

Zboljšanje žilavosti jekel s kaljenjem v vroči kopeli

UDK 620.178.746.22:621.785

ASM/SLA: Q6n, 2-64, J26p, TSb, Ay

Franc Uranc

Kaljenje avstenitiziranih jeklenih izdelkov v vroči kopeli imenujemo tudi austempering ali martempering glede na temperaturo kopeli, oz. pretvorbe. Če pretvorimo avstenit v bainit, govorimo o austemperingu, če pa poteka izotermna pretvorba v martenzitnem območju temperatur, imamo opravka z martemperingom. Temperatura kopeli naj bo med kaljenjem stalna, izdelki naj bodo zadosti tenki, da se pretvorba čimbolj približa izotermni. K postopku martemperinga spada tudi popuščanje.

Precej jekel dobi z martemperingom ali austemperingom — katera tu zaradi preprostosti imenujemo kar izotermno kaljenje — veliko boljše lastnosti kot s poboljšanjem. Tu predstavljamo nekaj jekel, katerim se more s takšno obdelavo bistveno izboljšati žilavost, obenem pa opišemo tudi jekla, katerim se že z razmeroma majhnim povečanjem žilavosti zelo poveča uporabnost.

Franc Uranc, raziskovalec za konstrukcijska jekla in mehanske preiskave v železarni Ravne

UVOD

Z izotermnim kaljenjem v območju bainitne premene izboljšamo jeklenim izdelkom žilavost, ne da bi bila trdnost manjša kot po navadnem kaljenju in popuščanju. Ni vsako jeklo primerno za izotermno kaljenje v bainit: bodisi da nastopi premena prekmalu (in ne more biti izotermna), bodisi da je prepočasna (ne steče do konca).

Nekatera jekla za vzmeti dobijo po izotermnem kaljenju prav dobre lastnosti; podobno jekla za rudarska, gradbeniška in lesnopredelovalna orodja. Celo turbinske lopatice se splača izotermno kaliti, svetujejo pa takšno kaljenje tudi pri valjčnih ležajih.

Podobne ugodne efekte daje tudi izotermno kaljenje v martenzit.

Naši poskusi

Od naših jekel za vzmeti smo izotermno kalili Č 4830-VCV 150 in Č 2332-65 Si 7. Prvo jeklo smo

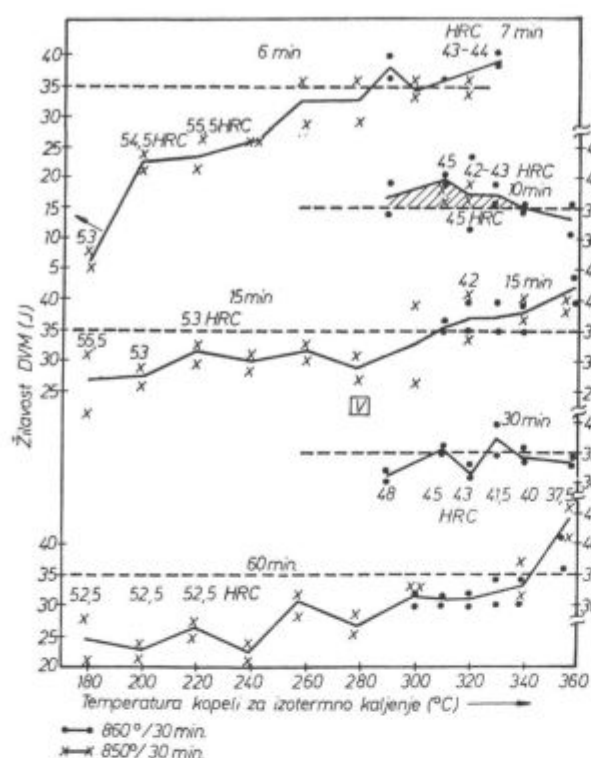
Tabela 1: Smerna kemična sestava in premenske točke preizkušanih jekel

Jeklo	Smerna kemijska sestava (%)					W	A _{cs} °C	T _A °C	T _B °C	t _B s	M _s °C
	C	Si	Mn	Cr	V						
Č 4830 VCV 150	0,5	0,3	1	1	0,1	—	770	880 1050	470 480	500 700	290 300
Č 2332 65 Si 7	0,65	1,7	0,85	—	—	—	790				255
Č 6444 Osikro 4	0,6	0,6	0,3	1	0,1	2	830 830	880 880	430 380	∞ 130	300 300
Č 4150 OCR 12	2	0,3	0,3	12	—	—	830 825	950 950	400 320	∞ >10 ⁵	270 205
Č 4650 OCR 12 sp.	2,1	0,3	0,3	12	—	0,7	825	950	300	>10 ⁵	180
Č 4172 Prokron 3	0,2	0,4	0,4	13	—	—	830	—	—	—	300
Č 4146 OCR 4 ex.	1	0,2	0,3	1,5	—	—	790 790	860 1050	470 450	400 4000	250 140

T_A — avstenitizacijska temperatura, °C

T_B — temperatura ob nosu krivulje izotermne premene v bainit, °C

t_B — čas 100 % pretvorbe pri temperaturi T_B po ohladitvi z navedene avstenitizacijske temperature, s



Slika 1

Žilavost in trdota jekla Č.4830-VCV 150, kaljenega po avstenitizaciji na 850 °C v solni kopeli. Ob krivuljah sta zapisana časi držanja v hladilni kopeli in dosežena trdota v enotah HRC.

Fig. 1

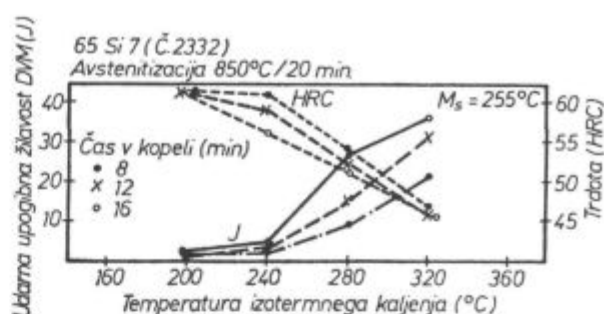
Toughness and hardness of Č.4830-VCV 150 steel austempered in salt bath after the austenitization at 850 °C. Figures with curves represent holding times (in the bath) and achieved hardness values in HRC

izotermno kalili v solnih kopelih s temperaturo od 180 °C do 360 °C. Časi zadrževanja na temperaturi kaljenja so bili 4, 7, 10, 15, 30 ali 60 minut. Slika 1 kaže dosežene trdote in žilavosti. Če želimo trdoto nad 51 HRC, se nam splača izotermno kaliti (po avstenitizaciji na 850 °C) pri temperaturah med 200 °C in 260 °C. Žilavost (DVM zareza) jekla Č.4830-VCV 150 bo po takem kaljenju med 26 in 33 J, če jeklo zadržujemo 15 minut v kopeli. Če kalimo dlje časa (60 minut), so možne žilavosti komaj 21 J.

Z enako trdoto (nad 51 HRC) je žilavost poboljšanih preizkušancev manj kot 16 J.

Drugo jeklo (Č.2332-65 Si 6) smo enako avstenitizirali, prenesli v kopel za kaljenje in zadrževali v njej 8, 12 ali 16 minut pri stalni temperaturi, ki je avtomatsko nadzorovana s termoelementom. Kopel smo stalno mešali.

Slika 2 kaže, da dosežemo pri trdoti nad 51 HRC žilavost (DVM) od 10 do 26 J. Očitno so časi pod 16 minut prekratki za doseganje dobre žilavosti. Ugodna temperatura je strožje omejena kot pri jeklu Č.4830-VCV 150. Primerna je le temperatura 280 °C (od teh preizkusnih), nikakor pa ne pod 250 °C, saj s kaljenjem pri teh nižjih tem-



Slika 2

Žilavost in trdota jekla Č.2332-65 Si 7 po izotermnem kaljenju v kopeli s temperaturo blizu M_s točke.

Fig. 2

Toughness and hardness of Č.2332-65 Si 7 steel after austempering in the bath with the temperature close to the M_s point

peraturah doseže jeklo manj kot 5 J, čeprav ni trše od 56 HRC.

Žilavost jekla Č.4830-VCV 150 se s pravilno izbiro pogojev izotermnega kaljenja za doseganje prave trdote dvigne za najmanj 60 % glede na žilavost poboljšane jekla. Ker jeklo Č.2332-65 Si 7 dosega podobne žilavosti — z ožje omejeno temperaturo izotermnega držanja — je verjetno tudi dvig žilavosti lahko podoben (z daljšimi časi držanja v kopeli).

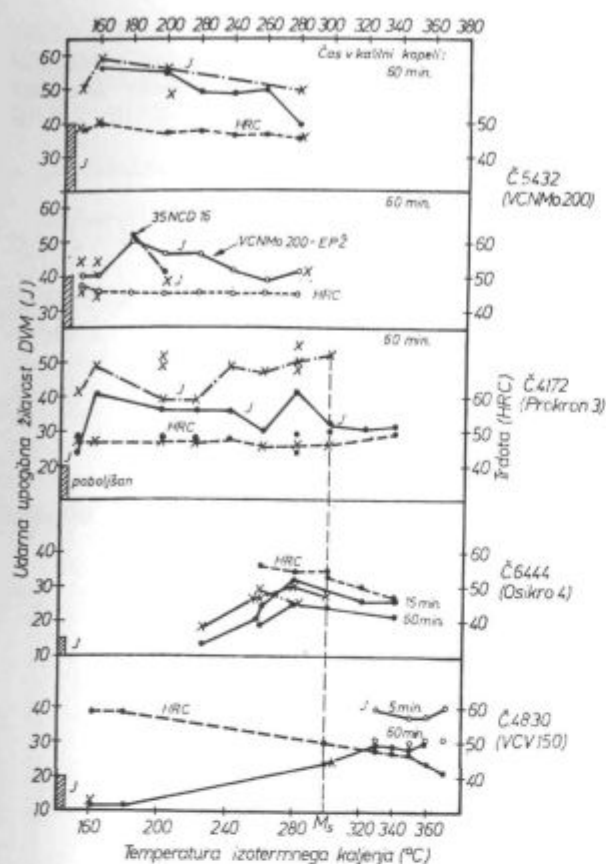
Jeklo Č.4830-VCV 150 pa uporabljamo tudi za izdelavo krmlilnih delov pnevmatskih kladiv. Ti deli naj bodo trši od 43,5 HRC ali trši od 47 HRC. Če jih poboljšamo na ustrezno trdoto, pokažejo žilavost 20 J ali manj. Če pa te izdelke izotermno kalimo, imamo veliko manj neenakomernosti trdote, žilavost je celo 35 J (po 15 do 30-minutnem zadrževanju pri temperaturi 310 °C), kar je skoraj 100 % zvišanje proti poboljšanemu jeklu z enako trdoto.

Tudi orodja iz jekel za hladno delo moremo znatno izboljšati, če jih izotermno kalimo. Navajajo 100 % zvečanje žilavosti jekel, podobnih našemu Č.6444-Osikro 4, to je, jeklu orodij, obremenjenih z udarci (1).

Ugotovili smo, da 15-minutno izotermno kaljenje pri 250—300 °C dvigne žilavost na 25—32 J in trdoto nad 55 HRC, medtem ko z navadnim kaljenjem in sledečim popuščanjem dobimo žilavost preizkušancev 15 J. Torej z izotermno obdelavo izboljšamo žilavost za okoli 100 % (sl. 3).

Izotermno kaljenje jekel Č.4150-OCR 12 in Č.4650-OCR 12 special je dalo manj spodbudne rezultate. Žilavost se je znatno dvignila šele, če smo kalili v kopeli pri 300 °C (sl. 4, 5).

Ob trdoti 61 HRC sta bili žilavosti (preizkušancev z radialno zarezo $r = 10$ mm globine 1 mm) 15 J, oz. 12 J, kar je le malo nad 12 J, oz. 8 J, kolikor znaša žilavost navadno kaljenih preizkušancev, popuščanih na 200 °C. Kvečjemu jeklo Č.4650-OCR 12 special bi se splačalo, zavoljo 40 % dviga žilavosti, kaliti izotermno. Seveda pa se lahko splača izotermno kaljenje orodij tudi tedaj, ko



Slika 3

Žilavost in trdota jekel po kaljenju v vroči kopeli in po dvakratnem popuščanju na 200°C.

Fig. 3

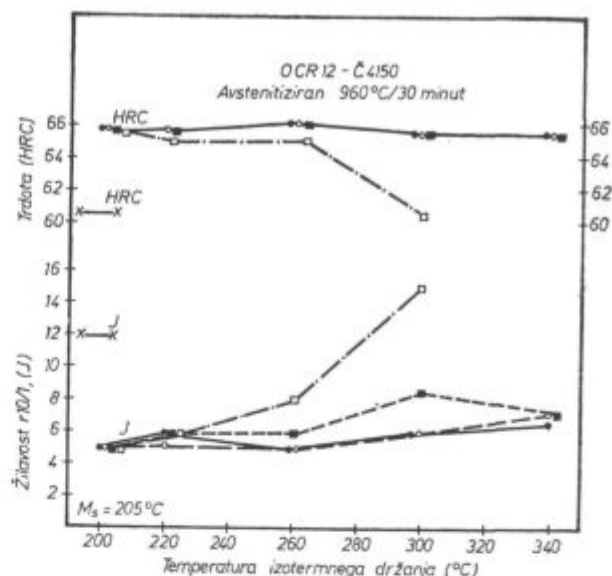
Toughness and hardness of steel after austempering and double tempering at 200°C

želimo več varnosti pri kaljenju ali doseganje bolj enakomernih trdot, kot je možno pri navadnem kaljenju v olju.

V lesni industriji rabijo med drugim tudi strojne dele iz jekla Č 4172-Prokron 3. Nekaj vzorcev tega jekla smo izotermno kalili z avstenitizacijske temperature 1030 °C.

Žilavostni preizkusi kažejo, da moramo zadrževati preizkušance iz tega jekla več kot pol ure pri izbrani temperaturi izotermnega kaljenja, da bodo čim bolj žilavi. Le pri temperaturah 220 in 340 °C je dosežena največja žilavost preizkušancev že po 30-minutnem zadržanju pri kalilni temperaturi. Pri drugih temperaturah se žilavost z daljšanjem časa zadržanja preizkušancev v kopeli povečuje. Enourno držanje preizkušancev v kopeli s temperaturo 160 ali 280 °C dvigne žilavost na 40, oz. 45 J (sl. 3).

Posebno se zboljša žilavost z dodatnim popuščanjem, npr. na 200 °C. Le preizkušancem, ki so bili izotermno kaljeni pri 200–220 °C, se s popuščanjem ni bistveno zboljšala žilavost (od 36 na 38 J), drugim pa se je dvignila na 49–50 J (preiz-

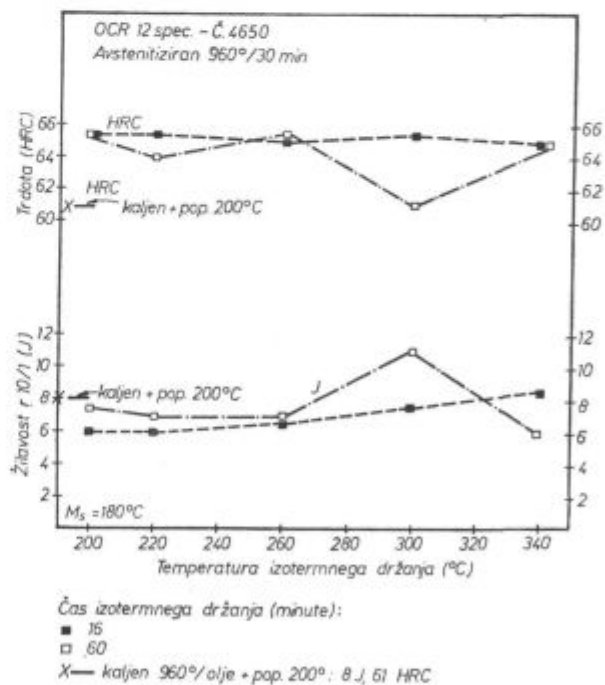


Slika 4

Žilavost in trdota jekla Č.4150-OCR 12 po kaljenju v vroči kopeli in po kaljenju v olju in popuščanju.

Fig. 4

Toughness and hardness of C.4150-OCR 12 steel after austempering, and quenching in oil and consequent tempering



Slika 5

Žilavost in trdota jekla Č.4146-OCR 4 ex. sp. po kaljenju v vroči kopeli in po kaljenju v olju ter sledečem popuščanju.

Fig. 5

Toughness and hardness of Č.4650-OCR 4 ex special steel after austempering, and quenching in oil and consequent tempering

kušanci z zarezo DVM), čeprav je znašala trdota nad 46 HRC. Tako ugodne kombinacije trdote in žilavosti ne moremo doseči z nobeno drugo toplotno obdelavo. Preizkušanci iz tega jekla so po izotermnem kaljenju pri 240 °C (eno uro) pokazali žilavost 35 J in trdoto 48 HRC, enako kaljeni preizkušanci, ki so bili dodatno popuščeni pri 200 °C, pa so bili žilavi za 48 J in trdi za 48 enot HRC.

Drugače pa je s preizkušanci, ki so zadržani v kopeli s temperaturo 240 °C kar 11 ur (namesto ene ure, kot prej opisani). Ti preizkušanci so sicer enako žilavi kot tisti, ki so zadrževani samo eno uro pri 240 °C, vendar so mehkejši. Ti preizkušanci imajo 44 HRC.

S poboljšanjem (1030 °C/olje + popuščanje pri 300 °C) dosežejo preizkušanci iz tega jekla 18–27 J (DVM) ter trdoto 45 HRC.

Naslednja tabela na kratko prikazuje rezultate poskusov z jeklom Č 4172-Prokron 3.

Tabela 2: Vpliv kalilnih pogojev in popuščanja na lastnosti jekla Č 4172-Prokron 3

Avstenitizacija (°C)	Kaljenje			Popuščanje (°C)	Žilavost DVM (J)	Trdota (HRC)
	Snov	Ohlajanje Temp. (°C)	Čas (h)			
1020	olje	20	—	300	18–27	45
1030	t. k.	180	11	—	50	47
1030	t. k.	240	11	—	35	44
1030	t. k.	240	1	—	35	48
1030	t. k.	240	1	200	48	48

t. k. — staljena sol AS 135.

Pri tem jeklu vidimo nenavadno močan učinek popuščanja po izotermnem kaljenju: dvig žilavosti za več kot 30 %, ne da bi padla trdota (sl. 3).

Podoben učinek ima tudi skrajšanje časa zadrževanja pri temperaturi izotermne pretvorbe 240 °C: ko smo skrajšali čas od 11 ur na 1 uro, smo dvignili trdoto žilavostnih preizkušancev od 44 na 48 HRC.

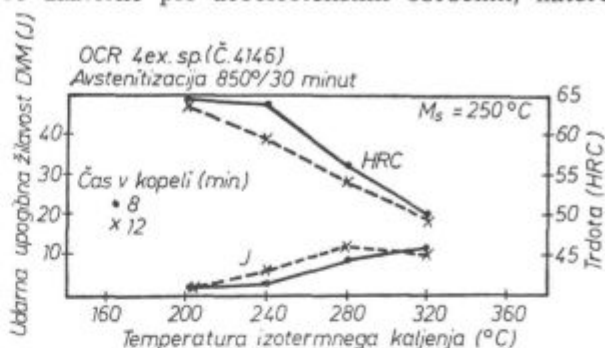
Kot kaže, je najprimernejša temperatura izotermnega držanja nekje med 200 in 250 °C, kot govorijo viri (2), ali 240 ° s popuščanjem.

Tudi valjčne ležaje (jeklo Č 4146-OCR 4 ex. sp.) velikih serij že dve desetletji izotermno kalijo (3). Kot najprimernejšo temperaturo so odkrili 240 °C (nad M_s točko), da so dosegali ležaji trdoto nad 58 HRC in da se ne pojavi avstenit. Pri tej temperaturi so zadrževali jeklo 4 ure.

To jeklo ni ustrezno za izotermno kaljenje obročkov, debeline nad 15 mm; za takšne je primerno jeklo 100 CrMo 7. Z manganom legirano ležajno jeklo pa je sploh prepočasno v izotermni premeni.

Z izotermnim kaljenjem ne dosežejo obročki večje trdnosti ali trajne vrtilno upogibne trdnosti, kot jo dobijo z navadno toplotno obdelavo (kaljenjem v olju in popuščanjem), toda so veliko bolj žilavi in imajo višjo mejo plastičnosti. Med ugod-

nostmi izotermnega kaljenja naj bi še bile: zelo majhne kalilne deformacije in tlačne lastne napetosti na površini (do 500 N/mm²). Takšne lastnosti so zaželeni pri debelostenskih obročkih, katere

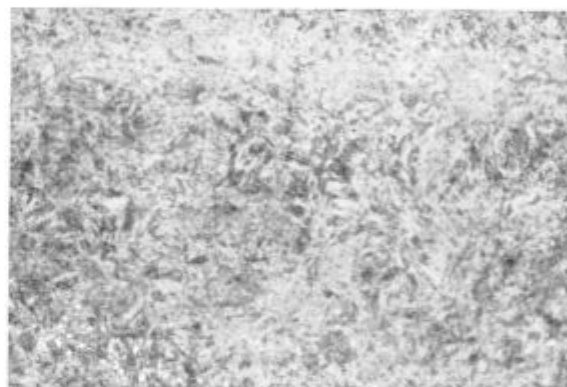


Slika 6

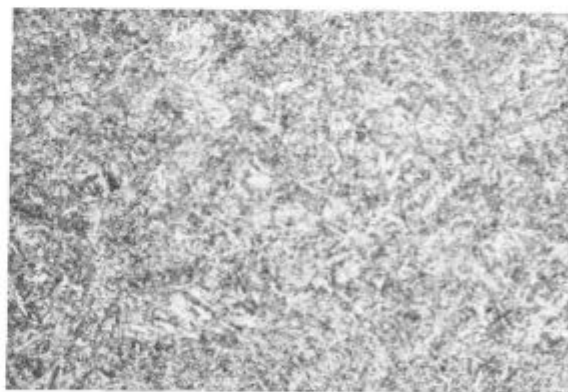
Žilavost in trdota jekla Č. 4146-OCR 4 ex. sp. po kaljenju v vroči kopeli.

Fig. 6

Toughness and hardness of Č.4146-OCR 4 ex sp steel after austempering



Slika 7a



Slika 7b

Slika 7

Mikrostruktura jekla Č.4830-VCV 150

- a) po kaljenju z 860 °C v olju in popuščanju na 250 °C,
b) po kaljenju z 860 °C v solni kopeli pri 300 °C, čas držanja v kopeli 30 minut. (500 x).

Fig. 7

Microstructure of Č.4830-VCV 150 steel

- a. after quenching from 860 °C in oil and tempering at 250 °C
b. after austempering from 860 °C in salt bath at 300 °C, holding time in bath 30 minutes. 500 x.

vgrajujemo s tesnim prilaganjem, in pri ležajih, obremenjenih z udarci. Slika 6 kaže trdoto in žilavost jekla Č 4146-OCR 4 ex. sp. po izotermnem kaljenju pri temperaturah od 200 do 320 °C.

Metalografski pregled

Na slikah 7—12 so prikazane mikrostrukture žilavostnih preizkušancev.

Sliki 7a in 7b kažeta precej različni strukturi jekla Č 4830-VCV 150. Na sliki 7a je poboljšana struktura, nizko popuščni martenzit. Na sliki 7b je prikazana izotermno (ob M_s točki: 300 °C/30 minut) kaljena struktura: ferit, bainit, nizko popuščni martenzit; ta struktura je drobnozrnata. Ferit se je izločil, ker je bila hitrost ohlajanja premajhna za ohranitev čistega avstenita do 300 °C.

Trdota poboljšane strukture je 53 HRC, žilavost (DVM zareza) je 17 J, trdota izotermno kaljenega preizkušanca je 50,5 HRC, žilavost 24 J.



Slika 8

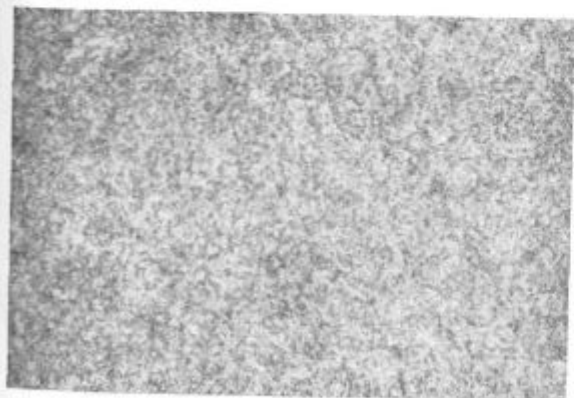
Mikrostruktura jekla Č.2332-65 Si 7 po kaljenju z 850 °C v kopeli pri 320 °C/16 minut. (500 x).

Fig. 8

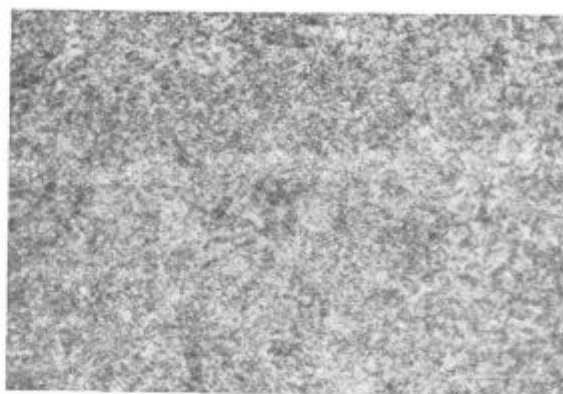
Microstructure of Č.2332-65 Si 7 steel after austempering from 850 °C in the bath at 320 °C/16 minutes. 500 x.

Slika 8: Z izotermnim kaljenjem jekla Č 2332-65 Si 7 pri 320 °C/16 minut (kar je 70 °C nad M_s točko) se je pretvorilo 80 % avstenita v bainit.

Trdota tako obdelanega jekla je 45,5 HRC, žilavost (DVM zareza) 34 J.



Slika 9a



Slika 9b

Slika 9

Mikrostruktura jekla Č.6444-Osikro 4

- a) po kaljenju z 900 °C v olju in popuščenju na 400 °C,
b) po kaljenju z 880 °C v kopeli pri 320 °C/15 minut. (500 x).

Fig. 9

Microstructure of Č.6444-Osikro 4 steel

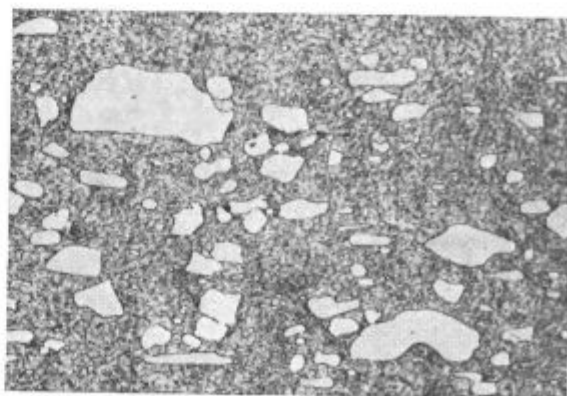
- a. after quenching from 900 °C in oil and tempering at 400 °C
b. after austempering from 880 °C in the bath at 320 °C/15 minutes. 500 x

Sliki 9a in 9b kažeta videz struktur poboljšane ali izotermne kaljenega jekla Č 6444-Osikro 4. Po poboljšanju je struktura popuščeni martenzit, po izotermnem kaljenju pa 80 %-martenzit in 20 %-bainit. Izotermno smo zadrževali preizkušane pri 320 °C/15 minut (t. j. za 20 °C nad M_s točko).

Trdota poboljšane preizkušance je bila 52,5 HRC, žilavost (DVM) 17 J, trdota izotermno kaljenega pa 50,5 HRC in žilavost 28 J.

Sliki 10a in 10b: Struktura jekla Č 4650-OCR 12 special, kaljenega v olju in popuščenega, je precej drugačna kot struktura enakega jekla, kaljenega izotermno 300 °C/60 minut.

V prvem primeru je struktura iz popuščenega martenzita, karbidov in zaostalega avstenita, v drugem bainitno martenzitna s karbidi. Izotermno kaljeno ima 62 HRC in 10 J (r10/1), medtem ko je navadno toplotno obdelano le malo slabše 61 HRC, 8 J.



Slika 10a



Slika 10b

Slika 10

Mikrostruktura jekla Č.4650-OCR 12 special
a) po kaljenju z 960 °C v olju in popuščanju na 200 °C,
b) po kaljenju z 960 °C v kopeli s temperaturo 300 °C/60 minut. (500 x).

Fig. 10

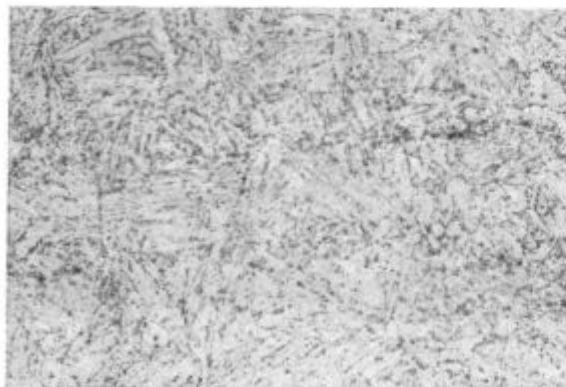
Microstructure of Č.4650-OCR 12 special steel
a. after quenching from 960 °C in oil and tempering at 200 °C
b. after austempering from 960 °C in bath with temperature 300 °C/60 minutes. 500 x

Sliki 11a in 11b kažeta strukturi poboljšaneja ter izotermno kaljenega jekla Č 4140-Prokron 3. Poboljšana struktura (sl. 11a) je visokopopuščni martenzit s karbidi v feritu. Karbidi so izločeni iz martenzitnih igel.

Poboljšani preizkušanelec je pokazal trdoto pod 20 HRC in žilavost 60 J, izotermno kaljen pa 45 HRC in 46 J.

Sliki 12a in 12b kažeta precejšnjo razliko struktura izotermno kaljenega in izotermno kaljenega + + popuščene jekla Č 5432-VCNMo 200. Struktura, popuščena na 200 °C, je videti kot višjepopuščna struktura po kaljenju v olju.

Trdota in žilavost obeh preizkušancev sta skoraj enaki (45—47 HRC, 48 J). To je razumljivo, ker je izotermno kaljenje potekalo (pri 200 °C/60 minut) precej pod M_s točko (400 °C).



Slika 11a



Slika 11b

Slika 11

Mikrostruktura jekla Č.4172-Prokron 3
a) po kaljenju z 1020 °C v olju in popuščanju na 740 °C,
b) po kaljenju z 1020 °C v kopeli s temperaturo 280 °C, čas 60 min. (500 x).

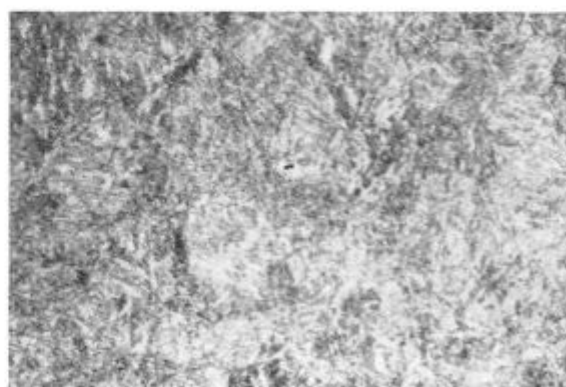
Fig. 11

Microstructure of Č.4172-Prokron 3 steel
a. after quenching from 1020 °C in oil and tempering at 740 °C
b. after austempering from 1020 °C in the bath with temperature 280 °C, time 60 minutes. 500 x

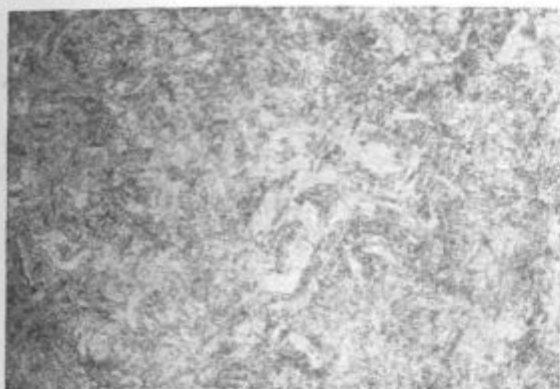
Pretnes rezultatov

1. Izotermno kaljeno jeklo Č 4830-VCV 150 je ob trdoti nad 51 HRC pokazalo žilavost 26—33 J (DVM), kar je zelo ugodno proti 16 J (preizkušanci istega tipa zareze), kolikor doseže to jeklo s poboljšanjem na enako trdoto (to je s kaljenjem z 850 °C v olju in popuščanjem na temperaturi pod 300 °C). Z izotermnim kaljenjem izboljšamo žilavost za več kot 60 %, s kaljenjem (15 do 30 minut) v kopeli pri 260 °C znaša zvišanje glede na poboljšano stanje kar 100 %.

Če želimo, da bi imelo jeklo Č 4830-VCV 150 trdoto 43,5 HRC, kakršno naj imajo krmilni deli pnevmatskih kladiv, pomeni izotermno kaljenje velik prirastek žilavosti glede na poboljšane izdelke. Po 30-minutnem zadrževanju avstentiziranega izdelka v kopeli s temperaturo 290 do 310 °C doseže izdelek žilavost 30—35 J, kar je 50—60 % bolj-



Slika 12a



Slika 12b

Slika 12

Mikrostruktura jekla Č.5432-VCNMo 200

- a) po kaljenju z 850 °C v kopeli pri 200 °C/60 minut,
 b) po kaljenju z 850 °C v kopeli pri 260 °C/60 minut in
 sledečem popuščanju na 200 °C. (500 x).

Fig. 12

Microstructure of Č.5432-VCNMo 200 steel

- a. after martempering from 850 °C in the bath at 200 °C/60 minutes
 b. after austempering from 850 °C in the bath at 260 °C/60 minutes and consequent tempering at 200 °C. 500 x

šanje proti poboljššanemu strojnemu delu, ki ima pri trdoti 44 HRC žilavost 22 J.

Iz tega vidimo:

a) Zmanjševanje prednosti izotermnega kaljenja pred poboljšanjem, če želimo manj trde izdelke. S trdoto pod 37 HRC se žilavost poboljšane in izotermno kaljenega jekla Č 4830-VCV 150 izenačita.

b) Najugodnejša temperatura izotermnega kaljenja (zadrževanja preizkušancev v solni kopeli) je tesno ob M_s točki, ki je pri tem jeklu 300 °C.

2. Jeklo Č 2332-65 Si 7 je po 16-minutnem kaljenju v kopeli pri 280 °C doseglo žilavost 26 J, kar je primerljivo z žilavostjo enako ohlajenega jekla Č 4830-VCV 150, katerega povprečna žilavost je 28 J, spodnja vrednost pa 26 J. Tudi trdoti obeh jekel sta podobni (51 HRC). Če ohlajamo avstenitizirana preizkušanca obeh jekel v kopeli pri 320 °C, bosta tudi enako žilavi in bo preizkušanec jekla Č 4830-VCV 150 imel 43 HRC, iz Č 2332-65 Si 7 pa 45 HRC.

Velika razlika med jekloma se pokaže po ohlajanju v kopeli z nižjo temperaturo. Pri 240 °C bo žilavost Č 2332-65 Si 7 komaj 5 J, medtem ko bo imelo Č 4830-VCV 150 kar 22–30 J. Za obe jekli torej velja skoraj enako območje ohlajevalnih temperatur in časov, s tem da je to območje pri Č 2332-65 Si 7 strogo omejeno k nižjim temperaturam (zaradi strmega padca žilavosti) in odprto k višjim (ker je trdota tega jekla po enaki toplotni obdelavi za 2 enoti HRC večja kot pri jeklu Č 4730-VCV 150).

3. Jeklo Č 6444-Osikro 4 pridobi najugodnejšo žilavost po kaljenju v istem temperaturnem ob-

močju 280–320 °C in 15 minut, s tem da je trdota za tri enote HRC višja kot pri Č 4830-VCV 150 in Č 2332-65 Si 7. Pravi čas zadrževanja v hladilni kopeli je pri tem jeklu tesneje določen, pri 300 do 320 °C je 12 minut; pri 280, 340, 400 °C pa je ugotovljen kot najboljši čas 15 minut.

4. Visokolegirani ledeburitni orodni jekli Č 4150-OCR 12 in Č 4650-OCR 12 special se ne odzivata enako močno na izotermno kaljenje. Z enournim kaljenjem pri 300 °C dobita 30–40 % boljšo žilavost kot z navadno toplotno obdelavo. Trdota po izotermnem kaljenju je 61 HRC.

5. Jeklo Č 4172-Prokron 3 je najboljše kaliti v solni kopeli s temperaturo nad 240 °C, če po kaljenju popuščamo (pri 200 °C). Torej je območje izotermnega kaljenja lahko enako kot za jekla Č 4830-VCV 150, Č 6444-Osikro 4, Č 2332-65 Si 7. Pomembno pa je pri tem jeklu popuščanje, saj dvigne žilavost za 150 % proti poboljšanemu jeklu z enako trdoto (45–46 HRC). Ugodna pri tem jeklu je širina primernih temperatur izotermnega držanja, saj moremo kaliti v območju 240–300 °C (in verjetno še višje), če potem popuščamo na 200 °C.

Hiba izotermnega kaljenja tega jekla je nujnost daljšega ohranjanja na temperaturi (vsaj eno uro).

Izračun vsebnosti zadržanega avstenita na osnovi rentgenskih preiskav je pokazal le majhne razlike med vsebnostmi gama faze v sredini preizkušancev, kaljenih pri temperaturi 200, 240 ali 260 °C. Vsebnost avstenitne faze je 5–6 %.

Tik pod površino (t.j. 0,5 mm) pa je videti vpliv temperature: preizkušanci, ki so bili 6 ur izotermno kaljeni pri 200 °C, so vsebovali v strukturi 3 % avstenita; kaljeni pri 260 °C eno uro pa so vsebovali 5 % avstenita. To moremo razložiti s stabilizacijo avstenita pri ohlajanju na 260 °C.

6. Jeklo Č 4146-OCR 4 ex. sp. moremo izotermno kaliti takrat, kadar želimo doseči pri ležajnih obročkih posebno dobro obstojnost mer ali površinske tlačne napetosti. Žilavost se temu jeklu poveča le, če ga zadržujemo v hladilni kopeli več kot 12 minut. Temperatura izotermnega zadrževanja je v istem območju kot za ostala preiskovana jekla.

7. Kot kaže sl. 3, moremo z izotermnim kaljenjem dvigniti žilavost celo jeklom z visoko M_s točko (npr. Č 5432-VCNMo 200), tako, da jih pri kaljenju ohlajamo v kopeli z razmeroma nizko temperaturo precej pod M_s točko.

SKLEPI

1. Največji efekt ima izotermno kaljenje na jeklo Č 4172-Prokron 3, saj mu dvigne žilavost nasproti poboljšanemu stanju za 150 %. Pri tem jeklu je zelo važno popuščanje.

2. Jekla Č 4830-VCV 150, Č 2332-65 Si 7, Č 6444-Osikro 4 pridobijo 50–100 % žilavosti, je jih izotermno kalimo pri 280–310 °C, namesto poboljša-

mo. Ugoden čas zadrževanja na temperaturi izotermne pretvorbe avstenita je za prvi dve jekli 15 minut, za Č 6444-Osikro 4 pa 12 minut.

3. Jeklo Č 5432-VCNMo 200 ni preveč dovzetno za ugodnosti izotermnega kaljenja, vendar pa jih uporabimo, če je zelo pomembno, da doseže jeklo največjo možno žilavost. Dobro žilavost in trdnost ima to jeklo, če ga po avstenitizaciji ohlajamo v kopeli s temperaturo 180 °C eno uro ali več.

4. Ležaje in visokoogljčna visoko kromova jekla se spleča izotermno kaliti le za doseganje posebnih lastnosti (obstojnost mer, tlačne napetosti na površini, zelo enakomerne trdote in žilavosti pri vseh izdelkih).

5. Pri orodnem jeklu Č 6444-Osikro 4 že 20 % bainita v strukturi znatno zboljša žilavost (od 17 na 24 J) ob le majhnem padcu trdote (od 52,5 na 50,5 HRC).

Pri konstrukcijskem jeklu je viden vpliv popuščanja na videz izotermno tvorjenega martenzita, ne pa na njegove mehanske lastnosti.

Literatura

1. Birjukova V. N.: Metallovedenie i termičeskaja obrabotka metallov, 1965, No. 9, str. 53—57.
2. Koutsky J., L. Baračkova: Archiv für das Eisenhüttenwesen 48 (1977), No. 8, str. 427—429.
3. Hengerer F.: DRAHT-Fachzeitschrift, 1976, No. 3, str. 108—109.

ZUSAMMENFASSUNG

Durch das isothermische Härten im Bereich der bainitischen oder martensitischen Umwandlung kann die Zähigkeit der Konstruktionsstähle Č 4830-VCN 150 und Č 4172-Prokron 3, dem zähen Werkzeugstahl Č 6444-Osikro 4 und dem Federstahl Č 2332—65 Si 7 verbessert werden. Die günstigste Temperatur liegt um den M_s Punkt.

Wälzlagerstahl erreicht durch das Warmbadhärten nicht die nötige Härte. Hochchrom und hochkohlenstoffhaltige Werkzeugstähle für die Kaltarbeit sind nach dem

isothermischen Härten in Bainit nur um einen kleinen Anteil zäher als nach dem gewöhnlichen Härten im Öl und Anlassen.

Dem hochfesten Konstruktionsstahl kann die Zähigkeit durch das isothermische Härten bei der Temperatur um 200 °C um etwa 50 % verbessert werden. Die Härte ist nach der so erzielten höheren Zähigkeit gleich gross wie nach der amgünstigsten gewöhnlichen Wärmebehandlung (Härten im Öl und Anlassen).

SUMMARY

Isothermal quenching in the range of bainitic or martensitic transformation improves the toughness of structural Č 4830-VCV 150 and Č 4172-Prokron 3 steel, the toughness of the Č 6444-Osikro 4 shock-resistant tool steel, and the toughness of the Č 2332-65 Si 7 spring steel. The convenient temperature of the coolant is around the M_s temperature. The ball-bearing steel does not attain the necessary hardness when austempered.

High-chromium high-carbon tool steel for cold working obtains only slightly higher toughness by austempering instead of hardening and tempering.

The toughness of high-strength structural steel can be improved for about 50 % by martempering at 200 °C.

The hardness of these austempered or martempered steels remains equal to that obtained with the most suitable ordinary heat treatment (quenching in oil and tempering).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С изотермической закалкой в области бейнитного и мартенситного преобразования можно улучшить вязкость конструкционных сталей Č 4830-VCV 150 и Č 4172-Prokron 3, вязкость инструментальной стали Č 6444-Osikro и пружинной стали марки Č 2332-65 Si 7. Благоприятные темп-ры для закалки находятся около M_s точки.

Сталь для изготовления подшипников с мартенситной закалкой не достигает необходимую твердость. Высокоуглеродистые инструментальные хромистые стали для применения в холодном

состоянии показали после изотермической закалки в бейнит незначительное повышение вязкости при сравнении с обыкновенной закалкой и отпуском. При конструкционной стали высокой твердости можно улучшить вязкость прибл. на 50 % при применении изотермической закалки при темп-ре около 200 °C. При всех способах увеличения вязкости твердость стали не отстает от наиболее благоприятной обыкновенной термической обработки (закалка в масле и отпуск).