milano). Sklepamo, da je nekoliko nižja aktivacijska energija, karakteristična za proces lezenja na preskusni napravi Small Punch, posledica velike začetne plastične deformacije, ki poveča gostoto dislokacij v kovini in olajša nadaljnje lezenje.

V diagramu na sliki 9 je prikazana odvisnost med obremenitvijo (N) in časom do loma (min) pri jeklu 14 MoV 6 3 v temperaturnem območju 600 do 650 °C. Vključeni so rezultati merjenj v štirih raziskovalnih laboratorijih (CISE Milano, IPM Brno, IMT Ljubljana in IMMT Krakow)<sup>16,17</sup>. Iz tega diagrama, v katerem so vrisane tudi meje 20 % sipanja rezultatov, veljavne pri konvencionalnem preskusu lezenja, lahko sklenemo, da je preskus Small Punch v pogledu ponovljivosti rezultatov enako dober kot konvencionalni natezni preskus lezenja pri konstantni začetni obremenitvi.

Bolj pomembne kot razlike med izmerjenima obremenitvenima eksponentoma (7,2 na IMT v Ljubljani oziroma 9,3 na IPM v Brnu), ki so posledica sistematičnih eksperimentalnih napak, nedvomno povezanih s konstrukcijo posameznih preskusnih naprav Small Punch (različno trenje med kroglico in diskom in zlasti med diskom ter orodjem, ki je posledica ne dovolj definiranih pogojev prileganja delov orodja), je dejstvo, da so izmerjeni eksponenti na posamezni napravi skoraj konstantni (odmiki so manjši od 5 %). To pa pomeni, da za izračunavanje časa do loma pri preskusu Small Punch res lahko uporabljamo modificirano Dornovo enačbo, v kateri je začetna napetost zamenjana z obremenitvijo. Še več, konstantnost obremenitvenega eksponenta v tako modificirani Dornovi enačbi pomeni eksperimentalno potrditev dejstva, da je – neodvisno od obremenitve – napetost pri preskusu Small Punch skoraj konstantna (v mejah, v katerih ta ugotovitev velja tudi za konvencionalni preskus lezenja pri konstantni obremenitvi, to je konstantni začetni napetosti). Z drugimi besedami, v tem primeru gre dejansko skoraj za iso-napetostni preskus. Ta eksperimentalna ugotovitev je bila nedavno potrjena z

najnovejšimi literaturnimi podatki. Norris in Parker<sup>18</sup> sta namreč pri merjenju obremenitve, ki povzroči tečenje oziroma lom pri upogibanju diska iz zelo čistega aluminija, ugotovila naslednje: za material z zadostno duktilnostjo, pri katerem je kontaktna površina med batom in diskom pred lomom kar se da velika, je izraz, ki povezuje kritično lomno obremenitev z natezno trdnostjo materiala odvisen od debeline diska  $t$ , premera kroglice  $d$  in špranje med kroglico in steno odprtine v spodnjem delu orodja  $Cl$  (die clearance). Pri tem je  $Cl = a - (d + 2t)$ , pri čemer smo z  $a$  označili premer odprtine v spodnjem delu orodja. Upoštevajte naše podatke:  $t = 0,5$  mm,  $d = 2,5$  mm in  $a = 4$  mm, dobimo za  $Cl$  vrednost 0,5 mm, za razmerje med kritično obremenitvijo (N) in natezno napetostjo (MPa) pa, v skladu z ugotovitvami Norrisa in Parkerja<sup>18</sup>, konstantno vrednost približno 2,96. Tako je iso-napetostna narava preskusa Small Punch tudi teoretično utemeljena.

#### 4 SKLEPI

V članku je obravnavana primerjava rezultatov konvencionalnega preskusa lezenja in tistega na napravah Small Punch in sicer na dveh vrstah jekel (14 MoV 6 3 ter X 20 CrMoV 12 1) v štirih različnih evropskih laboratorijih. Potrjeno je bilo, da tudi za opis lezenja na napravah Small Punch lahko uporabimo Dornovo enačbo, v katero pa namesto napetosti vstavimo obremenitev. Aktivacijske energije, izračunane s tako modificirano enačbo, pa so nekoliko nižje od tistih, izmerjenih pri konvencionalnem preskusu lezenja z enoosnimi nateznimi preiskuvanci pri konstantni obremenitvi. Sklepamo, da je vzrok povečana gostota dislokacij v kovini zaradi velike začetne plastične deformacije v vročem, ko kroglica deluje na disk še točkasto in so napetosti v centralnem delu diska še zelo velike.

Čeprav se obremenitveni eksponenti v Dornovi enačbi, izmerjeni na različnih napravah Small Punch, med seboj razlikujejo, pa so te vrednosti – če so izmerjene na isti napravi – skoraj konstantne. Pomeni, da Dornovo enačbo lahko uspešno uporabljamo za izračunavanje časa do loma tudi v tem primeru. Skoraj konstantna vrednost obremenitvenega eksponenta pa pomeni tudi, da je preskus Small Punch praktično iso-napetostni (Originalna Dornova enačba namreč velja za konvencionalni preskus lezenja pri konstantni napetosti). To dejstvo je bilo eksperimentalno potrjeno z najnovejšimi ugotovitvami Norrisa in Parkerja<sup>18</sup>, ki sta ugotovila, da je razmerje med kritično lomno obremenitvijo in natezno trdnostjo pri upogibnem obremenjevanju diska odvisno le od debeline diska in geometrije preskusne naprave.

Primerjava rezultatov iz različnih laboratorijev je pokazala, da je ponovljivost preskusa Small Punch dokaj dobra in povsem primerljiva s ponovljivostjo pri konvencionalnem preskusu lezenja. Do sistematičnih odmikov pri rezultatih različnih laboratorijev pa lahko pride zaradi

eksperimentalnih nenatančnosti, ki vključujejo nenatančnost debeline diskov, obremenitve in temperature, zlasti pa neizenačenost razmer pri trenju in prileganju diska ter delov orodij na različnih preskusnih napravah.

#### Zahvala

Raziskovalno delo je bilo opravljeno v okviru raziskovalnega projekta COPERNICUS z naslovom: "Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components", in sicer po pogodbi ERB CIPA CT 94 0103. Na tem mestu se zato zahvaljujemo za finančno podporo EU.

#### 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> G.E.Lucas: *Journal on Nuclear Materials*, 117 (1983) 327
- <sup>2</sup> G.E.Lucas, A. Okada, and M. Kiritani: *Journal of Nuclear Materials*, 141-143 (1986) 532
- <sup>3</sup> G.E.Lucas: *Metallurgical Transactions* 21A (1990) 1105
- <sup>4</sup> M.P.Manahan, A.S.Argon and O.K.Harling: *Journal of Nuclear Materials*, 103-104 (1981) 1545
- <sup>5</sup> M.P.Manahan, A.E.Browning, A.S.Argon and O.K.Harling, ASTM-STP-888, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, 17
- <sup>6</sup> Y.Xu and Z.Zhao, *Journal of Testing and Evaluation*, 23 (1995) 300
- <sup>7</sup> O.Harling, M.Lee, D.S.Sohn, G.Kohse and C.W.Lau: ASTM-STP-888, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, 50
- <sup>8</sup> F.H.Huang, M.L.Hamilton and G.L.Wire: *Nuclear Technology*, 57 (1982) 234
- <sup>9</sup> M.R.Bayoumi and M.N.Bassim: *International Journal of Fracture*, 23 (1983) 71
- <sup>10</sup> J.M.Baik, J.Kameda and O.Buck: *Scripta Metallurgica*, 17 (1983) 71
- <sup>11</sup> J.Purmensky and V.Kupka: *Hutnické listy*, 48 (1993) 65
- <sup>12</sup> J.D.Parker and J.D.James: Proceedings of the Fifth International Conference on the Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, The Institute of Metals, London, 1993, 651
- <sup>13</sup> F.Dobeš and K.Milička: Copernicus-Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components (ERB CIPA CT 94 0103), Technical Report: Evaluation of Conventional Creep Tests, IPM Brno, 1997
- <sup>14</sup> F.Dobeš and K.Milička: Copernicus-Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components (ERB CIPA CT 94 0103), Technical Report: Results of Preliminary Small Punch Tests, IPM Brno, 1997
- <sup>15</sup> B.Ule, T.Šuštar and T.Rodič: Copernicus-Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components (ERB CIPA CT 94 0103), Technical Report: Round Robin of Small Punch Creep Tests, IMT Ljubljana, 1997
- <sup>16</sup> V.Bicego and S.Tettamanti: Copernicus-Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components (ERB CIPA CT 94 0103), Technical Report: Milestone Report on SP Test Technique, CISE Milano, 1997
- <sup>17</sup> K.Maile et al.: Copernicus-Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components (ERB CIPA CT 94 0103), Final Report, MPA Stuttgart, 1998
- <sup>18</sup> S.D.Norris and J.D.Parker: *Materials Science and Technology*, 12 (1996) 163