

Temperaturna utrujenost jekel

Thermal Fatigue of Steels

L. Kosec, N. Igerc, B. Kosec, B. Godec, Oddelek za montanistiko, FNT, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 20

in

B. Urnaut, Železarna Ravne, Ravne na Koroškem

Predstavljene so osnovne povezave med parametri nastanka in rasti razpoke ter med napetostno-deformacijskimi parametri v temperaturnem krogu, ki pripeljejo do temperaturne utrujenosti. Opisani so nekateri rezultati raziskave temperaturnega utrujanja jekel za plašče valjev za kontinuirno litje trakov iz aluminija.

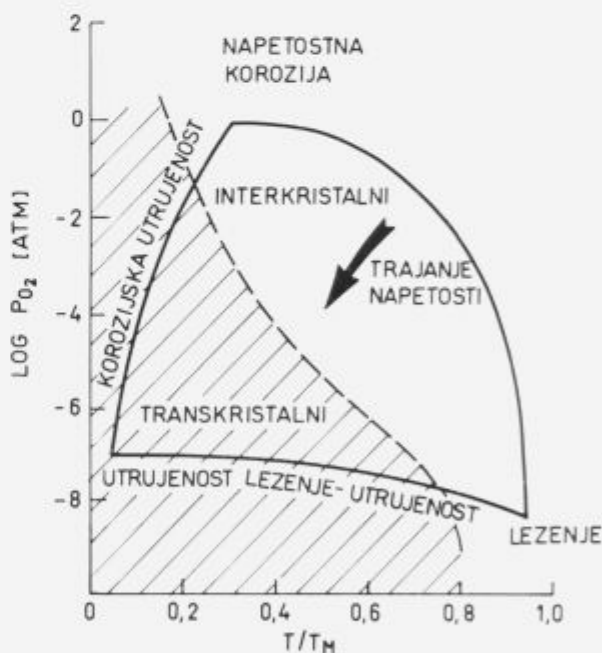
Thermal fatigue is time-limiting factor for tools and another technical component, which work in nonstationary temperature field. Process of thermal fatigue is divided into two stages: crack initiation and crack propagation. We have investigated the resistance to thermal fatigue of a series of laboratory and commercial steels for caster shells. From repeated heating and cooling cycle by strip casting of aluminium and from mechanical properties of group of steels, we have ranged these steels on the base of cycles to crack initiation and on the base of resistance to temper softening. Internal stresses and thermal shocks contribute also to failure of caster shells.

Temperaturna utrujenost je časovno omejitveni faktor za mnoge dele konstrukcij in orodij, ki delajo v nestacionarnem temperaturnem polju¹⁻⁵. To je poseben primer utrujenosti, pri katerem so spremembe napetosti in deformacij posledica spreminjanja temperature. Nad temperaturo približno $1/3T_M$ (T_M temperatura tališča kovine) začne t.i. visokotemperaturna utrujenost. Nad to temperaturo postanejo mikrostrukturne sestavine nestabilne, kar se kaže v pojavih deformacijskega staranja in pojavih različnih precipitacij iz trdnih raztopin, geometrijski nestabilnosti faz, krhkosti in v spremembah kristalne zgradbe. Ti visokotemperaturni pojavi kažejo utrujenost kot del kompleksnih pojavov poškodovanja kovinskih materialov s katerimi sta tesno povezana tudi lezenje in oksidacija (slika 1).

Znanje o temperaturni utrujenosti narašča na račun teoretičnih raziskav in z uporabnimi raziskavami. Med obema vrstama raziskav so pogosta razhajanja. Nekateri bistveni parametri temperaturne utrujenosti se lahko opišejo s standardnimi enačbami pojava utrujenosti (Coffin-Mansonova in Parisova enačba). Obe ti enačbi vsebujeta mehanistične parametre za razliko od materialnih parametrov, kar onemogoča praviloma neposredno primerjavo določenih kovin.

Rezultati zbrani v strokovni literaturi kažejo, da sta npr. pri jeklih za delo v vročem napetost tečenju na določeni temperaturi in popuščna obstojnost najbolj pomembna parametra za oceno odpornosti proti temperaturni utrujenosti. V primerih, ko je temperaturna utrujenost malociklične narave (teh primerov je največ), pa se pripisuje pomembna vloga tudi žilavosti jekla.

Proces temperaturne utrujenosti je kontroliran z menjajočo elastično in plastično deformacijo kovine v temperaturnem krogu med najnižjo (T_1) in najvišjo (T_2) temperaturo. Med tema temperaturama je celotni temperaturni



Slika 1. Pogoji za nastanek poškodb zaradi utrujenosti, lezenja in oksidacije⁶.

Figure 1. Schematic interactions among fatigue, creep and corrosion.

raztezek v izotropni kovini:

$$\epsilon_c = \alpha(T_2 - T_1), \quad (1)$$

kjer je α poprečna vrednost temperaturnega razteznostnega koeficienta v tem krogu. Celotni raztezek je sestavljen iz elastičnega (ϵ_e) in plastičnega (ϵ_p) deleža. Iz osnovnih

mehanskih lastnosti jekla se lahko oceni velikost elastičnega dela raztezka pri obeh mejnih temperaturah:

$$\epsilon_{e1} = \frac{1 - \nu_1}{E_1} \sigma_1 \quad \text{in} \quad \epsilon_{e2} = \frac{1 - \nu_2}{E_2} \sigma_2, \quad (2)$$

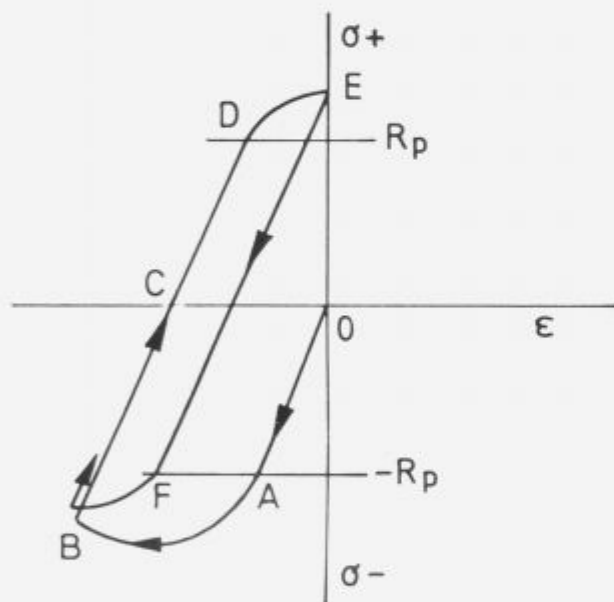
kjer sta σ_1 in σ_2 napetosti tečenja, E_1 in E_2 modula elastičnosti, ν_1 in ν_2 pa Poissonovi števili pri temperaturah $T_1(1)$ in $T_2(2)$. Pri prvem ogrevanju je plastični delež temperaturnega raztezka:

$$\epsilon_p^0 = \alpha(T_2 - T_1) - \frac{1 - \nu_2}{E_2} \sigma_2 \quad (3)$$

in je tlačne narave. Pri ohlajanju s temperature T_2 do T_1 je delež plastičnega raztezka:

$$\epsilon_p = \alpha(T_2 - T_1) - \frac{1 - \nu_2}{E_2} \sigma_2 - \frac{1 - \nu_1}{E_1} \sigma_1. \quad (4)$$

Prvi temperaturni krog je poseben in sestoji pri segrevanju iz negativnih (tlačnih), pri ohlajanju pa iz pozitivnih (nateznih) plastičnih deformacij. Vsi naslednji krogi so enaki in imajo enako velike plastične deformacije pri segrevanju (tlak) in ohlajanju (nateg) (slika 2).



Slika 2. Napetostno-deformacijski krog zaradi časovno temperaturnega kroga. (OB prvo ogrevanje, BE prvo ohlajanje).

Figure 2. Strain-stress cycle. (OB first heating, BE first cooling).

Če v temperaturnem krogu plastična deformacija (ϵ_p) preseže elastično (ϵ_e) je izpolnjen pogoj za malociklično utrujenost. Večina poškodb zaradi menjajočih temperatur oziroma temperaturne utrujenosti pripada temu procesu. Malociklična utrujenost se torej pojavi, če je izpolnjen naslednji pogoj:

$$\alpha(T_2 - T_1) > 2 \frac{1 - \nu_1}{E_1} \sigma_1 + 2 \frac{1 - \nu_2}{E_2} \sigma_2. \quad (5)$$

Čas do začetka razpoke (število temperaturnih krogov) se lahko oceni iz Coffin-Mansonove enačbe:

$$N_f^n \epsilon_p = C \epsilon_f, \quad (6)$$

kjer pomenijo:

N_f^n	število temperaturnih krogov do razpoke
ϵ_p	velikost plastične deformacije v vsakem krogu
ϵ_f	deformacijo pri porušitvi;

n ($0 < n < 1$) in C ($0 < C < 1$) pa sta mehanistična parametra, katerih velikost pa znotraj zgornjih meja ni preveč natančno definirana.

S pomočjo zgornjih enačb (4 in 6) se lahko začetek razpoke oceni iz lastnosti kovine pri obeh mejnih temperaturah kroga:

$$N_f = \left(\frac{C \epsilon_{f1}}{\alpha(T_2 - T_1) - \frac{1 - \nu_2}{E_2} \sigma_2 - \frac{1 - \nu_1}{E_1} \sigma_1} \right)^{1/n}. \quad (7)$$

Razpoka nastane in napreduje praviloma zaradi nateznih napetosti, ki so največje pri spodnji temperaturi kroga (zato ϵ_{f1}). Hitrost rasti razpoke je tudi povezana s plastično deformacijo kovine:

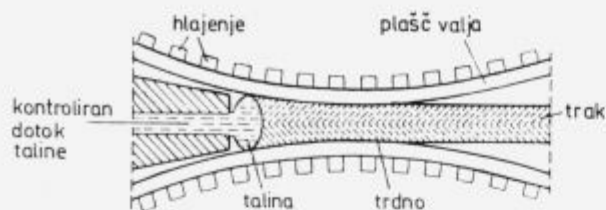
$$\frac{da}{dN} = \rho a \epsilon_p^q, \quad (8)$$

kjer je a dolžina razpoke, N število temperaturnih krogov, ρ in q pa pozitivni konstanti. Te vrste analiza pove, da se lahko začetek in širjenje razpoke poveže z mehanskimi lastnostmi jekla pri ekstremnih temperaturah kroga. Za tako oceno so pomembne lastnosti: temperaturni razteznostni koeficient, napetost tečenja, modul elastičnosti in Poissonova števila na obeh mejah kroga. Natančnost meritev teh lastnosti približa račun eksperimentu. Samo uporaba $R_{p0.01}$ namesto $R_{p0.02}$ izboljša natančnost rezultatov za 10–20%.

S poskusi je lažje preveriti veljavnost izrazov o začetku razpoke kot o njenem širjenju. Širjenje razpoke spremljata še dva pojava: popuščanje jekla in z njim povezano zmanjševanje mehanskih lastnosti ter oksidacija sten razpoke, ki povzroči še dodatne napetosti. Zmanjševanje mehanskih lastnosti zaradi popuščanja jekla se skuša eliminirati pri preizkusih s krajšimi temperaturnimi krogi, posebno še s krajšim držanjem jekla okrog višje temperature kroga. Veliko pa se pričakuje tudi od tega, da bi spremembe mehanskih lastnosti uporabili v zgornjih enačbah v obliki časovno in temperaturno odvisnih funkcij.

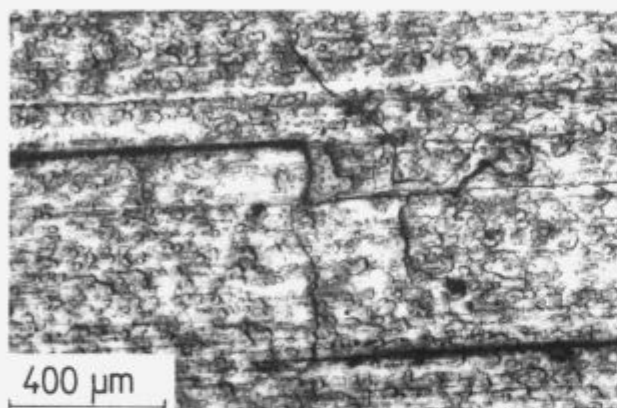
Uporabne raziskave temperaturne utrujenosti se zelo veliko ukvarjajo z jekli za delo v vročem, saj so ta jekla najbolj pogosto gradivo za različna orodja in konstrukcijske dele, ki delajo pri povišanih in visokih temperaturah. Za preizkušanje odpornosti proti temperaturni utrujenosti se uporabljajo različno oblikovani preizkušanci, ki se ogrevajo v talinah soli ali kovin ali induktivno s tokom visoke frekvence. Noben od teh načinov preizkušanja ni standardiziran in zato puščajo svobodo iznajdljivosti. Indukcijsko ogrevanje omogoča veliko širino hitrosti ogrevanja in tudi več možnosti pri ohlajanju, ter se lahko po izvedbi poskusa zelo približa dejanskim razmeram na orodjih in drugih delih.

Zanimanje za temperaturno utrujenost jekel je zrastle iz analize poškodb orodij in razvoja jekel za več vrst orodij za delo v vročem. Eno takih orodij so tudi valji za kontinuirno litje trakov iz aluminija in aluminijevih zlitin. Sestavljeni so iz obnovljivega plašča in trajnega jedra, ki ima na površini gosto mrežo kanalov za pretok hladilne tekočine, ki hladi z notranje strani plašč (slika 3). Hladilna tekočina prevzame praktično vso toploto, ki nastane pri strijevanju in ohlajanju traku med valji. Valj se sestavi s krčnim nasedom. Zaradi temperaturne utrujenosti nastane na površini



Slika 3. Shema dela obeh valjev s šobo izlivnika pri kontinuirnem litju aluminijevega traku.

Figure 3. Schema of feeder tip and cooling rolls.



Slika 4. Mreža razpok na površini valja za kontinuirno litje aluminijevega traku. Površina je bila posneta s pomočjo replike iz plastične snovi. Vzdolžne širše razpoke so v smeri zarez zaradi brušenja površine. Pov. 50×.

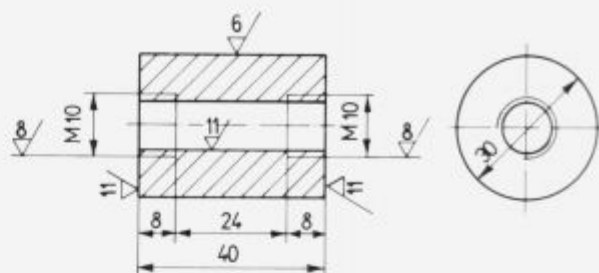
Figure 4. Heat checking on surface of caster shell. Replica technique. Longitudinal cracks in grinding direction.

mreža razpok (slika 4). S časom se pogostost razpok v mreži močno poveča, razpoke rastejo tudi v globino in so različno dolge. Temena razpok se razširijo. Zato ostane na površini trakov odtis mreže razpok, ki je ni moč s predelavo zabrisati. Poškodovana površina valja se odbrusi do globine najdaljših razpok. To se lahko ponavlja do neke minimalne preostale debeline plošče. Ko se doseže ta debelina plašča, se valj obnovi z novim plaščem.

Temperaturne razmere, v katerih dela jeklo zamenljivega plašča valja, se dajo dobro posnemati s pomočjo preizkušanca na sliki 5. Preizkušane je votel valj, skozi katerega ves čas poskusa teče hladilna tekočina (enako kot skozi valj), površina pa se periodično ogreva s tokom visoke frekvence in nato hladi.

Nastanek in širjenje mreže razpok se med poskusom opazuje z mikroskopom. Opazovanje moti oksidacija površine, zaradi katere so pogoji preizkušanja jekla zahtevnejši od onih, ki jim je podvrženo jeklo na površini valja pri kontinuirnem litju trakov. Pri litju trakov je površina takrat, ko je temperatura najvišja, zaščitena pred dostopom zraka s talino oziroma trakom. Ko pa se aluminijev trak loči od površine valjev, pa je temperatura že tako nizka, da ni več nevarnosti oksidacije.

Odpornost jekel proti temperaturni utrujenosti smo ocenjevali na dva načina. Neposredno z merjenjem časa oziroma števila temperaturnih krogov do nastanka razpoke in hitrostjo širjenja razpoke; posredno pa z merjenjem



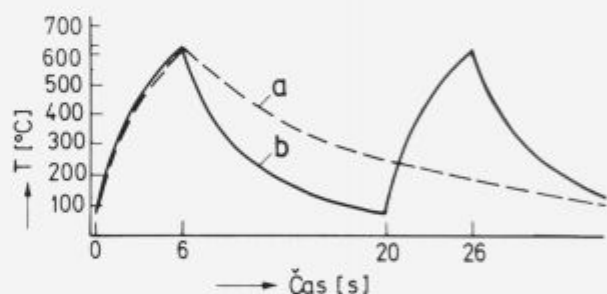
Slika 5. Preizkušalec za ugotavljanje temperaturne utrujenosti jekla.

Figure 5. Sample for thermal fatigue testing.

popuščne obstojnosti jekel ter mehanskih lastnosti na obeh skrajnih temperaturah kroga. Parametre temperaturnega kroga smo določili glede na temperaturni režim na površini valjev za kontinuirno litje trakov iz aluminija v TGA v Kidričevem.

Najvišja temperatura na površini valjev je bila pri litju aluminijevih trakov približno 630°C, najnižja pa 50°C. Valj se je obrnil poprečno v 120 sekundah.

Pri poskusih smo obdržali ekstremni temperaturni krog, čas pa smo skrajšali zato, da bi zmanjšali efekt popuščanja jekla in da bi jih opravili v sprejemljivem času (slika 6).



Slika 6. Temperaturni krog pri litju aluminijevega traku (a) in pri preizkušanju jekla na temperaturno utrujenost (b).

Figure 6. Temperature cycle by aluminium strip casting (a) and by thermal fatigue testing.

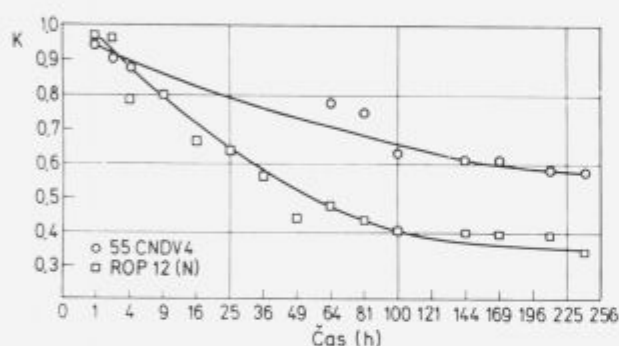
Jekla smo toplotno obdelali (poboljšali) po režimu, ki je bil priporočen v strokovni literaturi in laboratorijsko preverjen. Izkazalo se je, da velikost temperature popuščanja jekla po kaljenju, če seveda ne preseže največje temperature kroga, ne vpliva bistveno na kinetiko sprememb mehanskih lastnosti zaradi popuščanja jekla pri delovnih temperaturah. Zato smo jekla po kaljenju popuščali na temperaturi, ki je bila enaka zgornji temperaturi kroga. To se je pokazalo dobro tudi pri delu valjev.

Za te namene se danes uporabljajo pretežno nizkolegirana in tudi srednjelegirana malo in srednjeogljikna jekla, v katerih se popuščna obstojnost kontrolira z deležem kroma, predvsem pa z deležema molibdena in vanadija. Med jekli za te namene so preizkušali celo maraging jekla.

Za nekatera jekla, ki jih je že ali pa jih v prihodnje namerala za te namene izdelovati Železarna Ravne, so podatki o odpornosti proti popuščanju in o spremembah mehanskih lastnosti med dolgotrajnim popuščanjem na obeh ekstremnih temperaturah kroga na slikah 7 in 8.

Tabela 1.

Jeklo	Kemična sestava (%)				
A (30CD12)	C	S	Si	Cr	Ni
	0.36	0.021	0.30	3.15	0.34
	Mn	Mo	V	P	Al
	10.50	1.04	0.25	0.012	-
B (ROP12)	C	S	Si	Cr	Ni
	0.16	0.017	0.30	2.96	0.21
	Mn	Mo	V	P	Al
	0.21	0.21	0.79	0.012	0.02
C (55CNDV4)	C	S	Si	Cr	Ni
	0.54	0.025	0.22	1.17	0.70
	Mn	Mo	V	P	Al
	0.43	0.53	0.16	0.012	0.01
D (X33CrMoV33)	C	S	Si	Cr	Ni
	0.31	0.020	0.14	2.61	0.10
	Mn	Mo	V	P	Al
	0.25	2.64	0.43	0.016	0.07



Slika 7. Relativni padec trdote jekel B in C po popuščanju na temperaturi 630°C. (K je primerjava s trdoto jekla po popuščanju 1^h na 630°C).

Figure 7. Temper softening of steels B and C (K-relative to tempering 1^h at 630°C).

Začetek utrujenostnih razpok je odvisen od najvišje temperature kroga. Za eno pogosto uporabljenih in kvalitetnih jekel za obnovljive plašče valjev (A) je odvisnost med zgornjo temperaturo kroga in številom krogov do začetka razpoke zelo podobna Wohlerjevi krivulji za trajno dinamično trdnost (slika 9), kar posredno tudi kaže na povezavo med temperaturo, deformacijami in napetostmi v temperaturnem krogu.

Rezultati dobjeni s pomočjo preizkušanca s slike 4 so bili za jeklo A boljši za približno 20% od podatkov, ki smo jih dobili od uporabnikov valjev (KAT, Titograd) o masi odlitih trakov in potrebni globini brušenja. Računsko preverjanje na osnovi Coffin-Mansonove enačbe pa ni bilo mogoče, ker nismo uspeli izmeriti modula elastičnosti pri zgornji temperaturi kroga.

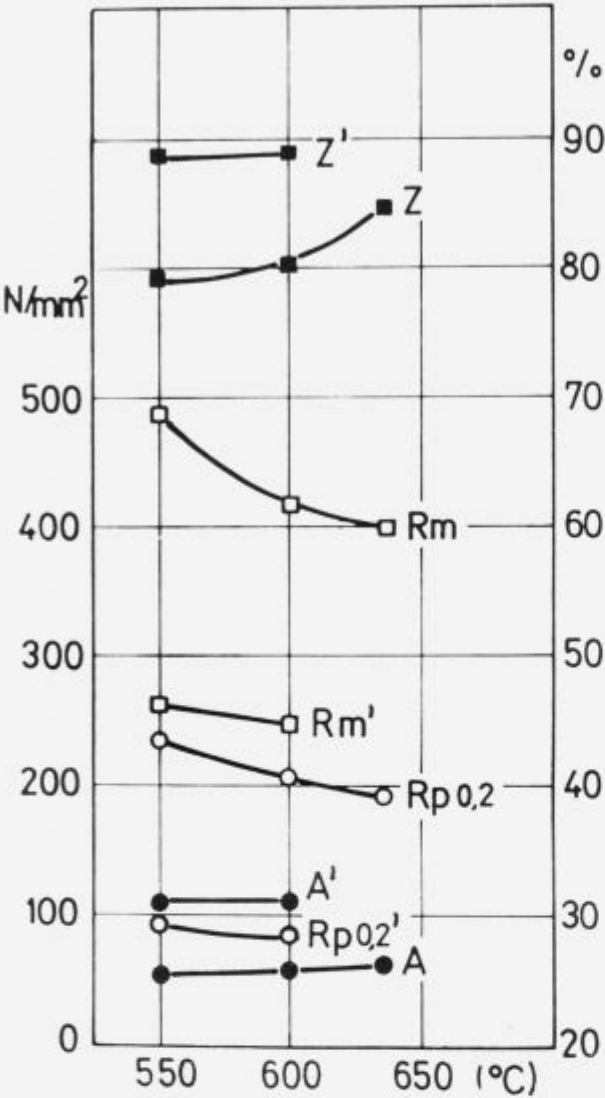
Sklepi

Občutljivost jekel na temperaturno utrujenost lahko preizkušamo na praktičnem primeru zelo prilagojene

načine. O odpornosti proti temperaturni utrujenosti lahko sklepamo tudi iz odpornosti jekla napram popuščanju in iz mehanskih lastnosti pri zgornji in spodnji temperaturi temperaturnega kroga. Napetosti zaradi krčnega naseda, koncentracije napetosti zaradi mehanske obdelave površine, zaostale napetosti zaradi drugih vzrokov in temperaturni udarci skrajšajo čas do nastanka razpok, lahko pa povzročijo tudi trenutno porušitev plašča.

1 Literatura

- ¹ Sandström R., Samuelsson A., Larsson L.E., Co. Lundberg L. in Scand. J. Metallurgy 12 (1983), 99–106
- ² Nes E., Co. Slevolden S., Aluminium 55 (1979), 319
- ³ Solomon H.D., Met. Trans. 4 (1975), 341
- ⁴ Malm S., Co. Norström L.A., Met. Sci. 13 (1979), 544
- ⁵ Nes E., Fartum P., Scand. J. Metallurgy 12, (1983)
- ⁶ Wells C.H., High Temperature Fatigue, Fatigue and Microstructure, 307–333, (1985)



Slika 8. Mehanske lastnosti jekla B pri temperaturi 630°C po kratkotrajnem popuščanju (1^h) na temperaturah 500, 600 in 630°C in naknadnem dolgotrajnem popuščanju ($'$) na temperaturi 630°C (196^h).

Figure 8. Mechanical properties of steel B at 630°C after 1^h tempering at 500, 600, 630°C and long time tempering ($'$) at 630°C (196^h).



Slika 9. Začetek razpok (število temperaturnih krogov) pri različnih najvišjih temperaturah kroga za jeklo A.

Figure 9. Number of temperature cycles to crack initiation for steel A.