

# ZAKAJ POKA JEKLO PRI KALJENJU?

## WHY STEEL CRACKS BY QUENCHING?

FRANC LEGAT

Zabreznica 36, 4274 @irovnica

Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19

Opisani so napetostno stanje v kaljencu pri segrevanju in ohlajanju ter vpliv različnih dejavnikov na pojav razpok na jeklih.  
 Ključne besede: jeklo, ogrevanje, ohlajanje, mikrostruktura, premene, napetosti, razpoke

The stresses in quenches by heating and quenching of steels as well as the effect of different factors on cracking are explained.

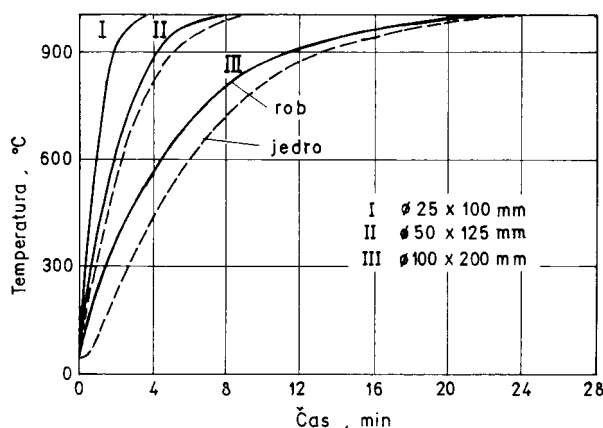
Key words: steel, heating, cooling, microstructure, transformations, stresses, cracking

### 1 UVOD

Kalilne razpoke so na orodjih in drugih jeklenih izdelkih nesprejemljive napake, kajti v majhna kalilna razpoka uniči orodje ali strojni del. Kalilna razpoka nastane zaradi prevelikih nateznih napetosti ob površini, ki so posledica mikrostrukturnih sprememb ali prevelikih hitrosti ohlajanja. Nastanek razpok olajajo površinske napake in oblika kaljenca. Razpoke nastanejo zaradi napačno izvedenega kaljenja ali popuščanja, neprimerne kalilne sredstva, neprimerne jekla, neprimerne ogrevne peči za toplotno obdelavo, konstrukcijske napake ali zaradi obdelovalne ali druge vrste površinske napake na jeklu. Razpokam se izognemo, če se izognemo vsem vzrokom za njihov nastanek.

### 2 OGREVANJE

Jeklo se segreva počasi do rdeče barve pri 700°C, nato pa hitreje na kalilno temperaturo. V začetku segrevanja je temperaturna razlika med površino in jedrom zelo velika. Razlika se zmanjšuje, ko površina izdelka doseže tem-

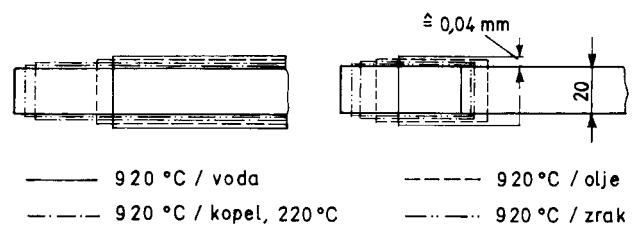


Slika 1: časovno - temp. krivulja za segrevanje palic različnih premerov v solni kopeli na 1000°C. Po viru 1  
 Figure 1: Time-temperature dependence by heating of rods of different thickness to 1000°C in salt bath. Ref. 1

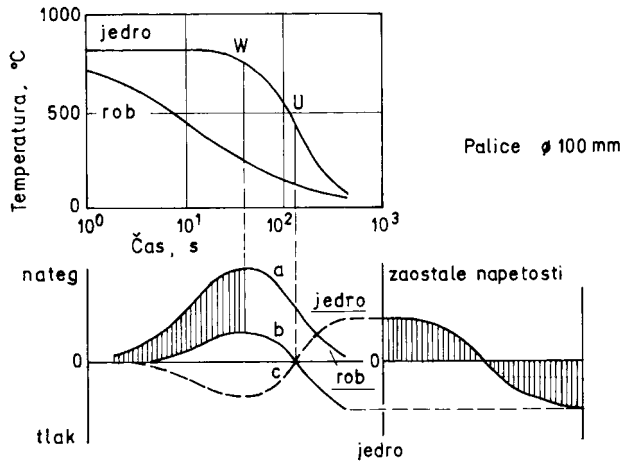
peraturo peči, je hitrost segrevanja prilagojena preseku kaljenca in toplotni prevodnosti jekla. Primerne razlike temperature med jedrom in površino za palice z različnim presekom prikazuje slika 1. Zaradi temperaturne razlike nastajajo velike natezne napetosti, še posebej pri velikih presekih in pri jeklih z majhno toplotno prevodnostjo. Pri segrevanju nastajajo na površini tlačne napetosti, ki lahko povzročijo deformacijo oblike kaljenca. Tudi ogrevanje za popuščanje je lahko nevarno. Nastajanje razpok je močno posebej pri jeklih, ki imajo slabo toplotno prevodnost, majhno elastičnost in so še posebej nagnjena k popuščni krhkosti.

### 3 OHLAJANJE

Ohlajanje je pri kaljenju ponavadi zelo hitro in ustvarja pogoje za nastajanje razpok. Gradient temperature in preme ustvarjajo komplicirane natezne napetosti. Če so te večje od trdnosti jekla, nastajajo razpoke. Pri ohlajanju v hladilnih sredstvih pada temperatura na površini hitreje kot v jedru. Razlika ustvarja volumske spremembe in zaradi njih napetosti. Deformacije volumna naraščajo s hladilno sposobnostjo kalilnega sredstva. Slika 2 prikazuje volumske spremembe pri kaljenju palice z debelino najbolj uporabljenih kalilnih sredstev: olju, vodi, zraku in soli. Slika 3 prikazuje temperaturno razliko med površino in jedrom 100 mm de-



Slika 2: Dimenzijske spremembe pri ohlajanju jeklene ploče nelegiranega jekla v vodi, olju, zraku in soli. Po viru 1  
 Figure 2: Dimension changes by cooling of a steel plate in water, oil, air and salt bath. Ref. 1



**Slika 3:** Temperaturna razlika med površino in jedrom pri kaljenju 100 mm palice iz jekla C 100 W 1 v olju in natezne notranje napetosti. Pri tem niso upošteevane napetosti zaradi spremembe temperature. Po viru 1  
**Figure 3:** Temperature differences between the surface and the core by quenching of a 100 mm rod from C 100 W 1 steel in oil and internal stress. Stresses caused by temperature change are not considered. Ref. 1

bele palice ter napetosti, ki so posledica razlike v temperaturi.

Pri času  $W$  je temperaturna razlika  $500^{\circ}\text{C}$ , kar ustreza spremembi dolžine 0.6%. Napetost na površini kaže krivulja a. Ta se spusti na krivuljo b kasneje pri daljšem gretju, ko se temperatura površine in jedra izenačita. Napetosti v jedru ponazarja krivulja c. Po izenačenju temperature se napetosti v palici zmanjšajo na nivo te krivulje. Po ohladitvi je v preizkusni palici napetostno stanje, ki je prikazano na desnem delu slike 3.

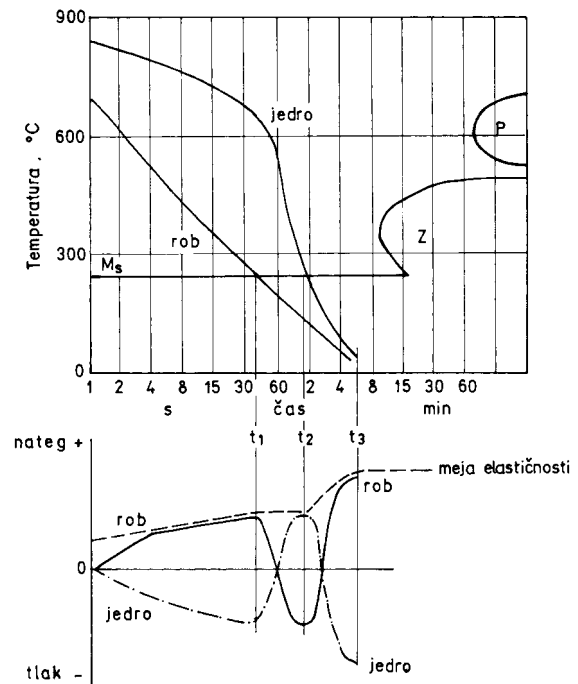
Fazna sprememba v perlitu pri ohlajanju jekla z 1% C in 1% W se začne pri  $700^{\circ}\text{C}$  po 20 sekundah in je končana po približno eni minuti. Pri  $450^{\circ}\text{C}$  se po dveh sekundah začne premena v bainit in se konča po 12 sekundah. Pri temperaturi  $575^{\circ}\text{C}$  nastane mikrostruktura iz perlita in bainita. Ko jeklo nato ohladimo nastane pri  $220^{\circ}\text{C}$  prvi martenzit.

Volumske spremembe pri različnih premenah so <sup>2</sup>:

Sprememba zrna	Volumska sprememba
Perlit → austenit	-4,64 + 2,21.(% C)
Austenit → martenzit	4,64 - 0,53.(% C)
Austenit → spodnji bainit	4,64 - 1,43.(% C)
Austenit → zgornji bainit	4,64 - 2,21.(% C)

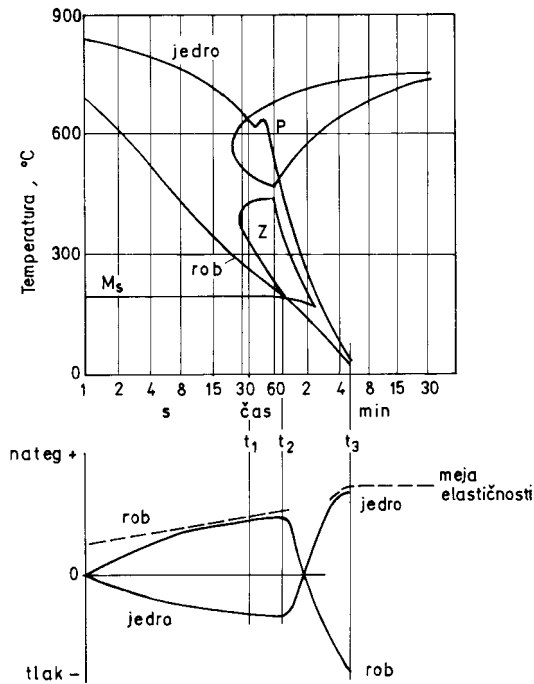
#### 4 RAZPOKE V PREKALJENEM ALI POVRŠINSKO KALJENEM JEKLU

Pri prekaljenju moramo računati z napetostmi na sliki 4, ki se razlikujejo od tistih na sliki 3. Med ohlajanjem do linije  $M_s$  pride do skoka površinske plasti in nastanka nateznej napetosti, ki so uravnotežene s tlačnimi napetostmi v jedru. Po času  $t_1$  se začne ob površini premena v martenzit, začne volumen naraščati in se izniči za etne natezne napetosti. To napetostno stanje se celo poveča, ker je v nadaljevanju ohlajanja temperaturni padec v je-



**Slika 4:** Napetostno stanje na površini in v jedru prekaljene palice  $\phi$  100 mm iz jekla z 1% C, ohlajenega v vodi. Po viru 1  
**Figure 4:** Stresses at the surface and in the core. Water quenched 100 mm rod from a 1% steel

dru večji kot na površini. Ko se temperatura zniža v jedru pod martenzitno premo, zraste volumen, ob površini pa nastanejo natezne napetosti, ki lahko pretrgajo kaljenec ponavadi v vzdolžni smeri. Nevarnost razpokanja se zmanjšuje z zmanjšanjem hitrosti ohlajanja. Čim bolj je jeklo kaljivo, tem milejše mora biti hladilno sredstvo, da ne pride do kalilnih razpok. Pri površinsko kaljenih kosih, ki so enakomerno pregreti po vsem preseku, moramo upoštevati sestavo jekla, dimenzije kaljenca, temperaturo avstenitizacije in ohlajevalno hitrost. Temperaturo avstenitizacije in vpliv kemične sestave lahko opredelimo iz kalilnih (TTT) diagramov in kalilnih krivulj<sup>3</sup>. Za jekla, ki ne prekalijo, obstaja cela vrsta diagramov, ki obravnavajo napetosti odvisno od mikrostrukture in oddaljenosti od površine. Na sliki 5 je predstavljen primer evolucije napetostnega stanja v jeklu, kjer perlit nastaja v jedru pred martenzitom na površini. Do časa  $t_1$  nastajajo ob površini natezne napetosti, v notranjosti pa tlačne napetosti. Ko pri točki  $t_1$  začne premena v perlit se volumen povečuje, vendar pa se istočasno zmanjšuje zaradi padanja temperature. Kateri od obeh vplivov prevlada, niti ni pomembno, v vsakem primeru nastanejo ob površini zelo velike elastične napetosti. V točki  $t_2$  je pretvorba v perlit končana in začne nastajati martenzit v površinski plasti, kar ponovno spremeni napetostno stanje. Tlačne napetosti ob martenzitni površini so lahko zelo velike. Z naraščanjem debeline martenzitne plasti na površini naraščajo tudi natezne napetosti v jedru.



Slika 5: Napetostno stanje površine in jedra, pri kaljeni palici  $\phi$  100 mm iz jekla 125 CrSi 5, ohlajeni v vodi. Po viru 1

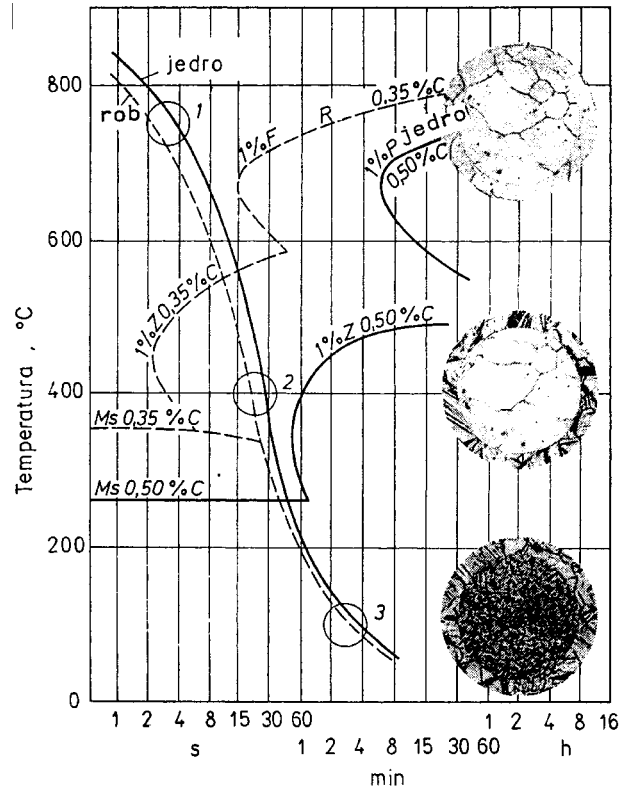
Figure 5: Stresses at the surface and in the core. Water quenched 100 mm rod from a 125 CrSi 5 steel

## 5 DRUGE VRSTE KALILNIH RAZPOK

Martenzitna premena napreduje pri izotermnem zadrževanju, se vzporedno relaksirajo notranje napetosti. To spreminja napetostno stanje in zgodi se, da kaljenec po uri po več urah ali dneh, se ni pravočasno popuščal. Nevarnost loma se poveča, se kaljenec po kaljenju podhladi. Zato ga je treba takoj popustiti. Možno se zmanjša možnost nastanka razpok, se jeklo ohladi do  $50^{\circ}\text{C}$  in takoj popusti. Velikokrat je za zastale lome odgovoren vodik, zato je pomembno, da ga je v kaljenem jeklu čim manj.

Malo kaljivo jeklo se ohlaja v vodi (slanici) ali z močnim mešanjem v olju. Kljub učinkovitemu ohlajanju lahko nastanejo ferit, perlit ali bainit, če posebej, se ima izdelek razne prehode in ogle, ki zadržujejo zračne mehurčke in ovirajo hitrost pretoka hladilnega sredstva. Včasih nastanejo razpoke (ele pri ogrevanju za popuščenje. Pri orodju z zelo različnimi preseki sta odvisna mesto in potek razpok od sestave jekla, nastajanja in celotne oblike.

Pri površinskem, plamenskem ali indukcijskem kaljenju lahko zaradi močno lokalizirane toplote pride do plastičnega preoblikovanja in spremembe oblike. Pri nepravilno izbranih pogojih lahko nastane preveč martenzita in zato se nedopustno poveča volumen. Po ohlaiditvi na sobno temperaturo so na kaljeni površini natezne napetosti, ki lahko povzročijo pravokotne razpoke. Do pregretja pride zaradi neenakomernega ali premajhnega odvoda toplote. Pregreti deli so še bolj



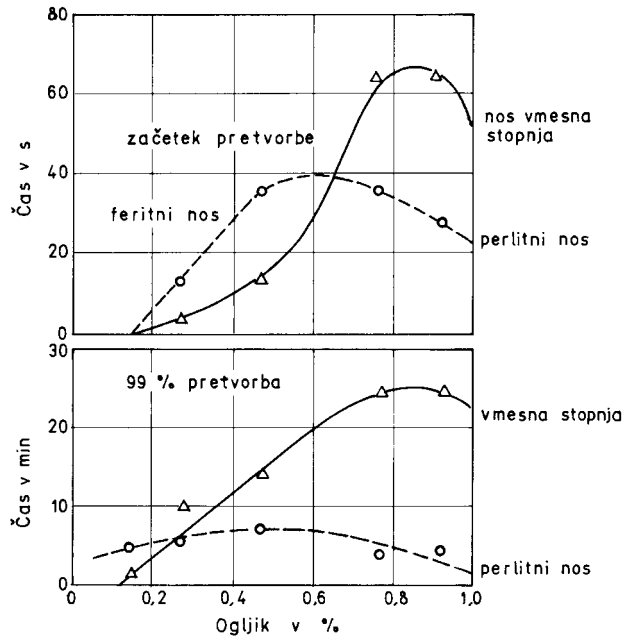
Slika 6: Premene pri kaljenju površinsko razogljene palice  $\phi$  25 mm iz jekla 0,5% C, 0,8% Cr in 0,25% Mo, ohlajenega v olju. Po viru 1

Figure 6: Transformations by quenching in oil of a decarburised  $\phi$  25 mm rod from a 0.5% C, 0.8% Cr, and 0.25% Mo steel. Ref. 1

stisnjeni-nakr-eni in pri ohlajanju se mo-nejše skr-ijo. Natezne sile med nakr-enimi conami so tako mo-nejše, da lahko povzro-ijo razpoke. Te lahko nastanejo tudi na razoglj-eni površini, ki nastane pri neustreznem ogrevanju za kaljenje (avstenitizaciji). Najve-ja nevarnost za nastanek razpok pri takem kaljencu je pri popolnem prekaljenju. Ob površini je bilo jeklo razoglj-eno na 0,35% C. Pri  $550^{\circ}\text{C}$  je za-el nastajati bainit v razoglj-eni plasti. Martenzitna premena pri ni-ji temperaturi je ob površini ustvarila natezne napetosti, ki lahko povzro-ijo razpoke v razoglj-eni plasti, ki ima nizko trdnost. Pri mo-nejšem razoglj-enju kaljenci ne razpokajo, ker je feritna plast ob površini duktilna in relaksira natezne napetosti.

Z naoglj-enjem in kaljenjem dobimo na površini kaljenca tršo martenzitno plast, v jedru pa, odvisno od sestave jekla, martenzit, bainit, perlit ali ferit. Pri cementacijskih jeklih so razpoke zelo redko na površini, nastanejo pa lahko, se ohladi kaljenec na zraku, ni pa jih pri posnem ohlajanju. Če je ohlajanje dovolj hitro, da je pretvorba v perlit potla-ena, ni nevarnosti nastajanja razpok.

Razpoke v cementirani plasti za-nejšo 0,5-0,7 mm pod površino, kjer je dele' bainita večji in trdoti ni'ja kot v sosednjih conah. Najve- martenzita je v globini 0,9-1,3 mm. Tu je bila hitrost ohlajanja sicer manjša kot



Slika 7: Vpliv vsebnosti ogljika na začetek nastajanja perlita in zmesnih struktur za jeklo z 0,15% C, 1,5% Ni, 1,5% Cr (15 CrNi 6, ^ 5420)

Figure 7: Influence of carbon content on pearlite and bainite transformations start for a 0.15% C, 1.5% Ni, 1.5% Cr steel (15 CrNi6, ^ 5420)

blije pri površini, vendar pa je vsebnost ogljika (0,9%) omogoila najhitrejšo transformacijo. Pri 150°C, ko se začne pretvorba v martenzit, nastanejo v zunanji coni z bainitno mikrostrukturo natezne napetosti, ki skupaj s karbidi po mejah povzročijo razpoke. Glavni vzrok nastanka razpok sta velika količina ogljika in široka cona martenzita. Za cementacijska jekla z malo premeno v

perlit in bainit je potrebno upoštevati pri izbiri hitrosti ohlajanja –as obeh premen, ki je odvisen od vsebnosti ogljika v naogljjeni plasti. Razmere pri premeni jekla 15 CrNi 6 prikazuje slika 7.

## 6 SKLEP

Kalilne razpoke nastanejo ponavadi zaradi nateznih napetosti, povezanih z obliko kaljenca in z napakami, ki so lahko mehanske narave ali pa posledica krhkih faz, nastalih pri kaljenju. Razpoka lahko nastane že pri ogrevanju. Z naraščanjem debeline ali zmanjševanjem toplotne prevodnosti se poveča možnost nastanka razpoke.

Pri ohlajanju nastajajo napetosti zaradi toplotnih gradientov različnih presekov kaljenca, sestave jekla in ohlajevalnih hitrosti. Pri prekaljivih jeklih nastanejo velike natezne napetosti ob površini, kjer se razpoke tudi začnejo. Martenzitne pretvorbe so pri večjih premerih kaljenca tudi časovno odvisne, zato pride do zaostalnih lomov, če kaljenci niso popušeni. Neenakomerno ohlajanje, neenakomerni preseki in ostri prehodi pogosto olajšajo nastanek razpok. Pregretje pri plamenskem ali indukcijskem kaljenju prav tako lahko povzroča kalilne razpoke. V praksi srečamo dostikrat različne razpoke, ki so posledica spleta različnih vzrokov.

## 7 LITERATURA

- <sup>1</sup> Thelning, K. E.: Warum Reist Stahl beim Härten, *Härtereitechnische Mitteilungen* 25 (1970) 271-281
- <sup>2</sup> Frescher, J., Lowitzer, O.: Vorgang der Massänderung bei der Wärmebehandlung, *Stahl und Eisen* 77 (1957) 18, 1221-1233
- <sup>3</sup> Rose, A.: *Härtereitechnische Mitteilungen* 21 (1996) 1, 1-6
- <sup>4</sup> Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Band 1-4, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1954-1976