

Jože Rodič

Orisan je razvoj proizvodnje orodnih jekel v zadnjem desetletju. Poleg značilnosti asortimenta je prikazan tudi razvoj metodike preizkušanja orodnih jekel. Zaradi vsebinske opredelitve posvetovanja* je pregled usmerjen pretežno k brzoreznim jeklom in orodnim jeklom za delo v hladnem, ostala orodna jekla pa ob tej priliki niso podrobneje obravnavana. To ne pomeni, da so v obravnavanem razvojnem obdobju manj pomembna.

UVOD

Na podobnem strojniškem posvetovanju v Ljubljani smo slišali v aprilu 1965 referat z enakim naslovom¹. Po trinajstih letih lahko ocenimo napredek, uporabimo objavljeno vsebino kot poznano in obravnavamo to temo kot nadaljevanje takratnega zapisa in še z drugih gledišč. V zadnjih letih je tudi železarna Ravne postregla s publikacijo², v kateri je primerno strokovno tehnično predstavila jekla in druge izdelke svojega proizvodnega programa. Tudi na to publikacijo se lahko naslonimo in v nadaljevanju ne bomo podrobneje opisovali sestav, osnovnih lastnosti in uporabnosti posameznih jekel, ker so pač separati kataloga^{3,4,5} vsakomur dosegljivi.

Na omenjenem posvetovanju je bil podan¹ pregled orodnih jekel z utemeljitvijo in opisom glavnih značilnosti posameznih skupin orodnih jekel. S posebno pozornostjo so bili obravnavani kriteriji za oceno uporabnosti, napotki za izbiro ter metodika preizkušanja orodnih jekel s primerjavami nekaterih osnovnih lastnosti.

Pri vsem tem opisu ni prišlo do bistvenih sprememb in nam je lahko solidna opora za nadaljnjo obravnavo.

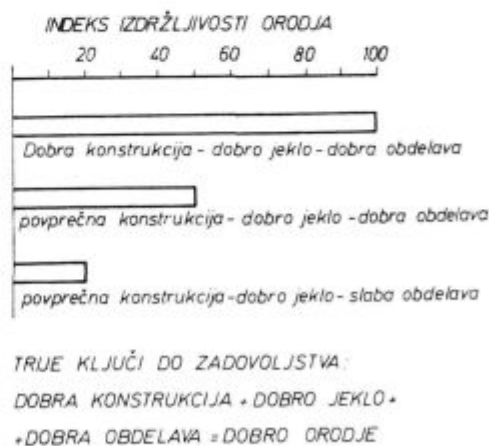
Glede na tematiko posvetovanja in prijavljene referate bomo obravnavali tri skupine orodnih jekel.

Največ pozornosti velja brzoreznim jeklom, orodna jekla za hladno in za vroče delo pa bomo obravnavali le delno.

Samo z dobro konstrukcijo orodja, s pravilno izbiro in dobro kakovostjo orodnega jekla ter s strokovno izdelavo, toplotno obdelavo in pravilno uporabo orodij lahko dosežemo popoln učinek in »zadovoljstvo z dobrim orodjem« (slika 1).

Raznolikost kemične sestave, lastnosti in uporabnosti ter s tem seveda predpisanih zahtev je pri orodnih jeklih bistveno večja, kot pri vseh drugih skupinah jekel. Področje uporabnosti orodnih jekel je izredno široko, od najpreprostejših orodij do specialnih industrijskih orodnih kompletov.

Pripadnost nekega legiranega jekla skupini orodnih jekel ni kar takoj očitna, ker dobijo ta naslov bolj na osnovi uporabe kot pa osnovne sestave. Orodja uporabljamo za obdelavo in predelavo snovi, orodna jekla pa so vsa tista, ki se uporabljajo za izdelavo orodij. Žal, točnejše definicije na tem področju skoraj ne najdemo. Tudi z omejitvami kemijske sestave ni mogoče orodnih jekel natančno opredeliti. Res je, da imajo mnoga orodna jekla višjo vsebnost ogljika, vendar le nekatera kažejo nadevtektoidno in ledeburitno strukturo. Največji del orodnih jekel ima ogljik v območju 0,3 do 0,6 %, kar se močno prepleta z značilnim območjem konstrukcijskih jekel za poboljšanje. Vsebnost ogljika torej ni odločilna karakteristika za opredelitev orodnih jekel, saj imamo npr. nekatera specialna orodja za vroče in hladno delo izdelana iz jekel, ki so skoraj brez ogljika za izločevalno utrjanje. Tudi legirne elemente dodajamo v najrazličnejših kombinacijah in v izredno širokih variacijah vsebnosti. Celo pri enaki kemijski sestavi se glede na področje uporabe zahtevajo določene razlike in specifične lastnosti. Te zagotavljajo posebni pogoji v tehnologiji izdelave, predelave in toplotne obdelave. Skoraj vedno so potrebne drugačne zahteve preizkušanja in kontrole.



Slika 1

Pomen konstrukcije orodja, izbire jekla in izdelave ter toplotne obdelave orodja

Fig. 1

Importance of tool design, selection of steel, manufacturing and heat treatment of tool

* Uvodni referat na XII. Jugoslovanskem posvetovanju proizvodnega strojništva v Mariboru 28. in 29. IX. 1978.

Jože Rodič, dipl. inž. metalurgije je vodja službe za razvoj tehnologije, izdelkov in metalurške raziskave v železarni Ravne

Najpomembnejše lastnosti, ki označujejo obnašanje orodnega jekla pri uporabi, so trdota, odpornost proti obrabi in žilavost. K tem osnovnim dodajamo še veliko število posebnih lastnosti, kot so npr. dinamična trdnost, obstojnost proti oksidaciji, proti koroziji, proti termičnemu utrujanju in zelo pomembna popuščna obstojnost ter obstojnost mer, oblik, oz. občutljivost za deformacije in nastajanje razpok pri kaljenju.

Lastnosti jekla morajo v optimalni kombinaciji omogočati, da se orodje ne deformira, da vzdrži njemu namenjene obremenitve in da se s čim manjšo obrabo lahko dolgo uporablja. Ob takih zahtevah razlikujemo dve vrsti značilnih lastnosti, ki odločajo o

UPORABNOSTI:

- trdota v hladnem in v vročem,
- žilavost ter odpornost proti lomljenju in krušenju,
- odpornost proti obrabi,
- prekaljivost,
- nagnjenost k deformacijam pri kaljenju,
- popuščna obstojnost,
- odpornost proti koroziji in škakanju,
- statična trajna trdnost pri povišanih temperaturah,
- dinamična trajna trdnost, ipd.

PREDELAVNI SPOSOBNOSTI:

- sposobnost za obdelavo z odvzemanjem materiala,
- sposobnost za brušenje,
- sposobnost za poliranje,
- sposobnost za hladno preoblikovanje,
- sposobnost za hladno vtiskovanje,
- sposobnost za predelavo in plastično preoblikovanje v vročem.

Razumljivo je, da tudi glede zahtevanih lastnosti ne moremo pričakovati za orodna jekla nekih skupnih in enotnih kriterijev. V različnih prilikah

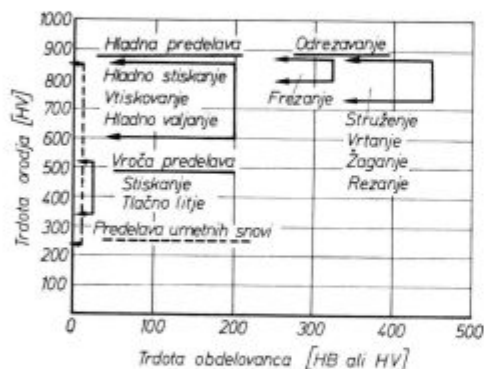
uporabe nekatere lastnosti niso pomembne in zahtevane niti potrebne, medtem ko so za druga orodja prav te odločilne.

Največkrat brez pomisleka povezujemo pojem orodno jeklo z visoko trdoto. Če malo podrobnejši razmislje pokaže, da taka povezava ni utemeljena. Trdota orodja mora biti le relativno večja od obdelovancev, absolutno pa je trdota orodja včasih celo zelo nizka in povprečje trdote orodij bi bilo kar verjetno v območju trdot jekel za poboljšanje.

Slika 2 kaže orientacijsko primerjavo trdot obdelovancev in orodij za nekaj značilnih postopkov obdelave.

Trdota orodja je vsekakor lastnost, ki jo je mogoče kontrolirati na najpreprostejši način in jo zato koristno uporabljamo za oceno uporabne možnosti orodij, četudi ne more te uporabnosti povsem opredeliti in služiti za odločujočo oceno pri vrednotenju orodij. Odpornost orodij proti obrabi je precej ozko povezana s trdoto orodij, čeprav so tudi pri tej zvezi precejšnja odstopanja. Na odpornost proti obrabi pri enaki trdoti močno vpliva prisotnost karbidov. Teh je v legiranih Cr-W-Mo-V orodnih jeklih tudi do 20 in več odstotkov. Dodajanje karbidov za povečevanje odpornosti proti obrabi je omejeno, ker karbidi predstavljajo pri obremenitvah notranje iniciale razpok in s tem povečujejo nevarnost lomov, oz. poslabšajo žilavost orodij.

Pri delu orodij imamo vedno opravka z lokalnimi konicami napetosti, ki prekoračijo mejo razteznosti in so odvisne od načina obremenjevanja in oblike orodja. Pri orodnih jeklih s trdoto nad 55 HRC je sposobnost jekla za plastično deformacijo tako majhna, da take konice napetosti nad mejo plastičnosti zelo lahko povzročajo začetke razpok, iz katerih se širi razpoka do zloma. Značilno odpornost orodnega jekla proti širjenju razpoke raziskujemo z modernimi metodami lomne mehanike. Da bi nevarnost lomov zmanjšali, moramo iskati kompromis med zagotavljanjem obstojnosti oblike in žilavostjo. Jeklo in njegovo stanje za orodje izberemo vedno tako, da je orodje čim trše, pri čemer pa je treba zagotoviti ravno tolikšno žilavost, da pri nastopajočih obremenitvah še ne pride do omenjenih inicialov in lomov. Pri orodjih imamo za razliko od drugih skupin jekel zelo majhne rezerve žilavosti. Zato moramo žilavosti orodij z visoko trdoto posvečati prav posebno pozornost. Na zmanjšanje nevarnosti lomov močno vpliva porazdelitev napetosti v orodju že med toplotno obdelavo in nato med uporabo orodja. Strokovno definiranje in obvladanje tehnologije toplotne obdelave orodij je izrednega pomena. Prav na tem področju se ob problematiki orodij lahko večkrat globoko zamislimo, ko ob najmodernejših možnostih izdelave orodij stojijo večkrat primitivna kalilnica kot zgodovinski spomenik — najpreprostejša peč s koritom za ohlajevalno sredstvo.



Slika 2

Trdote orodij in obdelovancev pri različnih postopkih obdelave

Fig. 2

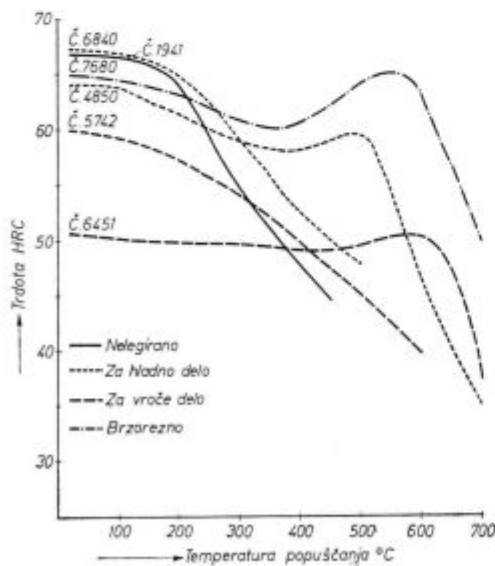
Hardnesses of tools and blanks in various stages of treatment

Zelo veliko danes uporabljenih orodnih jekel predstavlja velik problem. Raznolik in problematičen asortiment orodnih jekel lahko povežemo tudi z različnimi nacionalnimi usmeritvami razvoja ter delno z značilnimi tržnimi razmerami v preteklem obdobju. Včasih se močno odraža možnost oskrbovanja ferolitov ali pa določena kriza v zagotavljanju nekaterih dodatkov. Včasih je bilo prav od slučaja odvisno, da so se na tržišču znašle podobne in nepotrebne variante istih orodnih jekel — rezultatov razvoja posameznih jeklarn. To je še lažje razumljivo, če upoštevamo, da nekatera jekla izvirajo še iz časov, ko je bila kemijska sestava še tajna in so jo drug pred drugim skrbno skrivali. Tako seveda ni bilo praktičnih možnosti za sistematičen pregled in so bile neposredne primerjave večkrat nemogoče. Za različne skrivnostne tovarniške oznake je bil ključ poznan samo nekaterim. Tako je nastalo veliko vrst orodnih jekel, mnogo več kot pri drugih skupinah in zato se trudimo v današnjem obdobju reducirati asortimente, jih tipizirati in normirati. Da bi dosegli ta cilj, jih razdeljujemo in grupiramo po kemijski sestavi, po toplotni obdelavi, po področjih uporabe in ustreznih kombinacijah, za kar so kriteriji poznani.¹

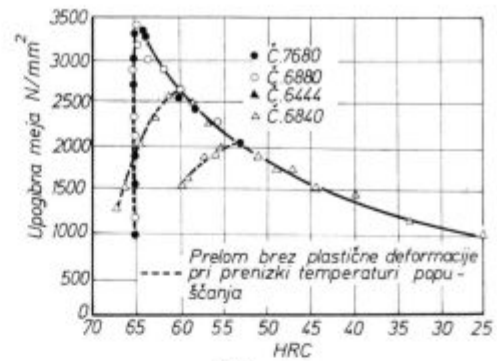
Pri nas največ uporabljamo razdelitev orodnih jekel po naslednjih skupinah:

- nelegirana ogljikova orodna jekla,
- legirana orodna jekla za delo v hladnem,
- legirana orodna jekla za delo v vročem,
- brzorezna jekla,
- orodna jekla za posebne namene.

Kakor kaže slika 3, je že popuščna obstojnost jekel iz posameznih skupin zelo različna.

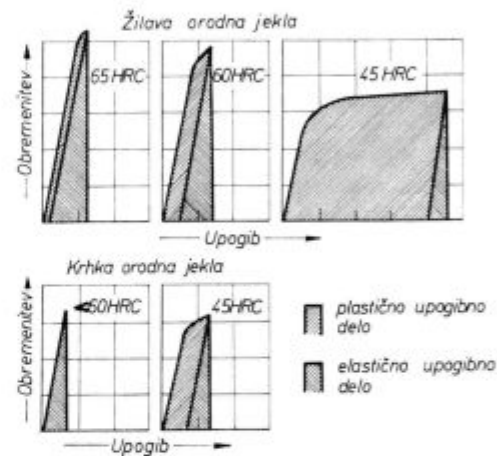


Slika 3
 Popuščna obstojnost orodnih jekel različnih skupin
 Fig. 3
 Tempering stability of various types of tool steel



Slika 4
 Medsebojna odvisnost upogibne meje in trdote nekaterih orodnih jekel¹

Fig. 4
 Mutual relationship between the bending limit and the hardness of some tool steel¹



Slika 5
 Krivulje obremenitev — upogib za žilava in krhka orodna jekla

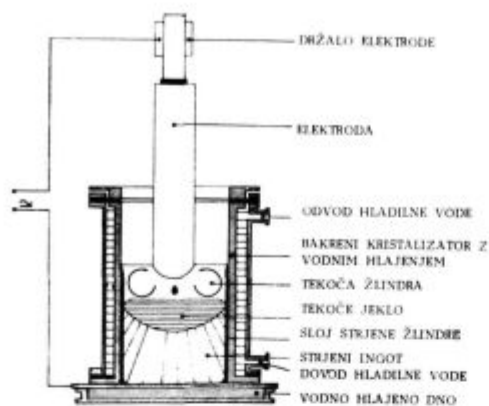
Fig. 5
 Load-bend curves for tough and brittle tool steel

Poleg poznanih podobnih primerjav¹ drugih značilnih lastnosti moramo posebej upoštevati pri izbiri orodnih jekel njihovo specifično obnašanje pri obremenitvah v posameznih območjih.

Za obstojnost oblike nekega orodja je odločilen naslednji pogoj: trdota mora biti vsaj tolikšna, da je od nje odvisna meja razteznosti ali plastičnosti višja od obremenitve, kateri je orodje izpostavljeno. Slika 4 kaže značilno medsebojno odvisnost upogibne meje in trdote nekaterih orodnih jekel.

Obstojnosti oblike orodij ni mogoče vedno zagotavljati preprosto s čim višjo trdoto, ker ta ni neodvisna lastnost materiala, ampak je neposredno povezana z odpornostjo proti obrabi in z zelo pomembno žilavostjo. Eno od meril žilavosti je tudi upogibno delo, kakor kaže slika 5.

Nelegirana in legirana orodna jekla se običajno izdelujejo v elektroobločnih jeklarskih pečeh, v nekaterih primerih tudi v indukcijskih in le izjemno še v Siemens-Martinovih pečeh. Prav na pod-



Slika 6

Shema električnega pretaljevanja pod žilindro (EPZ postopek)

Fig. 6

Scheme of electroslag remelting (ESR process)

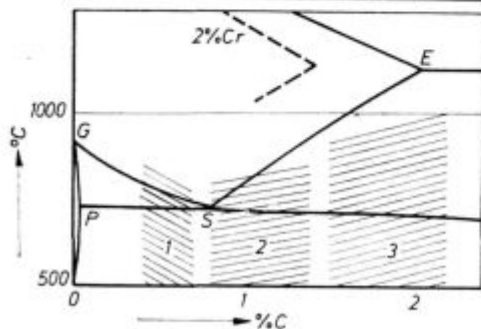
ročju orodnih jekel se najbolj uveljavljajo najmodernejši jeklarski postopki, ki omogočajo doseganje višje kakovosti jekla z odplinjevanjem, vakuumskim litjem ali prečrpavanjem ter s tako imenovano ponovno metalurgijo. Poseben pomen ima električno pretaljevanje pod žilindro (slika 6).

Vroča predelava orodnih jekel predstavlja posebno pri ledeburitnih orodnih in brzoreznih jeklih zelo pomembno tehnološko fazo, ki ima močan vpliv na lastnosti orodij. Zato bomo značilnosti vroče predelave, tako kakor tudi specifičnosti toplotne obdelave obravnavali pri posameznih skupinah, kjer so ti vplivi najpomembnejši.

ORODNA JEKLA ZA DELO V HLADNEM

Orodna jekla za delo v hladnem so namenjena za izdelavo orodij, ki se uporabljajo pri sobni temperaturi ali pa pri nekoliko povišanih temperatu-

Skupina	Stanje	Primer	Vsebnost karbidov %
1	podevtektoidno		-
2	nadevtektoidno		< 5
3	podevtektoidno ledeburitno		> 15



Slika 7

Razdelitev ogljikovih jekel za delo v hladnem na osnovi diagrama stanja Fe-C

Fig. 7

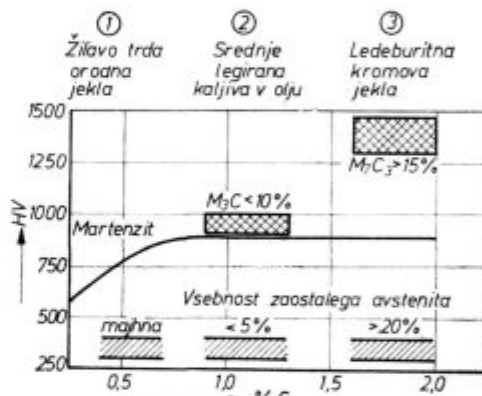
Distribution of carbon steel for cold working according to the Fe-C diagram

rah. Glavne značilne lastnosti jekel te skupine so žilavost, velika trdota in odpornost proti obrabi, rezna sposobnost ter obstojnost dimenzij in oblik. Za izredno široko področje uporabnosti orodnih jekel te skupine je potrebno veliko število različnih vrst jekel, ki jih moramo zaradi preglednosti razdeliti v podskupine po področjih uporabe. Ob tej priliki ne moremo zaradi omejenega obsega opisovati lastnosti posameznih jekel te skupine niti značilnosti posameznih podskupin. Zato poizkusimo prikazati ta jekla, razdeljena v tri skupine po metalurških kriterijih:

1. podevtektoidna jekla — brez karbidov,
2. nadevtektoidna jekla — z manj kot 5 % karbidov,
3. ledeburitna jekla — z več kot 15 % karbidov.

Ta razdelitev je shematično prikazana v diagramu Fe-C na sliki 7.

Za doseganje potrebne trdote moramo zagotoviti tvorbo martenzita, s tem da dosežemo na temperaturi kaljenja raztopitev 0,4—0,8 % C v osnovi.



Slika 8

«Mešana» trdota orodnih jekel za delo v hladnem (shema)

Fig. 8

«Mixed» hardness of tool steel for cold working (scheme)

Pri velikih presekih v jedru ne dosežemo več zadostne hitrosti ohlajevanja, zato moramo dodajati legirne elemente, kot so Cr, Mn, Ni in Mo za zmanjšanje kritične ohlajevalne hitrosti, potrebne za tvorbo martenzita. S temi elementi povečamo prekaljivost jekla.

Odpornost proti obrabi narašča s trdoto. Z dodajanjem karbidotvornih legirnih elementov Cr, Mo, W in V dosežemo poleg Fe karbida še druge vrste posebnih karbidov z visoko trdoto. S primerno velikostjo in razporeditvijo karbidov močno povečamo odpornost proti obrabi.

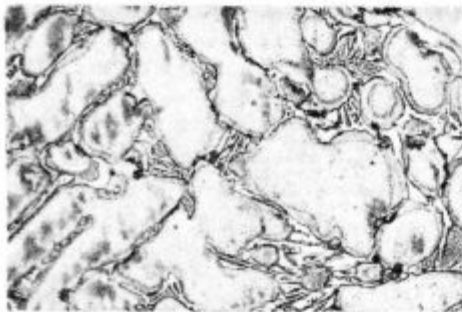
Žilavost je odvisna predvsem od osnovne mase jekla, precej pa tudi od razporeda in narave karbidov. Žilavost martenzita je slaba, zato dosežemo izboljšanje žilavosti s popuščanjem in čim finejšo porazdelitvijo karbidov. Praviloma se žilavost zmanjšuje s povečevanjem trdote in količine karbidov, vendar so podrobnejši odnosi dokaj zapleteni in ne tako direktni.

Glavni problem optimiranja lastnosti orodnih jekel za delo v hladnem je iskanje kompromisnega odnosa med žilavostjo in trdoto ter obstojnostjo proti obrabi.

Podvektoidna jekla imajo na kalilni temperaturi skoraj ves ogljik raztopljen v osnovi. Trdota se s povečano vsebnostjo ogljika sorazmerno povečuje (slika 8).

Nadevektoidna jekla imajo značilno vsebnost ogljika 0,8 do 1,5 %, vedno lahko dosežejo popolno martenzitno kaljenje z ustrezno trdoto nad 64 HRC. Večinoma ostanejo v strukturi tudi neraztopljeni karbidi, ki se izločajo iz avstenita pri postopku toplotne obdelave ter so zato mnogo finejši od tistih karbidov, ki izhajajo iz taline v postopku strjevanja.

Ledeburitna orodna jekla imajo vsebnost ogljika nad 1,5 %. Nelegirana jekla s tako vsebnostjo ogljika nimajo nobene praktične vrednosti. Ledeburito orodno jeklo z 12 % Cr in 2 % C je eno najstarejših klasičnih vrst orodnih jekel, ki je glede na domačo surovinsko bazo za nas še posebno pomembno. V dolgoletnem razvoju so nastale številne variante tega klasičnega jekla z dodatki

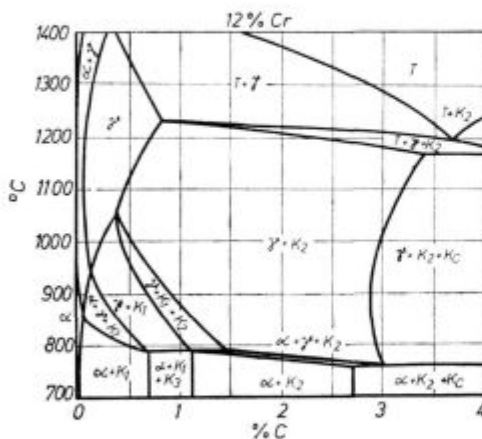


Slika 9

Mikrostruktura jekla C. 4150 — OCR 12 po strjevanju iz tekočega stanja na zraku

Fig. 9

Microstructure of Č. 4150 — OCR 12 steel after solidification from molten state in air

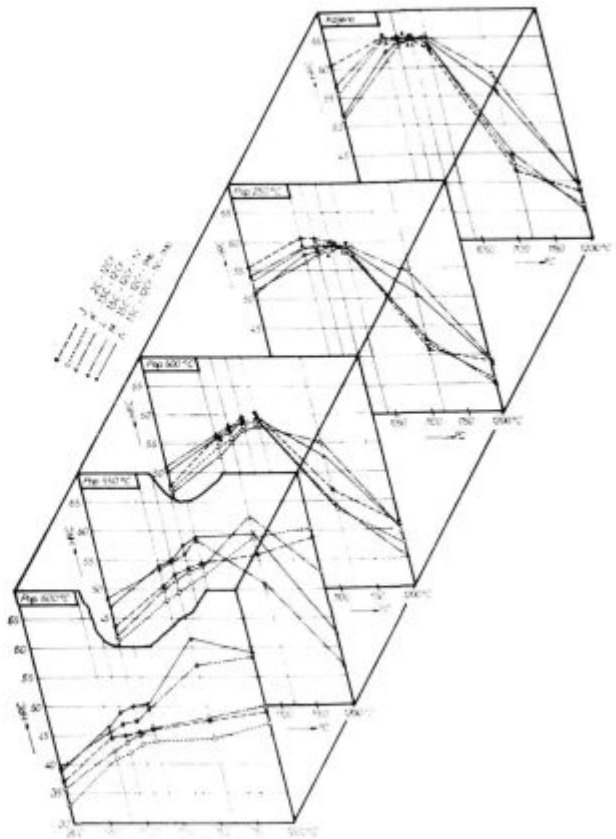


Slika 10

Prerez sistema¹ Fe-Cr-C za 12 % Cr

Fig. 10

Section of Fe-Cr-C system¹ at 12 % Cr



Slika 11

Vpliv kemijske sestave na trdoto po kaljenju in popuščanju

Fig. 11

Influence of chemical composition on the hardness after hardening and tempering

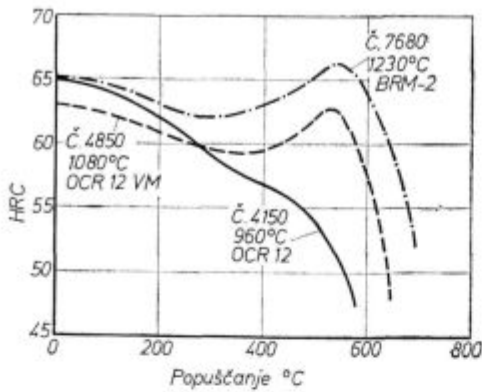
karbidotvornih elementov v zelo različnih razmerjih z ogljikom.

Smerne sestave tipičnih predstavnikov ledoburitnih orodnih jekel v proizvodnem programu železarne Ravne so naslednje:

Vrsta jekla	C %	Cr %	W %	Mo %	V %
Č. 4150 OCR 12	2,1	12	—	—	0,15
Č. 4650 OCR 12 special	2,1	12	0,8	—	0,15
Č. 4750 OCR 12 extra	1,65	12	0,55	0,65	0,15
C. 4850 OCR 12 VM	1,55	12	—	0,58	1
C. 4757 CRV	1	10	—	1	0,25

Ta skupina orodnih jekel je tradicionalno namenjena orodjem za delo v hladnem, domače raziskave zadnjega obdobja pa so pokazale nekatere nepričakovane lastnosti, posebno ugodne za uporabo tudi v vročem stanju.

Velika količina karbidov v teh jeklih z razporeditvijo, velikostjo in obliko odloča o mnogih specifičnih lastnostih teh jekel. Mikrostruktura je že po strjevanju zelo heterogena in njena glavna značilnost je prisotnost eutektika — ledoburita, ki v obliki mreže obdaja primarna zrna (slika 9).



Slika 12

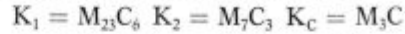
Popuščna obstojnost jekel z ledeburitnimi karbidi (poleg vrste jekla je navedena temperatura kaljenja za podano krivuljo popuščanja)

Fig. 12

Tempering stability of steel with ledeburite carbides (beside the steel type also hardening temperature is given for each tempering curve)

Zaradi sklenjene mreže trdega in krhkega evtektika je jeklo v takem stanju zelo krhko. Ledeburit je sestavljen iz gama trdne raztopine in karbidov, pretežno tipa M_7C_3 . Topnost ogljika v gama trdni raztopini pada s padajočo temperaturo, zato

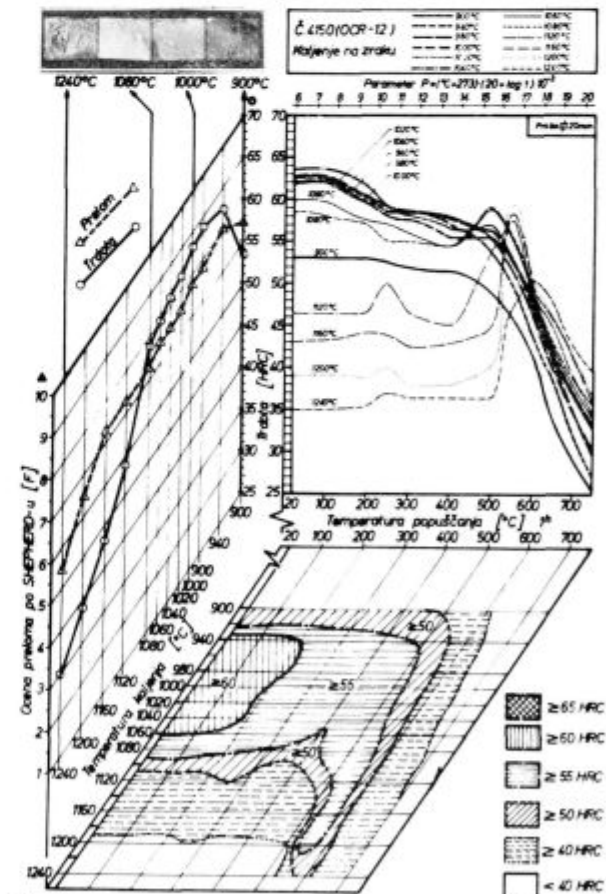
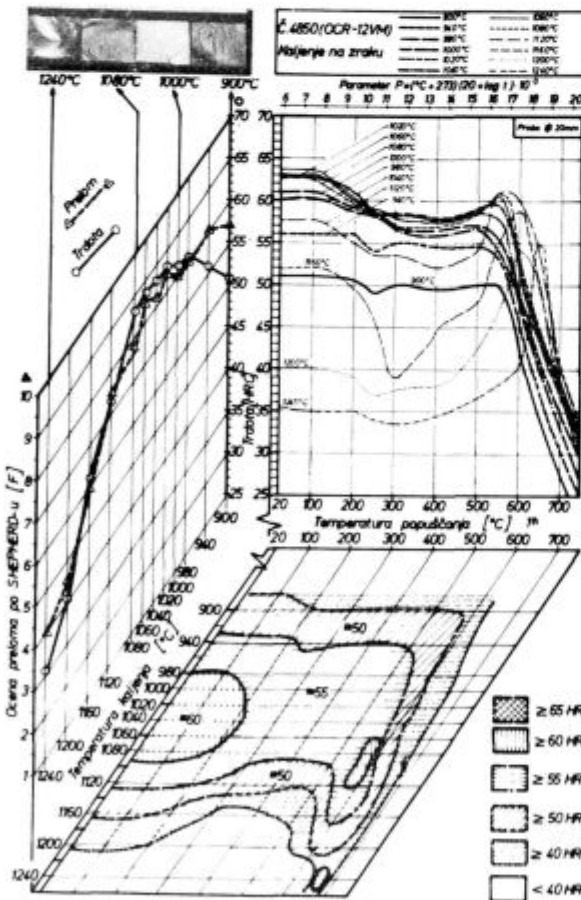
se izločajo še sekundarni karbidi. Pri počasnem ohlajanju se izločajo karbidi po mejah avstenitnega zrna in po dvojčičnih lamelah. Tako imamo pri sobni temperaturi v strukturi teh jekel ledeburitne karbide, sekundarne karbide in perlit. Slika 10 prikazuje prerez sistema Fe-Cr-C za 12 % Cr (po K. Bungardt, E. Kunze, E. Horn)⁶



Zaradi nizkega tališča v mikrostrukturi prisotnega evtektika so ledeburitna jekla zelo nagnjena k pregretju, kar moramo upoštevati pri vroči predelavi, kakor tudi pri toplotni obdelavi.

Pri ledeburitnih orodnih jeklih ima plastična predelava v vročem posebno nalogo, da na primeren način razbije mrežo evtektika in doseže čim bolj enakomerno razporeditev ledeburitnih karbidov po celotnem preseku. V različnih pogojih dobimo lahko vse mogoče vmesne stopnje od mrežaste razporeditve do rahlo trakaste ali skoraj idealno enakomerne porazdelitve karbidnih zrn. Razpored in velikost karbidov odločilno vplivata na lastnosti teh orodnih jekel v uporabi, zato se ta jekla tudi redno metalografsko kontrolirajo v več fazah tehnološkega procesa.

Značilnost prenizkih temperatur avstenitizacije so neraztopljeni drobni sekundarni karbidi. Opti-



Slika 13

Kalilne vrste in popuščni diagrami jekel Č. 4150 in Č. 4850 za kaljenje na zraku¹¹

Fig. 13

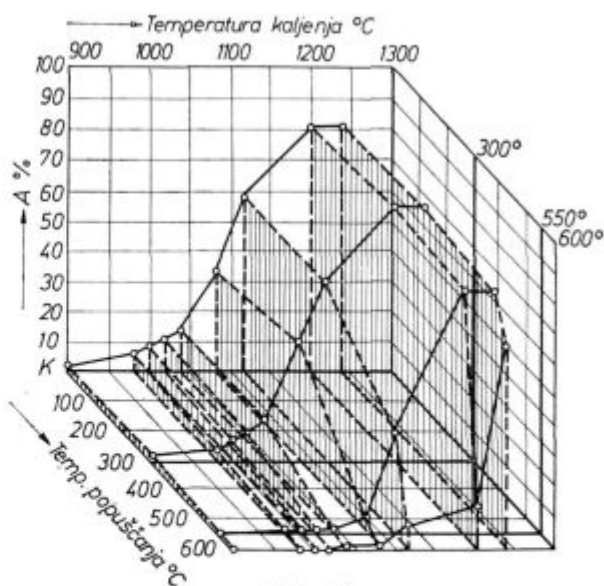
Quench lines and tempering diagrams of Č. 4150 and Č. 4850 steel for hardening in air¹¹

malna avstenitizacija je tista, ki omogoči maksimalno raztapljanje sekundarnih karbidov, a še ne povzroča naraščanja avstenitnega zrna. Znaki pregretja pri avstenitizaciji so grobo avstenitno zrno in koagulirani ali oglati karbidi na stičiščih zrn. Pri višjih temperaturah pregretja nastaja že evtektik v tipični obliki ledeburita zaradi prekoračitve temperature solidusa.

S serijo eksperimentalnih šarž smo ugotavljali vpliv ogljika, posameznih legirnih elementov in njihovih kombinacij na trdoto po kaljenju in popuščanju (slika 11).

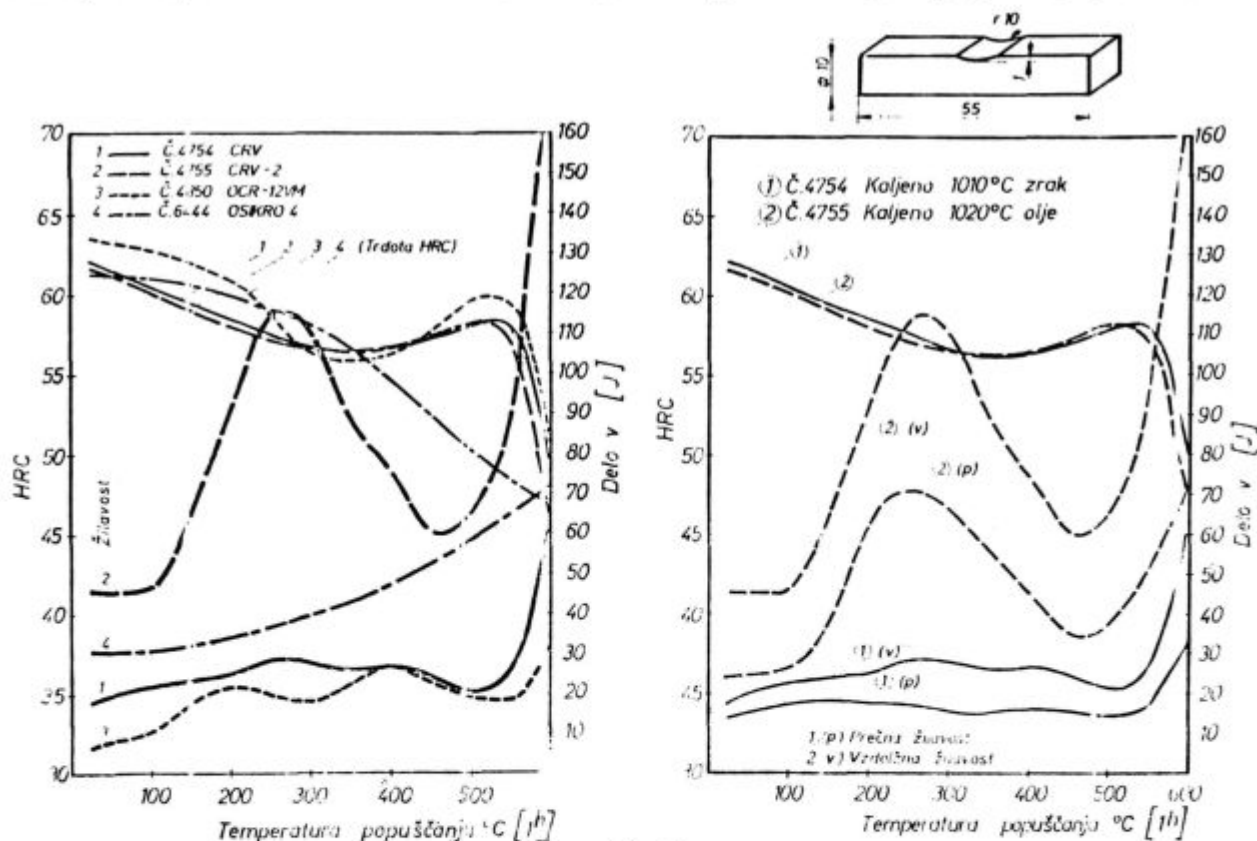
Iz slike 12 vidimo vpliv dodatkov Mo in V v jeklu C.4850 v primerjavi s klasičnim jeklom C.4150. Za primerjavo pa je prikazano še brzo-orno jeklo C.7680.

V normalnem območju kaljenja se pojavljajo pri popuščanju do 500 °C normalne popuščne mikrostrukture — predvsem popuščni martenzit. Pri nižjih temperaturah kaljenja se kažejo vplivi popuščanja v mikrostrukturi že pri 200 °C, pri višjih temperaturah kaljenja pa so pojavi popuščanja v mikrostrukturi opazni šele pri sorazmerno višjih temperaturah popuščanja. Podrobneje študiramo vpliv kaljenja in popuščanja na trdoto, zrnatost preloma in velikost avstenitnega zrna s prostorskimi prikazi po metodi železarne Ravne (slika 13).



Slika 14
Zaostali avstenit v jeklu C.4850 — OCR 12 VM
Fig. 14
Retained austenite in C.4850 — OCR 12 VM steel

Dobra prekaljivost ledeburitnih orodnih jekel, ki jo prikazujejo značilni TTT diagrami, omogoča zelo počasno ohlajevanje pri kaljenju, kar je zelo



Slika 15
Primerjave trdot in žilavosti štirih vrst orodnih jekel s probami za udarno upogibno žilavost 10 × 10 × 55 mm³ z oslabitvijo 1 mm/R 10 mm

Fig. 15

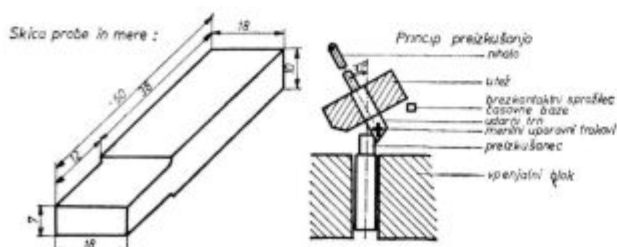
Comparisons of hardnesses and toughnesses for four tool steel types by the impact bending toughness tests with 10 × 10 × 55 mm³ samples with 1 mm/R 10 mm weakening

ugodno za dimenzijsko obstojnost in zmanjšanje napetosti pri toplotni obdelavi. Po kaljenju je v mikrostrukturi določen delež zaostalega avstenita, ki se s temperaturo kaljenja povečuje in je stabilen do razmeroma visoke temperature popuščanja. Za jeklo Č. 4850 — OCR 12 VM so vse meritve zaostalega avstenita prikazane na sliki 14 trodimenzionalno, tako da je očitno vpliv temperature kaljenja in popuščanja.

Deformacije zaradi povečanja volumna pri tvorbi martenzita se s precejšnjo količino zaostalega avstenita, ki ima manjši specifični volumen, precej izenačijo. Z izbiro ustrezne temperature kaljenja je mogoče količinsko razmerje martenzita in zaostalega avstenita ob upoštevanju potrebne trdote tako regulirati, da so deformacije najmanjše. Seveda je pri tem potrebno upoštevati tudi popuščanje. Moderne metode dilatometrskih preiskav omogočajo simuliranje delovnega ciklusa toplotne obdelave in spremljanje dimenzijskih — volumskih sprememb zaradi strukture. Če tem ugotovitvam dodamo še pričakovane dimenzijske spremembe zaradi različnih presekov pri ogrevanju in ohlajevanju, lahko dokaj natančno napovedujemo volumske spremembe in deformacije, katere moramo vsekakor še v praksi preverjati in na osnovi dokumentacije ustrezno kompenzirati. Karbidi niso podvrženi volumskim spremembam med kaljenjem in če upoštevamo, da je njihov delež približno 15—20 %, potem je glede deformacij zelo ugodno, da približno 1/5 volumna jekla ostaja pri kaljenju glede volumskih sprememb nevtralna.

Žilavost je ena najpomembnejših in obenem najbolj problematična lastnost orodnih jekel. S statičnim upogibnim in torzijskim preizkušanjem se precej oddaljujemo od dejanskih karakteristik obremenitev orodij pri uporabi. Čeprav to metodo mnogi avtorji zelo propagirajo, se zanjo v železarni Ravne nismo ogreli. Največ podatkov imamo o preizkušanju žilavosti orodnih jekel s preizkušancem, ki ima samo rahlo oslabitev preseka namesto zareze, kakršno za primer kažejo primerjave na sliki 15.

Za preizkušanje trdih orodnih jekel smo na podlagi večletnih izkušenj v železarni Ravne raz-



Slika 16

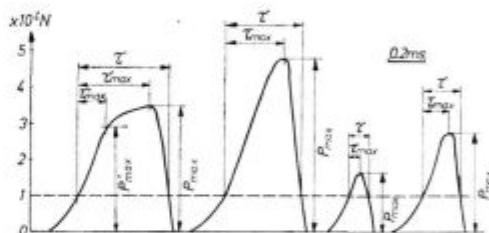
Oblika preizkušanca z glavnimi merami in princip preizkušanja po metodi ZR

Fig. 16

Shape of sample with main dimensions, and the principle of testing by the ZR method

vili tako imenovano metodo ZR, ki nekako standardizira kompleksno preizkušanje trdih orodnih jekel in vključuje tudi preizkušanje žilavosti s t. i. instrumentiranimi meritvami. Princip preizkušanja prikazuje slika 16.

Značilnost metode ZR za preizkušanje žilavosti je merjenje maksimalne sile pri zlomu, kar je za oceno žilavosti trdih orodnih jekel že s praktičnega stališča uporabnosti orodij precej bolj upravičeno kot merjenje dela, porabljenega za zlom preizkušanca. Porabljeno delo ima pri konstrukcijskih jeklih z veliko sposobnostjo deformacije povsem drug pomen kot pri trdih orodnih jeklih, ki se zelo malo plastično deformirajo. Ko zaradi upogibne obremenitve na površini nastane prva razpoka — porušitev, je orodje praktično že uničeno, za nadaljnji potek loma pa se lahko porabi še razmeroma veliko delo in dolg čas. Lahko pa trdimo, da je zlom v takem primeru samo še vprašanje časa, je pa neizbežen, če bi z enakim ali celo manjšim obremenjevanjem orodja nadaljevali. Po-



Slika 17

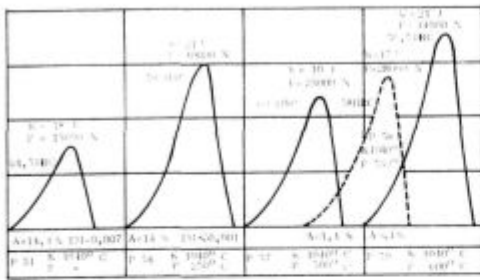
Različni tipi krivulj in principi odčitavanja pri meritvah žilavosti po metodi ZR

Fig. 17

Various types of curves, and principles of reading in toughness measurements by the ZR method

rabljeno delo za zlom preizkušanca torej ne more biti merilo pri oceni uporabnosti jekla za orodje, čeprav je glede varnosti pri uporabi orodij tudi to delo precej pomembno. Pri preizkušanju je torej odločilnega pomena ugotovitev tiste kritične sile, ki povzroči prvo razpoko, oziroma začetek porušitve! Tako ugotovitev sile nam lahko omogoči samo instrumentirana meritev z registriranjem celotnega časovnega poteka sile pri poizkusu. Celotno za zlom porabljeno delo je vsekakor zelo zanimiva dodatna informacija, ki marsikaj pove o mehanizmu loma. Metoda ŽR bo v kratkem podrobneje opisana v Železarskem zborniku, zato se pri opisu njenih značilnosti ne bomo posebej zadrževali. Za ilustracijo prikazuje slika 17 štiri značilne tipe registriranih krivulj odvisnosti sila — čas.

Slika 18 prikazuje selektivno sposobnost teh meritev s primerjavo enako kaljenih preizkušancev istega izvora, tako da so vse razlike samo posledica popuščanja.



Slika 18

Primerjava žilavosti preizkušancev jekla Č. 4850 — OCR 12 VM istega izvora kaljenih na 1040 °C v olju in popuščanih na različne temperature v območju normalnih delovnih trdot¹²

Fig. 18

Comparison of toughness of Č. 4850 — OCR 12 VM steel samples of the same origin, hardened at 1040 °C in oil and tempered to various temperatures in the region of normal working hardnesses¹²

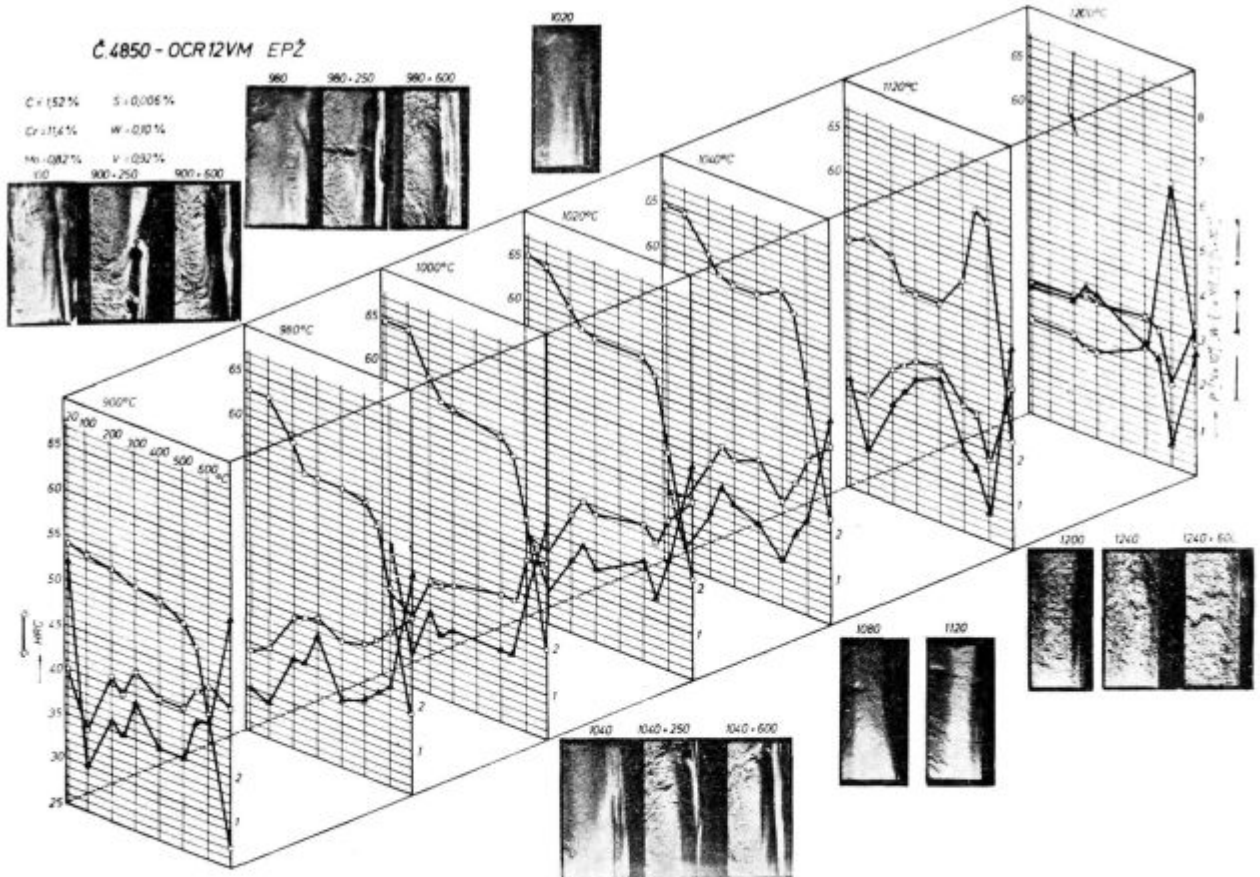
Povzetek takih meritev kaže slika 19 kot primer za jeklo Č. 4850 — OCR 12 VM.

Razvojne smeri:

Glavni cilj razvoja na področju orodnih jekel za delo v hladnem je zmanjšanje preštevilnega asortimenta jekel te skupine s poenotenjem in znanstveno osnovano tipiziracijo legiranih orodnih

jekel podobne sestave. Ni potrebno posebej razlagati in utemeljevati ekonomske in tehnične prednosti, povezane s približevanjem temu cilju. Poleg teh teženj je razvoj usmerjen predvsem na izboljšanje izdelovalnih in uporabnih lastnosti tako izbranih standardiziranih jekel:

- znižanje trdote v mehko žarjenem stanju za izboljšanje obdelovalnosti z odvzemanjem materiala in sposobnosti za hladno vtiskovanje,
- zmanjšanje površinskega razogljichenja in s tem zmanjšanje dodatkov za obdelavo, kar dosežemo z modernizacijo postopkov ogrevanja pri vroči predelavi in žarjenju v vakuumu in zaščitnih atmosferah,
- izboljšanje in uvajanje modernih livnih postopkov za izdelavo litih ali pa predvlitih orodij,
- ukrepi za skrajšanje terminov in ekonomsko ugodnejšo izdelavo orodnih jekel,
- zmanjšanje vsebnosti nemetalnih vključkov,
- zagotavljanje finejših karbidov in boljše razporeditve karbidov v osnovi z različnimi tehnološkimi postopki pri izdelavi, predelavi in toplotni obdelavi jekla,
- izboljšanje žilavosti jekla,
- doseganje enakomernih lastnosti in splošne homogenosti po preseku.



Slika 19

Primer prostorskega prikaza kalilne vrste in popuščnih diagramov po metodi 2R

Fig. 19

Space presentation of the quenching line and the tempering diagrams by the 2R method

Poleg glavnih razvojnih tendenc v smeri tipizacije in zmanjšanja asortimenta pa so le na tem področju tudi aktualne raziskave in razvoj nekaterih novih vrst jekel. Široko uporabljena žilavo trda orodna jekla moramo popuščati samo pri nizkih temperaturah, da bi zadržali potrebno trdoto. Da bi lahko povišali temperature popuščanja in s tem zmanjšali notranje napetosti, je interesanten razvoj optimiranih Cr-Mo-W-V orodnih jekel, ki dosežejo sekundarno trdoto po popuščanju na 500 °C s trdoto nad 55 HRC. Značilna primera tega razvoja sta novi vrsti orodnih jekel v proizvodnem programu železarne Ravne.

— Č. 4757 — Utop Mo 4 z 0,5 % C — 1 % Si — 0,4 % Mn — 5 % Cr — 1,5 % Mo — 1 % V,

— Č. 4755 — CRV 2 z 0,5 % C — 0,9 % Si — 0,4 % Mn — 8,5 % Cr — 1,3 % Mo — 1,2 % W — 0,1 % V.

Ti dve vrsti jekla z razmeroma nizkim ogljikom vsebujeta v kaljenem stanju še karbide in kažeta s tem boljšo odpornost proti obrabi ob istočasno izboljšani žilavosti. Poleg odlične kombinacije trdote in žilavosti kažeta obe vrsti jekla značilni efekt sekundarne trdote, ki omogoča tudi nitriranje orodij, s čimer se izboljša odpornost proti obrabi. To lastnost omogočata predvsem dodatka molibdena in vanadija, tako kot pri jeklu Č. 4850 — OCR 12 VM.

Nadaljnji razvoj je usmerjen v izenačevanje dimenzijskih sprememb v vzdolžni in prečni smeri paličastega jekla. Pri tem imajo karbidi zelo pomembno vlogo, uravnavanje lastnosti pa dosežemo predvsem s specialno tehnologijo plastične deformacije v vročem.

Za izboljšanje odpornosti proti obrabi pri ledeburitnih kromovih jeklih je izražena v zadnjem času tendenca zviševanja ogljika. S tem se povečuje delež karbidov M_7C_3 . Omejitvev pri tem razvoju je bila slaba predelavna sposobnost — težave pri kovanju ob tako visoki vsebnosti ogljika. Šele z uvedbo EPŽ postopka, ki omogoča usmerjeno kristalizacijo jekla, je postalo mogoče kovanje ledeburitnih jekel z 2,9 % C in 12 % Cr, ki ima kar 25 % karbidov v strukturi.

ORODNA JEKLA ZA DELO V VROČEM STANJU

Orodna jekla te skupine so namenjena izdelavi orodij, ki so med delom izpostavljena povišanim in visokim temperaturam. Orodja so izpostavljena termičnim in mehanskim obremenitvam v najrazličnejših kombinacijah. Razumljivo je, da od teh jekel zahtevamo maksimalno popuščno obstojnost, najzahtevnejša pa je zagotovitev odpornosti proti nihanjem temperature in temperaturnim šokom. Najpomembnejše mehanske lastnosti, velika trdnost, visoka trdota in odpornost proti obrabi ter žilavost so vedno povezane s povišanimi ali visokimi temperaturami.

Pri orodjih za delo v vročem lahko razlikujemo dve osnovni skupini:

— utopi za kovanje in orodja, izpostavljena udarnim — dinamičnim obremenitvam pri povišanih temperaturah,

— orodja za vroče stiskanje, litje pod pritiskom in vsa ostala orodja za delo v vročem.

Ta skupina orodnih jekel je tudi zelo številna in zahteva obvladanje zelo številnih ter dokaj problematičnih specifičnih lastnosti. Upoštevaajo osnovno tematiko posvetovanja, se bomo omejili le na kratko opredelitev osnovnih skupin orodnih jekel za delo v vročem brez podrobnejšega obravnavanja njihovih značilnih lastnosti.

Najpomembnejše skupine orodnih jekel za delo v vročem so naslednje:

— W-Cr-V orodna jekla se odlikujejo z najboljšimi mehanskimi lastnostmi v vročem stanju. Jekla te podskupine imajo največjo trdnost v vročem stanju in zelo veliko popuščno obstojnost, zato so namenjena za najbolj toplotno obremenjena orodja, ki se ne morejo intenzivneje hladiti med delom. Slaba stran teh jekel je toplotna prevodnost in občutljivost za temperaturne spremembe.

— Cr-Mo-V orodna jekla imajo mnogo boljše toplotno prevodnost in so prav zato namenjena orodjem, ki se intenzivno ohlajajo in imajo kratke temperaturne cikle z velikim nihanjem temperature.

— Ni-Mo orodna jekla se prvenstveno uporabljajo za orodja, ki so izpostavljena bolj dinamičnim in udarnim obremenitvam, niso pa toliko toplotno obremenjena.

— Posebno skupino predstavljajo orodna jekla, ki se uporabljajo v vročem in v hladnem ter so zelo žilava, legirana z volframom, kromom in silicijem.

— Mn-Si jekla že spadajo bolj v skupino konstrukcijskih jekel, ki se uporabljajo tudi za delo v vročem pri manjših obremenitvah.

BRZOREZNA JEKLA

Brzorezna jekla se pretežno uporabljajo za rezalna orodja, v zadnjih letih pa vedno bolj tudi za oblikovalna orodja. Značilna kemična sestava in specifična toplotna obdelava zagotavlja visoko popuščno obstojnost in trdoto v vročem ter obstojnost značilnih lastnosti do rdečega žara. Čeprav njihovo uporabnost na področju odrezovanja omejujejo trde kovine in keramika, poraba brzoreznih jekel še vedno raste s povprečno stopnjo 3 % in se njihov pomen ne zmanjšuje zaradi naslednjih prednosti:

— so manj nagnjena k lomljenju in se uporabljajo za rezanje, predvsem na strojih z manjšo stabilnostjo in za izdelavo orodij takih oblik in izdelovalnih postopkov, kjer uporaba trdih kovin skoraj ni mogoča;

— se bistveno lažje obdelujejo pri izdelavi orodij, medtem ko trde kovine lahko ob posebno zahtevnih pogojih le brusimo. Vsa orodja kompliciranih oblik, kot spiralni in navojni svedri, oblikovalna prevlačna orodja in večji del frezal, se iz teh razlogov izdelujejo samo iz brzoreznih jekel.

Možna in smiselna področja uporabe so tako opredeljena, da se že nekaj let skoraj niso spremenile meje uporabnosti brzoreznih jekel in trdih kovin. Porazdelitev količine porabljenih brzoreznih jekel po vrstah rezalnih orodij ocenjujemo takole:

- 15 % za strugarske nože,
- 45 % za frezala,
- 10 % za skobelna orodja,
- 25 % za spiralne in navojne svedre,
- 5 % za prevlačne igle, povrtala in druga orodja.

V zadnjih 20 letih se je v svetu uporabljalo več kot 50 bolj ali manj različnih vrst brzoreznih jekel. Tako številni in neutemeljeni assortmenti je prav gotovo neposredna posledica specifičnega zgodovinskega razvoja.

Presenetljiva je ugotovitev, da so začetki tako kompliciranega legirnega sistema, kot so brzorezna jekla, že v sredini preteklega stoletja in torej sovpadajo s časom odkritja in prve uporabe legiranih jekel. Že leta 1868 je R. Mushet v Angliji izdelal prvo zlitino, nekoliko podobno brzorezemu jeklu. Kljub boljši rezalni sposobnosti od dotlej poznanih orodnih jekel s tem še niso bile dosežene značilnosti kasnejših brzoreznih jekel, katerih »rojstvo« pripisujemo pravzaprav posebni toplotni obdelavi. Leta 1898 sta namreč F. W. Taylor in J. White ugotovila, da ogrevanje tega jekla v bližini tališča — kar so pred tem smatrali za izredno škodljivo — omogoča izredne rezalne sposobnosti zaradi višje odpornosti proti popuščanju in trdote v vročem. To odkritje je še danes temelj značilne toplotne obdelave brzoreznih jekel, ki se razlikuje od vseh drugih vrst jekla. Pravo brzorezno jeklo s približno 4 % Cr, 18 % W in 1 % V, ki se še danes uporablja, sta uvedla Mathews in Mc Kenna leta 1910. Nadaljnji razvoj brzoreznih jekel je prinesel dodatke kobalta za izboljšanje trdote v vročem in doseganje rezalne sposobnosti pri vse večjih hitrostih rezanja. Leta 1939 je Gill uvedel brzorezna jekla z višjim ogljikom in dodatki vanadija do 5 %, posebno namenjena fini obdelavi in fazonskim orodjem natančnih oblik. Obdobje 1940 do 1952 je prineslo nadomeščanje volframa z molibdenom, najprej zaradi krize volframa, nato pa vedno bolj zaradi ugotovljenih značilnih lastnosti molibdena. Leta 1962 je prvo brzorezno jeklo doseglo trdoto 70 HRC, kar pomeni začetek razvoja superbrzoreznih jekel.

Zgodovinski razvoj kaže, da se brzorezna jekla niso razvijala sistematično, ampak so v daljšem časovnem obdobju rezultat slučajnih odkritij, reševanja kriz in iskanja novih, boljših specifičnih

lastnosti. Kljub naporom za zmanjševanje asortimenta, za tipizacijo in standardizacijo na področju brzoreznih jekel razvoj še ni končan, ampak je z novimi spoznanji in novimi tehnološkimi postopki prav na tem področju morda najbolj obetajoč.

Lastnosti brzoreznih jekel in njihovo toplotno obdelavo, vplive legirnih elementov in specifične lastnosti opisuje zelo številna literatura in katalogi proizvajalcev³, zato pogledjmo, kakšen je današnji pomen posameznih skupin. Poraba brzoreznih jekel v Evropi⁷ je po deležih značilnih tipov brzoreznih jekel naslednja:

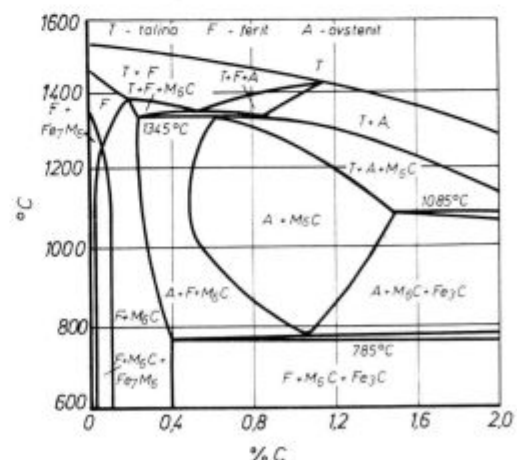
- 75—85 % tipi 6 W — 5 Mo,
- 5—10 % tipi 2 W — 9 Mo,
- 10—20 % tipi 18 W — 0 Mo in 12 W — 1 Mo.

V ZDA je delež tipa 6 W — 5 Mo znatno manjši (50 %), delež tipa 2 W — 9 Mo pa izredno velik (45 %), medtem ko odpade na dokaj zastarela brzorezna jekla z 18 ali 12 % W samo 5 % potrošnje.

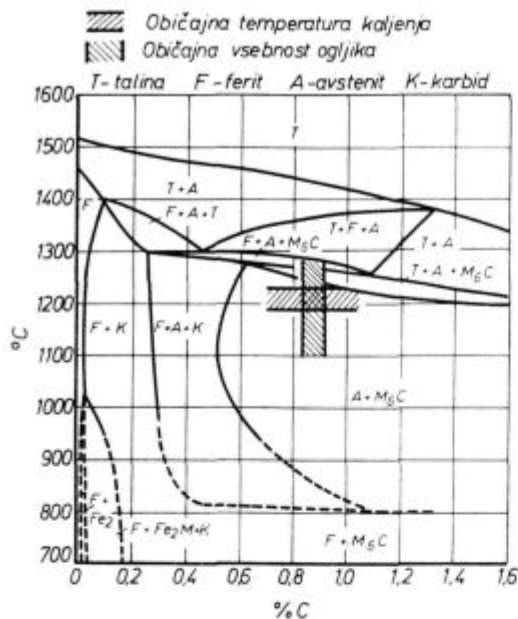
V različnih državah so ta razmerja zelo različna zaradi specifičnih izkušenj in »priljubljenosti« posameznih tipov jekla, pa tudi zaradi ekonomskih in komercialnih prilik. Zaradi izrednega nihanja in skokovitih sprememb v cenikih ferozlitin je v današnjem razvoju kakršnokoli dolgoročneje načrtovanje skoraj nemogoče.

Brez dvoma lahko trdimo, da je brzorezno jeklo 6-5-2 danes najpomembnejše, ker ima bistveno finejše karbide od visoko volframovih brzoreznih jekel in s tem zagotovljeno najboljšo žilavost. Brzorezna jekla z 18 % volframa se uporabljajo le še zaradi manjše občutljivosti pri kaljenju, kar pa ob modernih napravah za toplotno obdelavo skoraj ni več pomembna prednost.

Brzorezna jekla imajo vrsto značilnih lastnosti, po katerih se bistveno razlikujejo od vseh drugih vrst orodnih in konstrukcijskih jekel, le z orodnimi jekli ledeburitnega tipa na bazi visokega



Slika 20
Diagram stanja⁴ Fe-Cr-W-C za 4 % Cr in 18 % W
Fig. 20
Fe-Cr-W-C phase diagram⁴ for 4 % Cr and 18 % W



Slika 21
Diagram stanja za jeklo 6-5-2
Fig. 21
Phase diagram for 6-5-2 steel

ogljika in visokega kroma imajo nekaj podobnosti. Mikrostruktura je že v litem stanju izrazito heterogena¹⁴. Primarna zrna so obdana s sklenjeno mrežo eutektika, tipične ledeburitne oblike, ki ima visoko trdoto in je zelo krhek.^{14,15}

Heterogenost strukture pojasnjujeta diagrama stanja na slikah 20 in 21.

Na sliki 21 je vrisano tudi območje običajne temperature kaljenja.

Pri brzoreznih jeklih imamo opravka z naslednjimi tipi karbidov:

Primarni karbidi	Sekundarni karbidi
MC (VC/V ₄ C ₃)	MC
M ₂ C ([W, Mo] ₂ C)	M ₆ C
M ₆ C (Fe ₁ [W, Mo] ₂ C)	M ₂₃ C ₆ (Cr ₂₃ C ₆)

Različni avtorji navajajo podrobneje še več različnih variant karbidov. Pri jeklu tipa 2-9-1 so prisotni tudi karbidi M₂C igličaste oblike.

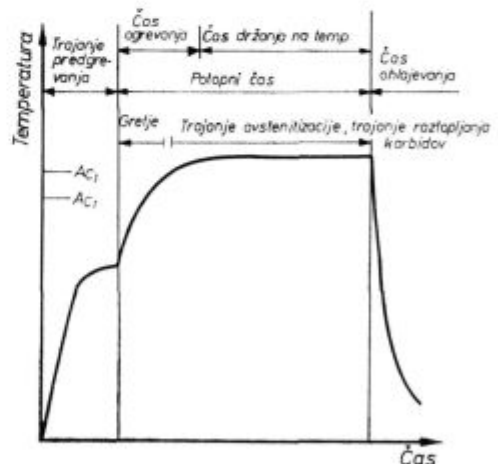
Ce upoštevamo sestavo in lastnosti karbidov v jeklu 6-5-2, lahko karbide razdelimo v dve skupini:

- nizko legirani karbidi M₆C in M₂₃C₆ z okrog 50 % legirnih elementov,
- visoko legirani karbidi M₂C in MC z okrog 80% legirnih elementov.

Značilne profile koncentracij najpomembnejših elementov v kemijski sestavi brzoreznih jekel ugotavljamo z mikrosondo, pri čemer se poslužujemo elektronskih topografskih posnetkov, specifičnih X — posnetkov, profilov koncentracij posameznih elementov z linijsko analizo in točkovnih analiz za kvantitativno ugotavljanje koncentracij¹³.

Iz dosedanjih opisov mikrostrukture^{14,15} in njenih značilnosti je razumljivo, da prav pri tovrstnih jeklih najbolj velja, da s kovanjem ali valjanjem ne dajemo tem jeklom samo potrebne oblike, ampak moramo zagotoviti tudi ali pa celo predvsem čimboljšo stopnjo enakomernosti strukture, od katere so bistveno odvisne uporabne lastnosti orodij. Mreža ledeburitnega eutektika je krhka, kar so nazorno pokazale številne preiskave prelomov z rastrskim elektronskim mikroskopom¹².

Pomen karbidne mreže, trakavosti, oz. različnih stopenj neenakomernosti karbidnih izcej je pri brzoreznih jeklih dobro poznan in zato prav temu posvečamo pri metalografski kontroli kakovosti največ pozornosti. Tehnologija plastične predelave v vročem ima pri tem zelo velik vpliv, vendar nastopajo velike razlike že po strjevanju jekla v odvisnosti od tehnologije izdelave jekla in litja, od formatov ingota in drugih jeklarskih tehnoloških pogojev. V konvencionalni proizvodnji brzoreznih jekel so običajno največji formati ingotov okrog 500 do 700 kg in le v redkih primerih dosega in presegajo težo 1 tone. To predstavlja veliko omejitev pri možnostih izdelave paličastega jekla večjih dimenzij, če hočemo zagotoviti potrebno stopnjo predelave za doseganje enakomernosti. Zato so največja orodja, kot so npr. odvalna frezala modulov 20 in celo več, dolga leta izdelovali le iz vsestransko kovanih pogač brzoreznega jekla, katere so bili sposobni dobavljati le najbolj specializirani proizvajalci brzoreznih jekel. Na področju kovanja največjih dimenzij brzoreznega jekla je odprl povsem nove možnosti postopek električnega pretaljevanja pod žlindro z možnostmi kontroliranega in usmerjenega strjevanja. Na ta način lahko danes železarna Ravne s svojo tehnologijo proizvaja brzorezno jeklo v paličasti izvedbi do



Slika 22
Shema temperaturno časovnega režima pri kaljenju brzoreznega jekla v solnih kopelih z zvezo med potopnim časom, časom ogrevanja in časom držanja na temperaturi avstenilizacije

Fig. 22
Sheet of temperature-time conditions in hardening high-speed steel in salt baths related to the dipping time, heating time, and holding time on the austenitisation temperature

premera 350 mm \varnothing in do 3,5 tone teže. Prav zaradi teh možnosti teži železarna Ravne k specializaciji za kovanje največjih dimenzij brzoreznih jekel, ker prav za to področje ni mnogo proizvajalcev, ki bi imeli take ustrezne možnosti.

Številne domače raziskave so pokazale, da je za kakovost in uporabne lastnosti mnogo bolj kot enakomernost razporeditve karbidov pomembna velikost karbidnih zrn.

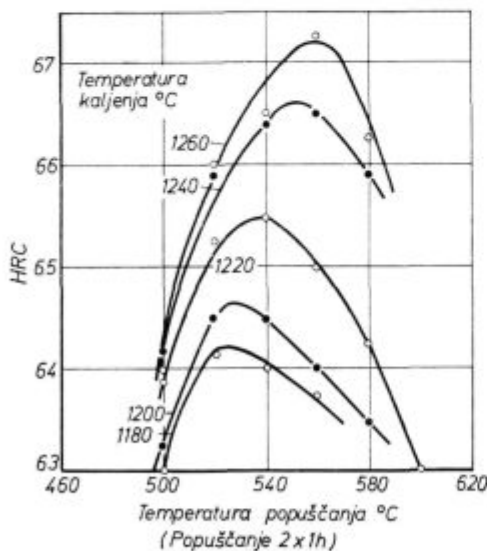
Toplotna obdelava s pregledom značilnih mikrostruktur je prikazana podrobno v katalogu³ železarne Ravne z vsemi potrebnimi napotki. Na tem mestu naj omenimo le, da je čas avstenitizacije pri kaljenju brzoreznih jekel bistveno krajši kot pri drugih orodnih jeklih, zato ga moramo tudi natančno predpisovati in kontrolirati kot tako imenovani potopni čas (slika 22).

Če je temperatura prenizka ali čas prekratek, ostane preveč neraztopljenih karbidov v avstenitu; če je čas predolg, začne naraščati zrno toliko hitreje, kolikor je višja temperatura. Če temperatura prekorači zgornjo mejo, pride do nevarnosti nataljevanja ledeburitnega eutektika z izredno škodljivimi posledicami.

Sliki 23 in 24 kažeta vpliv temperature kaljenja in vpliv ponavljajočega popuščanja na trdoto brzoreznega jekla.

Čim višja je temperatura kaljenja, toliko bolj je izražen poznani efekt sekundarne trdote in maksimum je pomaknjen toliko bolj k višji trdoti in k višji temperaturi popuščanja. Ponavljanje popuščanja pomika vrh sekundarne trdote k nižji temperaturi popuščanja.

Značilnosti kaljenja brzoreznih jekel so vezane na značilnosti strukturnih premen, podanih s TTT diagrami.

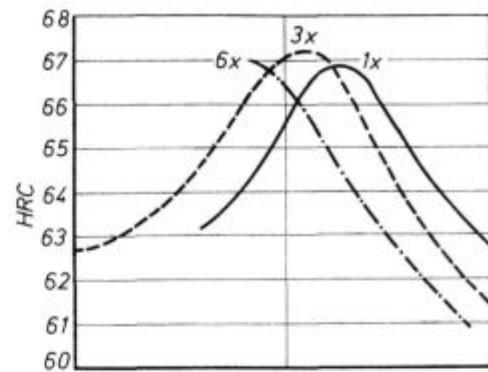


Slika 23

Vpliv temperature kaljenja na sekundarno trdoto in popuščno obstojnost brzoreznega jekla

Fig. 23

Influence of the hardening temperature on the secondary hardness and tempering stability of high-speed steel

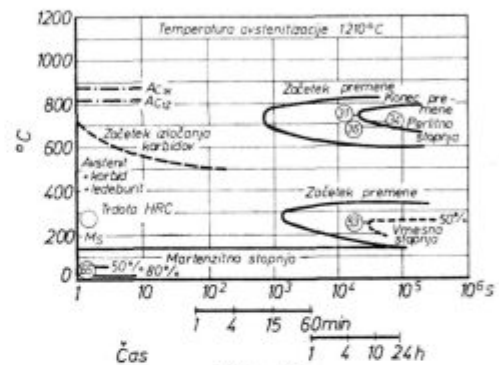


Slika 24

Vpliv ponavljanja popuščanja na trdoto brzoreznega jekla (shema)

Fig. 24

Influence of repeated tempering on the hardness of high-speed steel (scheme)

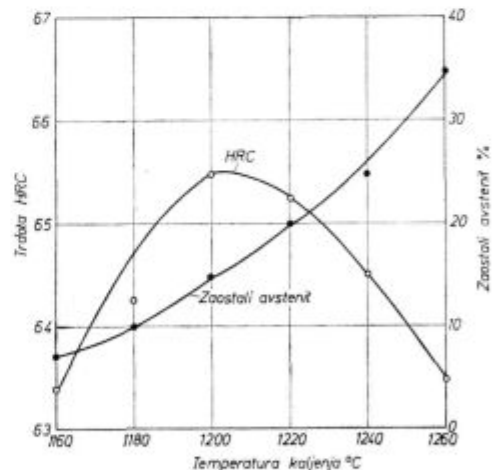


Slika 25

Izotermalni TTT diagram brzoreznega jekla 6-5-2

Fig. 25

Isothermal TTT diagram for 6-5-2 high-speed steel



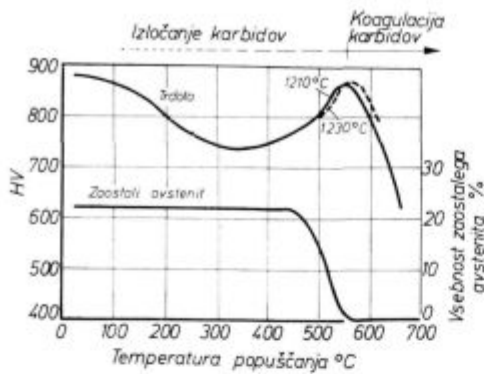
Slika 26

Vpliv temperature kaljenja na trdoto in vsebnost zaostalega avstenita

Fig. 26

Influence of hardening temperature on the hardness and content of retained austenite

Trdota najprej s temperaturo kaljenja narašča na osnovi naraščajočega raztapljanja ogljika in legirnih elementov, po prekoračenju kalilnega maksimuma pa spet pada na osnovi povečanega

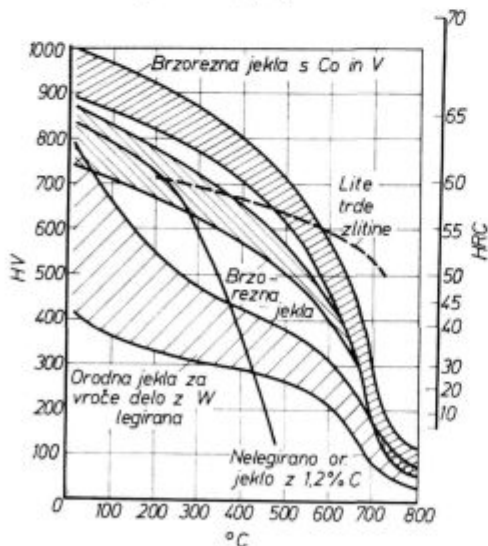


Slika 27
Popuščanje brzoreznega jekla
Fig. 27
Tempering of high-speed steel

deleža mehkejšega zaostalega avstenita. Po kaljenju je struktura brzoreznega jekla naslednja: evtektični karbidi, martenzit, zaostali avstenit in karbidi na mejah zrn. Proces popuščenja ponazarja značilen diagram popuščenja (slika 27).

S poviševanjem temperature popuščenja se trdota najprej znižuje zaradi razpada martenzita. Pri popuščenju okrog 400 °C se krivulja dvigne zaradi znanega efekta sekundarne trdote, ki ga povzroča izločanje finih karbidov in razpad zaostalega avstenita, pri čemer se tvori sekundarni martenzit. V območju 540—600 °C v odvisnosti od vrste jekla začne trdota zopet padati zaradi koagulacije izločenih karbidov. Po prvem popuščenju nastane iz zaostalega avstenita martenzit, katerega je treba tudi popuščiti in zato je najmanj dvakratno popuščenje pri brzoreznih jeklih obvezno in nujno potrebno.

Poleg popuščne obstojnosti, ki je značilna lastnost brzoreznih jekel in je podana v vsakem kata-



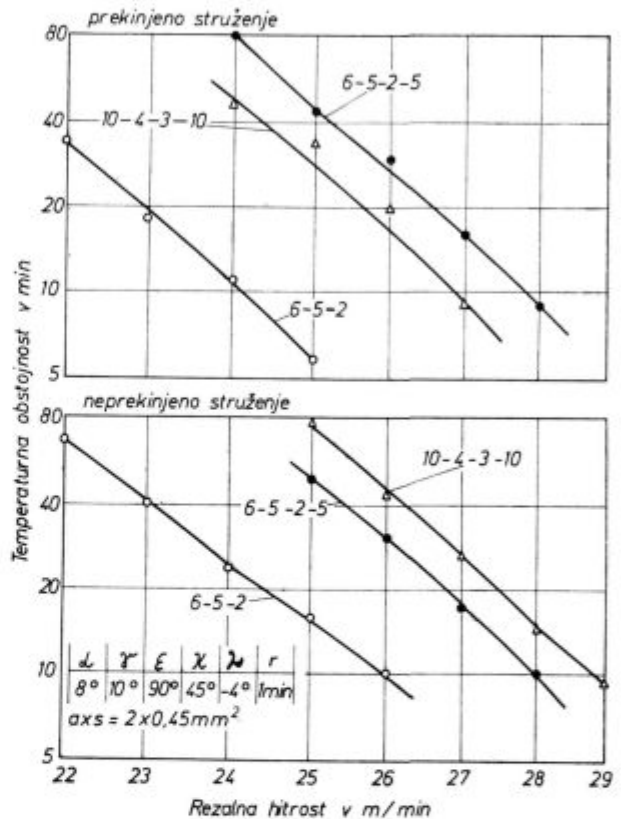
Slika 28
Primerjava trdote v vročem za brzorezna jekla in druge zlitine
Fig. 28
Comparison of hot hardness of high-speed steel and other alloys

logu z diagrami popuščenja, je zelo pomembna tudi trdota v vročem, ki omogoča uporabnost brzoreznih jekel pri povišanih temperaturah.

Brzorezna jekla, legirana s kobaltom in vanadijem, imajo znatno višjo trdoto v vročem.

Odpornost proti obrabi je lastnost brzoreznih jekel, ki jo je najtežje eksperimentalno obvladati, zato so najbolj priporočljivi praktični poizkusi.

Obdelovalnost brzoreznih jekel v mehko žarjenem stanju je odvisna od strukture, ki odloča o trdnosti v žarjenem stanju in predvsem od deleža karbidov v strukturi. Posebno z vanadijevimi



Slika 29
Premice rezalne obstojnosti za tri vrste brzoreznih jekel pri struženju jekla C. 1731 poboljšane na 800 N/mm² z neprekinjenim in prekinjenim struženjem
Fig. 29

Lines of cutting ability for three types of high-speed steel in turning C. 1731 steel hardened and tempered to 800 N/mm² with continuous and discontinuous turning

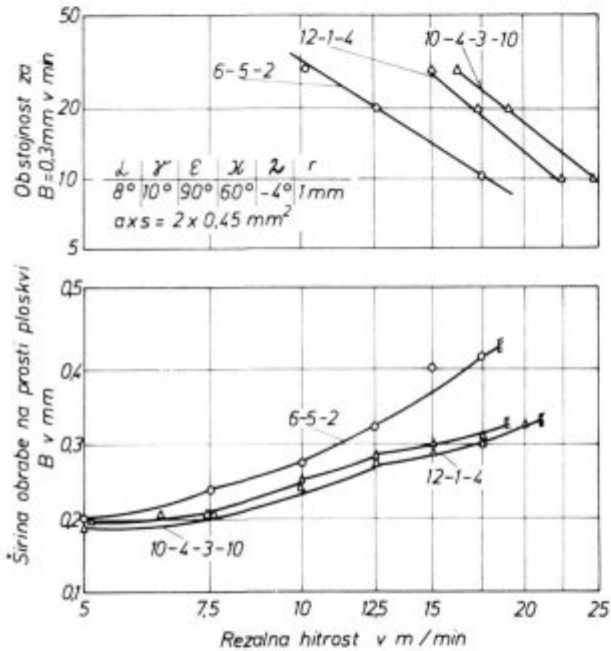
brzoreznimi jekli je precej težav zaradi visoke trdote vanadijevih karbidov v primerjavi s trdoto normalnih karbidov v brzoreznih jeklih. Dodajanje žvepla za boljšo obdelovalnost je sicer uvedeno, vendar se ni v praksi posebno uveljavilo.

O žilavosti brzoreznih jekel je bilo objavljenih toliko domačih del⁴, da te izredno pomembne lastnosti na tem mestu ne bomo obravnavali.

Rezalna sposobnost je prav gotovo za brzorezna jekla najvažnejša lastnost. Žal so izkušnje pri zelo obsežnih raziskavah pokazale, da te ni mogoče določiti z enostavnim poizkusom in zato tudi ni moč pričakovati neposredne zveze med rezalno kapa-

citeto in legirnimi elementi ter osnovnimi lastnostmi, kot npr. s trdoto v vročem, odpornostjo proti obrabi in žilavostjo. Katera od teh lastnosti je odločilnega pomena, je odvisno od vsakokratnega obdelovalnega primera.

Slika 29 kaže za tri različne vrste brzoreznih jekel značilne premice rezalne obstojnosti pri prekinjenem in neprekinjenem struženju ogljikovega jekla za poboljšanje C.1731, poboljšanega na 800 N/mm². Očiten znak obrabe pri struženju nelegiranih in malo legiranih cementiranih in poboljšanih jekel je obraba zaradi izdolbenja. Obraba na prosti ploskvi komaj doseže vrednosti nad 0,15 mm in ne narašča bistveno s hitrostjo rezanja — zato ne pride v poštev kot kriterij za oceno rezalne sposobnosti brzoreznih jekel. Drugače je pri rezanju avstenitnih jekel.



Slika 30

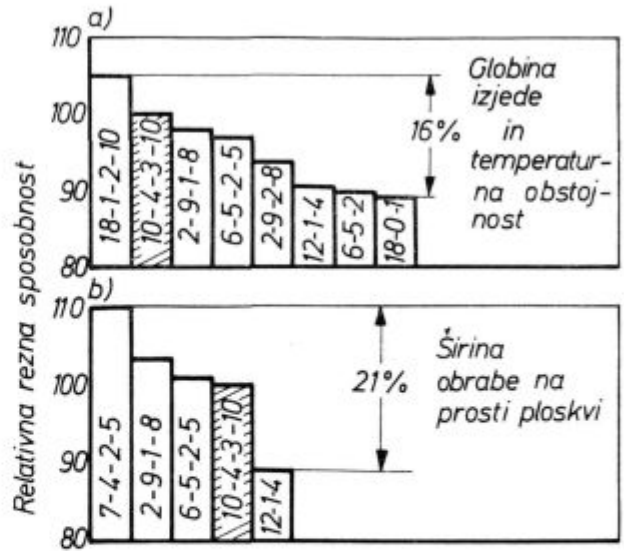
Obraba na prosti ploskvi, ki narašča s hitrostjo rezanja in doseže vrednosti do 0,4 mm pri struženju jekla C. 4574 (Prokron 12 special)

Fig. 30

The wear on free surface which is increased with the increased cutting speed and reaches the value 0.4 mm in turning C. 4574 steel (Prokron 12 special)

V literaturi je ogromno število raziskav za ugotavljanje rezne sposobnosti brzoreznih jekel, katerih ugotovitve pa so vedno vezane na določen primer obdelovalnih pogojev. Zelo veliko število možnih vplivov otežkoča medsebojne primerjave, zato moramo priznati, da danes nimamo neke kompleksne predstave v splošno veljavni obliki, ki bi določala obdelovalne karakteristike za različne pare materiala za orodje in obdelovanec.

Slika 31 kaže primerjavo relativne rezne sposobnosti različnih brzoreznih jekel pri struženju nelegiranega poboljšanega jekla s trdnostjo 760 N/mm² (a) in Cr-Ni-Mo jekla za poboljšanje



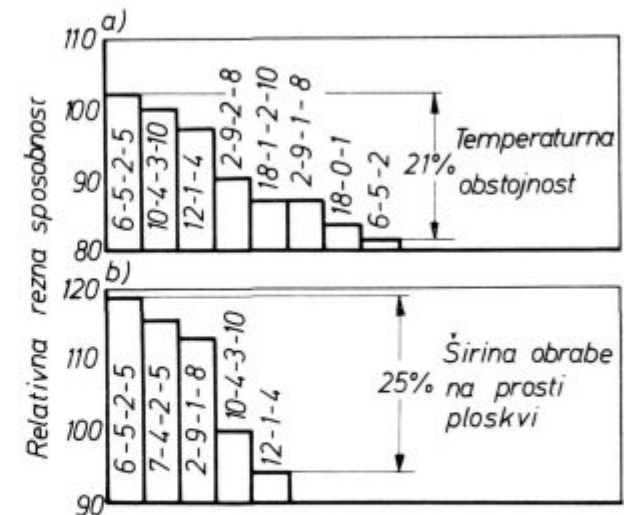
Slika 31

Primerjava rezne sposobnosti pri struženju nelegiranega (a) in Cr-Ni-Mo — jekla (b) z neprekinjenim rezom

Fig. 31

Comparison of cutting ability in turning unalloyed (a), and Cr-Ni-Mo steel (b) with continuous cutting

s trdnostjo 1500 N/mm² (b) z neprekinjenim rezom. Takoj vidimo, da je vrstni red brzoreznih jekel po sposobnosti za rezanje pri mehkejšem jeklu drugačen kot pri tršem. Za obdelavo trdih jekel imajo prednost bolj žilave vrste brzoreznega jekla kot pri obdelavi mehkejših jekel. Dalje je zanimivo, da je razlika rezalne kapacitete od najboljšega do najslabšega brzoreznega jekla samo 16 ali 21 %. Naslednja slika 32 kaže podobno primerjavo pri struženju s prekinjenim rezom. Ugotovljene so razlike rezalne sposobnosti do 25 %.

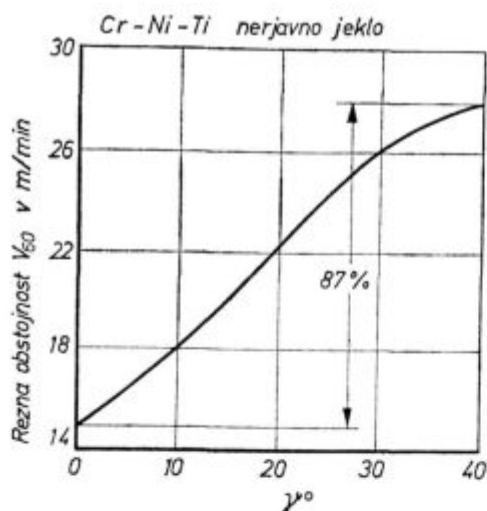


Slika 32

Primerjava rezne sposobnosti pri struženju nelegiranega (a) in Cr-Ni-Mo — jekla (b) s prekinjenim rezom

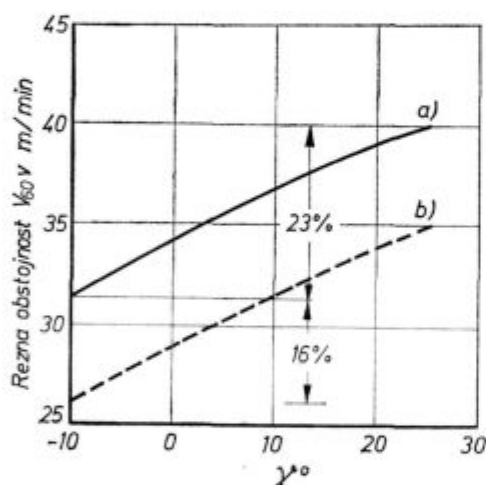
Fig. 32

Comparison of cutting ability in turning unalloyed (a), and Cr-Ni-Mo steel (b) with discontinuous cutting



Slika 33
Vpliv cepilnega kota na rezno sposobnost nožev iz brzoreznega jekla 10-4-3-10 pri struženju nerjavnega Cr-Ni-Ti jekla

Fig. 33
Influence of true rake angle on the cutting ability of tool made of high-speed 10-4-3-10 steel in turning stainless Cr-Ni-Ti steel



Slika 34
Vpliv cepilnega kota na rezno sposobnost nožev iz brzoreznega jekla 10-4-3-10 (a) oziroma 6-5-2 (b) pri struženju nelegiranega jekla

Fig. 34
Influence of the true rake angle on the cutting ability of tool made of high-speed 10-4-3-10 (a) and 6-5-2 steel (b) in turning unalloyed steel

V primerjavi z vplivi izbire brzoreznih jekel na rezno sposobnost so vplivi geometrije rezila precej večji (sliki 33 in 34). Slika 33 kaže vpliv cepilnega kota na rezno sposobnost pri struženju avstenitnega Cr-Ni-Ti jekla s strugarskimi noži iz brzoreznega jekla 10-4-3-10, slika 34 pa kaže vpliv cepilnega kota na rezno sposobnost pri struženju nelegiranega jekla za poboljšanje s strugarskimi noži iz brzoreznega jekla 10-4-3-10 (krivulja a) in 6-5-2 (krivulja b). Iz slike 33 vidimo, da sprememba cepilnega kota od 0 do 40° spremeni rezno sposobnost kar za 87 %, kar pomeni, da moramo biti

v mejah možnosti obdelovalnega postopka posebno pozorni na geometrijo rezila. Teh nekaj primerov zadovoljivo kaže, da nobeno brzorezno jeklo ne prinaša vrhunskih rezultatov rezne sposobnosti v katerikoli izbranih pogojih obdelovalnega postopka. Včasih je s tega stališča pomembnejša žilavost, drugič trdota v vročem in tretjič odpornost proti obrabi glede na značilnosti obremenitev orodja. Za zadovoljevanje teh zahtev izhajamo torej tudi z manjšim številom različnih vrst brzoreznih jekel. Pri izbiri vrste brzoreznega jekla in določitvi pogojev toplotne obdelave je potrebno upoštevati delovne pogoje orodja, obdelovalni postopek, pričakovano vzdržljivost orodja in tudi obdelovalnost brzoreznega jekla pri izdelavi orodja. Zaradi teh zelo različnih izhodišč pri izbiri jekla ni niti smiselno niti mogoče dati neke obvezujoče tabelarične primerjave brzoreznih jekel in orodij. Tudi vsakodnevne izkušnje potrjujejo to ugotovitev, saj uspešno izdelujejo različna orodja iz različnih vrst brzoreznih jekel. Na osnovi opazovanj in evidenc obnašanja orodij v uporabi lahko postopoma uvajamo primerne spremembe in izboljšave.

S temi izhodišči je na osnovi zbranih izkušenj izdelan predlog jugoslovanske tipizacije brzoreznih jekel in napotki za izbiro³ s pomočjo relativnega rangiranja posameznih lastnosti in njihovih kombinacij. Jeklo 6-5-2 je najbolj žilavo, jeklo 10-4-3-10 res odlikuje univerzalna uporabnost in jeklo 6-5-2-5 ima kombinirane lastnosti, kakršne so npr. odločilne za odvalna in druga frezala, kar je vse tudi v praksi nedvoumno potrjeno.

Najnovejša stopnja razvoja je izdelava brzoreznega jekla po postopku prahaste metalurgije. Tako izdelana jekla odlikuje skoraj idealna razporeditev karbidov, kar ima dober vpliv tudi na številne druge lastnosti. Kljub temu, da že nekaj let ta jekla uporabljajo, še vedno nimamo prave objektivne ocene, saj jih nekateri hvalijo, drugi pa trdijo, da pričakovanja niso izpolnjena.

ZAKLJUČKI

Iz opisanega smo lahko kljub omejenemu obsegu razbrali, da je v razvoju orodnih jekel za delo v hladnem in brzoreznih jekel veliko novosti in da je tehnični in tudi ekonomsko-tehnološki napredek očiten. Skoraj bi lahko trdili, da še bolj velja to za področje orodnih jekel za delo v vročem, česar pa skoraj nismo obravnavali. Za kompleksnejši pregled razvoja na področju orodnih jekel bi morali obravnavati še številne orodne materiale za specifična področja uporabe, za kombinirano uporabo in tudi mnoga nova orodna jekla v domačem proizvodnem programu. Razumljivo je, da tako podrobnejše opisovanje na tem mestu ni mogoče, zato naj samo omenimo nekaj dosežkov sodelovanja domače metalurške in predelovalne industrije na področju razvoja orodnih materialov v zadnjih letih:

- valji za hladno valjanje,
- sendzimir valji,
- nova orodna jekla za strojne nože,
- nova orodna jekla za delo v hladnem,
- nova orodna jekla za delo v vročem,
- razvoj orodnih jekel za hladno vtiskovanje,
- razvoj tipiziranega kompleta orodnih materialov za industrijo vijačne robe.

Tudi nadaljnji razvoj mora biti usmerjen k zmanjšanju in izboljšavi asortimenta orodnih jekel, k tipizaciji in zagotavljanju kakovosti ter k razvoju novih materialov za specifična področja.

Literatura:

1. Rodič J.: Strojniški vestnik XIII (1967) S. 239/251
2. Zelezarna Ravne: Katalog NAŠI PROIZVODI I., II.
3. Zelezarna Ravne: Brzorezni čelici, Separat 124
4. Zelezarna Ravne: Legirani alatni čelici za rad u hladnom stanju, Separat 122
5. Zelezarna Ravne: Alatni čelici za rad u vrućem stanju, Separat 123
6. Werkstoffkunde der gebräuchlichen Stähle Verlag Stahleisen, 1977, Teil 2, str. 247—265
7. Weigand M.: TEW — Techn. Ber. 3., (1977), S. 67/80
8. Kuo K.: J. Iron Steel Inst. 181, (1955), S. 128/34
9. Horn E., u. H. Brandis: DEW Techn. Ber. 11, (1971), S. 147/54
10. Weigand H. — H., u. E. Haberling: DEW Techn. Ber. 11, (1971), S. 205/15
11. Rodič J.: Zelezarski zbornik 10, št. 1, (1976), str. 47—50
12. Rodič J.: Zelezarski zbornik 10, št. 3, (1976), str. 125—144
13. Rodič J., F. Vodopivec, B. Ralić: Zelezarski zbornik 10, št. 3, (1976), str. 145—156
14. Rodič A., J. Rodič: Zelezarski zbornik 1, št. 3, (1976), str. 177—187; 2. št. 1, (1968), str. 1—20; 2. št. 3, (1968), str. 165—184
15. Rodič J., A. Rodič: Zelezarski zbornik 11, št. 4, (1977), str. 169—181

ZUSAMMENFASSUNG

Eine Übersicht über den heutigen Zustand der Entwicklung auf dem Gebiet der Werkzeugstähle vor allem derjenigen für die Kaltarbeit und der Schnelldrehstähle ist gegeben.

Die Eigenheiten des Mikrogefüges, bestehend aus der Matrix und der Karbide werden behandelt. Die Grundeigen-

schaften der Werkzeugstähle werden besonders kritisch behandelt. Besondere Aufmerksamkeit ist der chemischen Zusammensetzung und der Problematik einer zu grossen Zahl der verschiedenen Werkzeugstähle gewidmet, welche einen wissenschaftlich begründeten technischökonomischen Zutritt zu der Entwicklung der Typisierung und der Standardisierung erfordert.

SUMMARY

A review of present state and future development of tool steel is given with a special emphasis on steel for cold working and on high-speed steel.

Characteristics of the microstructure consisting of the matrix and carbides are discussed. Basic properties of tool

steel are described and critically considered. A special emphasis was given to the influence of the chemical composition and the problematics of a too great variety of tool steel which demands a scientifically based technical and economic approach to the development of selection and standardizing tool steel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дан обзор современного состояния и развития в области инструментальных сталей главным образом марок, которые употребляются для переработки в холодном состоянии, а также обзор быстрорежущих сталей.

Рассмотрены характеристики микроструктуры, состоящей из основной маточной структуры и карбидов. Критически рассмотре-

ны основные свойства инструментальных сталей. Особенно затронуты влияния легирующих элементов и вопрос слишком многочисленного количества различных инструментальных сталей, что необходимо требует всесторонней разработки что касается типизации и стандартизации этих сталей на научно-экономической базе.