

Brzorezna jekla

III. del: VPLIV VELIKOSTI KARBIDOV NA MEHANSKE IN TEHNOLOŠKE LASTNOSTI BRZOREZNEGA JEKLA 6-5-2 (BRM-2)

Tretji del članka o brzoreznih jeklih obravnava vpliv velikosti karbidov na mehanske in tehnološke lastnosti brzoreznega jekla 6-5-2 (BRM-2).

Avtorja sta v raziskavi uporabila veliko število vzorcev z različno velikostjo karbidov iz jekla iste šarže in enake dimenzije. S tem materialom sta sistematsko preizkušala vpliv velikosti karbidov na posamezne lastnosti. Sistem planiranja raziskave je omogočil statistično obdelavo rezultatov in testiranja pomembnosti zaključkov. S pomočjo analize variance in množične regresije je bilo mogoče pri obdelavi rezultatov praktičnega preizkušanja ugotoviti osnovne zakonitosti medsebojnih odvisnosti in vplivov. Te odvisnosti so za posamezne lastnosti prikazane s številnimi diagrami in nomogrami.

V uvodnih raziskavah so obdelane medsebojne odvisnosti velikosti karbidov in trdote v žarjenem in kaljenem stanju, velikosti in enakomernosti avstenitnega zrna ter zrnatosti preloma v kaljenem stanju. Na osnovi teh rezultatov je bil izbran material za vzorce pri nadaljnjih preiskavah, tako da so se vsi poizkusi izvajali z enakovrednimi skupinami vzorcev z grobimi, srednjimi in finimi karbidi.

Najvažnejša je bila serija poizkusov za ugotovitev vpliva velikosti karbidov in toplotne obdelave na rezo obstojnost strgarskih nožev. Grobi karbidi posebno pri najugodnejši toplotni obdelavi močno zmanjšajo obstojnost nožev. Pri poizkusih je bilo posebej obravnavano več kriterijev obrabe nožev.

Z dodatnimi poizkusi sta avtorja obdelala vplive na trdoto jekla v žarjenem, kaljenem in popuščnem stanju, na popuščno obstojnost, na mehanske lastnosti pri vlečenju in na udarno žilavost.

Celotna raziskava je privedla do številnih praktično pomembnih zaključkov, ki so v članku podrobneje opisani.

Grobi karbidi slabo vplivajo na skoraj vse osnovne lastnosti brzoreznega jekla.

UVOD IN PREGLED LITERATURE

Pojav grobih karbidov v brzoreznem jeklu smo omenili že v prvem delu¹¹ članka. Grobe karbide najrazličnejših oblik lahko najdemo že v dobavljenem žarjenem stanju ali pa jih odkrijemo po toplotni obdelavi orodij. V prvem primeru so grobi karbidi posledica določenih pogojev pri vroči predelavi s kovanjem ali valjanjem, v drugem primeru pa so posledica nepravilnosti pri kaljenju.

Pojav grobih in oglatih karbidov v kaljenem brzoreznem jeklu je zaradi previsoke temperature ali predolgega časa razmeroma dobro poznan. Pogoje nastanka grobih karbidov pri vroči predelavi, ki so bili precej manj poznani, smo raziskali in opisali v drugem delu¹² članka.

V tem, tretjem delu bomo obravnavali vpliv velikosti ter oblike karbidov na mehanske in tehnološke lastnosti brzoreznih jekel ter na praktično uporabnost orodij.

To področje raziskav je v sicer zelo obširni literaturi o brzoreznih jeklih razmeroma slabo obdelano. Le malo je avtorjev, ki probleme velikosti in oblike karbidov sploh omenjajo in zelo redki med njimi so posledice grobih karbidov v brzoreznih jeklih podrobneje raziskovali.

V preteklem desetletju so pri ocenjevanju kakovosti brzoreznih jekel pripisovali zelo velik pomen karbidnim travom in mrežam v mikrostrukturi. To je vzpodbudilo mnoge raziskovalce k intenzivnemu raziskovanju problema in k iskanju posebnih postopkov, ki naj bi zagotovili čimbolj enakomerno in ugodno porazdelitev karbidnih izcej ali pa naj bi spremenili že obstoječe neugodne mrežaste mikrostrukture¹¹. Še danes večina meni, da je rešitev problema heterogenosti brzoreznih jekel in oblike karbidnih izcej v načinu in poteku strjevanja jekla. Raziskovali so cepljenje, vibracije, strjevanje v elektromagnetnem polju in podobne tehnike. Ekonomsko sprejemljive in tehnično uporabne, obenem pa učinkovite rešitve do danes ni. Karbidne izceje, odvisnost enakomernosti in porazdelitve od izdelave in litja jekla ter od stopnje predelave pri kovanju ali valjanju bomo podrobneje obravnavali v četrtem delu članka o brzoreznih jeklih. Zato se v naslednjem omejimo le na tisti del problemov o karbidnih izcejah, ki so v zvezi tudi z velikostjo karbidov.

Angleškim raziskovalcem^{1, 2} je uspelo razviti poseben postopek toplotne obdelave, s katerim spremenijo evtektično strukturo litega brzoreznega jekla tako, da je ta v kovanem, valjanem ali vlečenem stanju popolnoma brez trakov in mrež. V mikrostrukturi so karbidi zelo enakomerno razporejeni, pač pa so precej bolj grobi od normalnih in največkrat so tudi oglatih oblik. Ta postopek posebej omenjamo, da ga bomo kritično ocenili v zvezi z ugotovitvami raziskav drugih avtorjev in naših raziskav, ki jih bomo v tem članku opisali. Avtorji^{1, 2} so svoj cilj dosegli z enakomerno razporeditvijo karbidov in odpravo evtektične mreže, vendar skoraj nič ne poročajo o posledicah grobih karbidov, ki so nastali pri tem postopku. Ne glede na te posledice postopek v praksi skoraj ni uporaben. Zahteva zelo visoko temperaturo (nad 1300°C za volframova in nad 1250°C za molibdenova jekla), razmeroma dolg čas in zelo ozko območje dopustnega temperaturnega nihanja. Pri večjih ingotih zaradi toplotno tehničnih težav in zaradi velikih nehomogenosti v bloku tega postopka z zahtevanimi omejitvami praktično sploh ni mogoče izvesti. Normalno uporabljane peči ne dosegajo teh temperatur z zahtevano natančnostjo. Zahtevani čas ogrevanja 0,5 — 4 ure na tako visoki temperaturi bi povzročil tolikšne težave z razogljčenjem in odgorkom, da bi bil postopek zaradi tega neizvedljiv.

Sovjetski raziskovalci^{3, 4, 6} potrjujejo, da ogrevanje jekla 18-0-1 pri 1300°C s časom 0,5 — 4 ure popolnoma odpravi evtektično mrežo. Posebej poudarjajo, da ni raziskan vpliv take toplotne obdelave na lastnosti brzoreznega jekla. Pri ogrevanju na visoki temperaturi nastajajo grobi in oglati karbidi, ki se pri jeklu 18-0-1 pojavijo že po 45 minutah na 1250°C⁴. Tudi po kovanju tako žarjenih ingotov z veliko stopnjo predelave do palic kv. 30 in kv. 10 mm so karbidi ostali grobi. Po kaljenju takega jekla so že pri 1260°C ugotovili nenormalno in zelo grobo zrno⁴.

Poleg visokotemperaturnega žarjenja, ki je skoraj enako angleškemu postopku, navaja sovjetska literatura⁴ za odpravljanje mrežaste razporeditve karbidov še večkratno žarjenje na 850 do 950°C. Ogrevanje na 1250—1300°C pri jeklu 18-0-1 priporočajo le za lita orodja debeline 40—100 mm. S tem delno ali popolnoma odpravijo evtektično mrežo in dobijo v mikrostrukturi grobe karbide. Menijo, da je v navedenem primeru postopek upravičen, češ da dober vpliv odprave evtektične mreže prevladuje slabe posledice grobih karbidov in grobega zrna.

To mnenje podpirajo s primerjavo nekaj rezultatov praktičnega preizkušanja obstojnosti pri vrtnanju z litimi svedri. Te so po litju žarili na 850 in 1300°C. Svedri, ki so bili žarjeni na 1300°C, so dosegli dvakrat večjo obstojnost od tistih, ki so bili žarjeni pri 850°C. Visokotemperaturno žarjenje litega brzoreznega jekla priporočajo tudi v primerih, ko je stopnja nadaljnje predelave

majhna. Pri predelavi z več kot petnajstkratnim zmanjšanjem preseka je potrebna taka toplotna obdelava, ki izboljša enakomernost razporeditve karbidov, a ne povzroča nastanka oglatih karbidov ter občutljivosti za naraščanje zrn. V takih primerih priporočajo trikratno žarjenje pri 850—950°C.

Nekateri poznavalci brzoreznih jekel takim priporočilom nasprotujejo s trditvijo, da žarjenje nad 820°C poslabša topnost karbidov pri avstenizaciji, kar je pri kaljenju nezaželeno.

A. Gühring⁵ je preizkušal svedre manjših dimenzij in pri svojih raziskavah ugotovil, da velikost in oblika (oglatost) karbidov vplivata na kalilne sposobnosti brzoreznega jekla 6-5-2 in 2-9-1. Posebno pomemben je vpliv velikosti karbidov na velikost zrna.

Elastičnost in žilavost sta odvisni od velikosti zrna, porazdelitve in oblike karbidov. Orodja iz brzoreznega jekla z grobimi in oglatimi karbidi so manj elastična in manj žilava od orodij s finimi krogličastimi in enakomerno porazdeljenimi karbidi. Grobozrnata orodja so bolj krhka in se prej lomijo.

Trdota v vročem stanju je odvisna od velikosti zrna in stopnje legiranosti osnovne mase. Posredno je torej odvisna tudi od velikosti in oblike karbidov.

Med posameznimi svedri so ugotovili obstojnosti pri vrtnanju celo v razmerju 1:10.

Gill⁷ je že leta 1936 ugotovil, da oglati in grobi karbidi povzročajo krhkost orodij in nižjo trdoto v vročem stanju.

Hargue, Hammond in Crouse⁸ so z rentgensko analizo karbidov ugotovili, da imajo oglati karbidi enako kristalno zgradbo in verjetno zelo podobno, če ne popolnoma isto sestavo kakor karbidi, ki imajo sferoidno obliko in so drobni.

V jeklu 18-0-1 je bil tip teh karbidov M₆C, v jeklu 6-5-2 pa M₆C in MC.

Pri naših raziskavah smo prišli do enakih ugotovitev⁹ za jeklo 6-5-2.

Iz opisanega pregleda literature vidimo, da se zaključki posameznih raziskav med seboj ujemajo ali pa se dopolnjujejo.

Objavljena dela kažejo, da so avtorji zaradi neznanih okoliščin preizkušali le po nekaj vzorcev in posameznih orodij pri določenih pogojih toplotne obdelave. Lastnosti brzoreznih jekel in obstojnost orodij z grobimi karbidi v mikrostrukturi niso predstavljale osnovnega cilja raziskav, zato tega problema pri raziskavah niso obdelale v celoti.

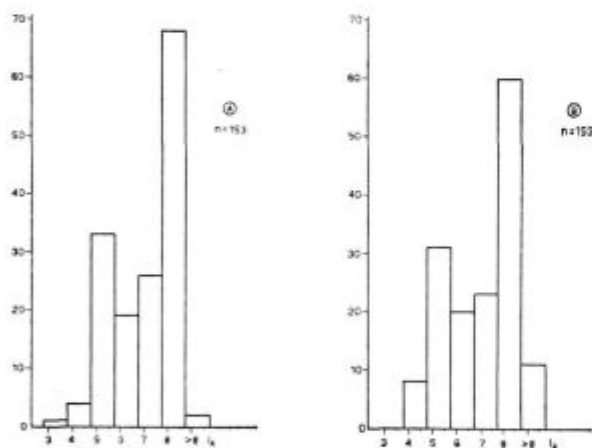
V železarni Ravne smo se želeli z lastnimi raziskavami prepričati o osnovnih trditvah objavljenih del, jih dopolniti in kvantitativno določiti medsebojne odvisnosti. Pomembnost in zanesljivost zaključkov smo preverjali z uporabo primernih metod matematične statistike. Pred leti smo si izdelali plan izvajanja obsežnega raziskovalnega programa na področju brzoreznih jekel, po katerem smo postopoma raziskali najzanimivejše lastnosti in medsebojne odvisnosti.

Posebna značilnost naših raziskav je ugotovitev širših zakonitosti, izraženih v matematično statistični obliki z veljavnostjo pri različnih pogojih in spremembah medsebojnih odnosov vplivnih faktorjev. V tem je bistvena razlika naših raziskav z onimi, ki so bile v literaturi že prej opisane. Omenjeni avtorji so se v primerjalnih poizkusih prav pri toplotni obdelavi omejevali na izbrane in čim bolj konstantne pogoje, mi pa smo jih namenoma spreminjali, da bi ugotovili zakonite odvisnosti v čim širšem območju uporabnosti brzoreznih jekel.

UVODNE RAZISKAVE IN IZBIRA VZORCEV ZA SISTEMATIČNO PREIZKUŠANJE MEHANSKIH IN TEHNOLOŠKIH LASTNOSTI

V skladu z ugotovitvami o pogojih nastanka grobih karbidov¹² v brzoreznem jeklu smo pripravili za raziskavo 153 palic dimenzije 15 mm Ø iz ene in iste šarže z različnimi velikostmi karbidov od $I_k = 3$ do $I_k > 8$. S tem smo lahko v vseh nadaljnjih raziskavah izključili vpliv šarže, kemijske sestave in dimenzije.

Analiza porazdelitve velikosti karbidov za teh 153 palic je prikazana s histogramoma na sliki 1.



Slika 1

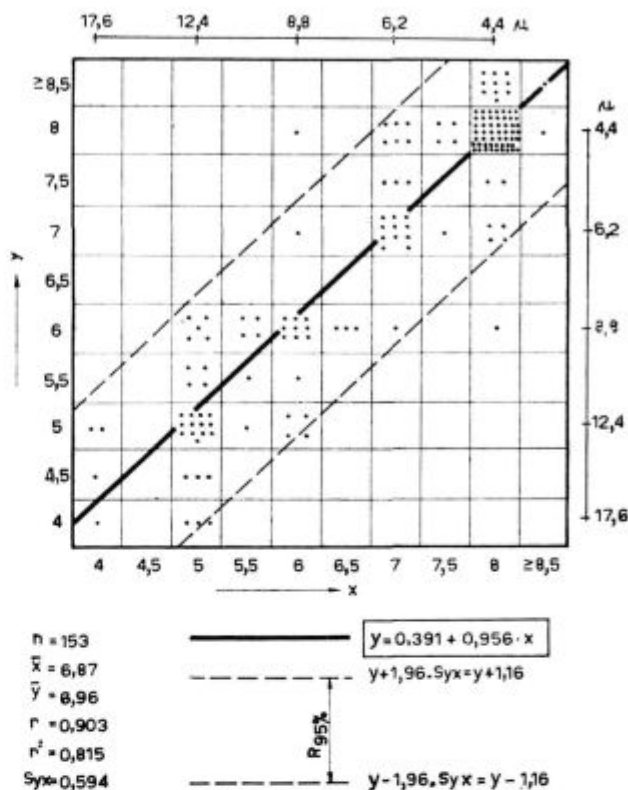
Porazdelitev velikosti karbidov v žarjenem (A) in v kaljenem (B) stanju

Probe iz teh palic smo toplotno obdelali in s statistično analizo regresije ugotavljali vpliv velikosti karbidov na osnovne lastnosti jekla. Rezultati so prikazani na slikah 2 do 9. Poleg regresijskih premic so na slikah vrisana območja razsipanja za 95 odstotno statistično gotovost.

Zaključki uvodnih korelacijskih analiz so bili sledeči:

— Med velikostjo karbidov v žarjenem stanju in velikostjo karbidov v kaljenem stanju je zelo ozka statistična odvisnost (slika 2). Koeficient de-

X — index velikosti karbidov v žarjenem stanju
Y — index velikosti karbidov v kaljenem stanju
AL — Odgovarjajoči premer karbidov

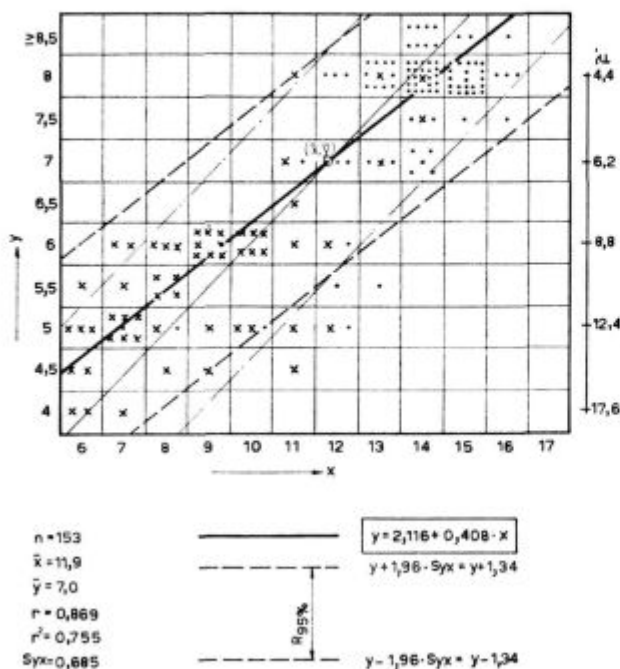


Slika 2

Regresija velikosti karbidov v žarjenem in kaljenem stanju

terminacije $r^2 = 0,815$ pomeni, da je 81,5 % vseh ugotovljenih variacij velikosti karbidov v kaljenem stanju odvisnih od variacij velikosti karbidov v žarjenem stanju. Le 18,5 % variacij velikosti karbidov v kaljenem stanju je odvisnih od drugih vplivov. Dobro je poznan pojav, da pri pregretju brzoreznih jekel med kaljenjem na visoki temperaturi ali ob dolgem potopnem času nastajajo grobi karbidi oglatih oblik. Prav ta analiza regresije potrjuje, da v tem primeru ne gre za pojav grobih karbidov pri kaljenju, ampak pri vroči predelavi. Karbidi v žarjenem stanju ostanejo po kaljenju praktično nespremenjeni, le najbolj grobi kažejo povprečno nekoliko zmanjšanje. Na primer indeksu velikosti karbidov 4 v žarjenem stanju ustreza povprečni indeks 4,25 v kaljenem stanju. Fini karbidi z indeksom 8 v žarjenem stanju so ostali praktično enaki tudi v kaljenem stanju. Grobi karbidi so bili torej prisotni v jeklu že pred kaljenjem. Velikost teh grobih karbidov je tolikšna, da skoraj popolnoma izključuje možnost, da bi nastali pri žarjenju, ker je neverjetno, da bi karbidi s srednjim premerom do 20 mikronov mogli nastati s pomočjo difuzijske koagulacije na razmeroma nizki temperaturi žarjenja 790 — 820° C.

X — velikost zrna SG po Snyder-Graff-u
 Y — index velikosti karbidov v kaljenem stanju
 • — enakomerno zrno
 x — neenakomerno zrno
 (μ) — odgovarjajoči premer karbidov



Slika 3

Korelacija velikosti avstenitnega zrna in velikosti karbidov v kaljenem stanju

— Slika 3 prikazuje zelo zanimivo medsebojno odvisnost velikosti karbidov in velikosti avstenitnega zrna v kaljenem stanju. Na sliki sta prikazani dve regresijski premici:

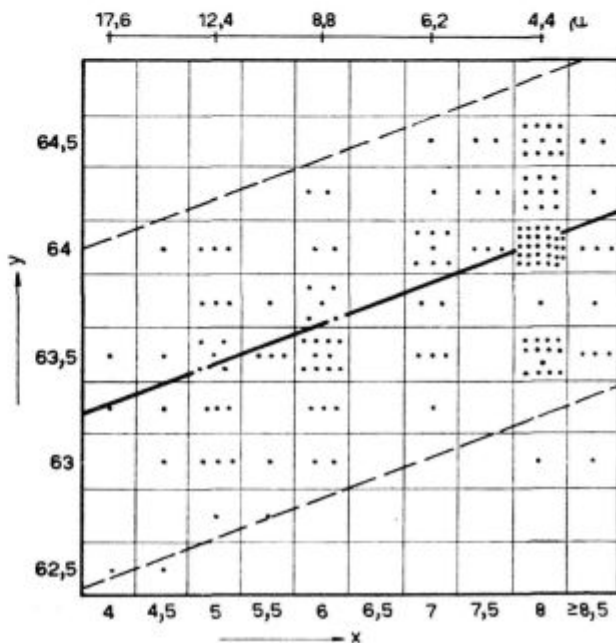
$$\begin{aligned} y &= 2,116 - 0,408 \cdot x \\ x &= 1,9 \cdot y - 1,36 \end{aligned}$$

Prva velja v primeru, če je velikost avstenitnega zrna (x) neodvisna spremenljivka, velikost karbidov (y) pa odvisna. V skladu z metalurško tehnološkimi osnovami je bolj zanimiva druga regresijska odvisnost, pri kateri je velikost karbidov vzrok, velikost avstenitnega zrna pa posledica, saj vemo, da karbidi preprečujejo rast zrna.

Premici tvorita med seboj zelo majhen kot, kar je znak pomembne korelacijske odvisnosti. To ugotovitev kvantitativno potrjuje visoka vrednost koeficienta korelacije $r = 0,869$, pri čemer je 75,5 % ($r^2 = 0,755$) variacij pojasnjenih z ugotovljeno regresijo. Iz diagrama se jasno vidi, da je zrno fino, če so karbidi fini in to zelo lahko teoretično razložimo: pri enaki količini neraztopljenih karbidov bodo fini karbidi bolj učinkovito preprečevali rast zrna kakor grobi. Majhno število velikih karbidov slabše in zelo neenakomerno preprečuje rast zrna ter dopušča nastanek velikih zrn. V diagramu so tiste vrednosti indeksov velikosti zrna SG, pri katerih je velikost zrna enakomerna, označene s pikami, kolikor pa je zrno neenakomerno, so vrednosti SG označene v diagramu s križci. Odvisnost

velikosti karbidov in velikosti zrna vidimo že na prvi pogled. Obenem vidimo iz diagrama, da je pri finih karbidih zrno enakomerno, pri grobih karbidih pa vedno neenakomerno. To ugotovitev je potrdila tudi statistična analiza medsebojne zveze dveh spremenljivk po standardni metodi¹³ Pearsonovega kriterija χ^2 na nivoju 99 odstotne statistične gotovosti.

X — index velikosti karbidov v kaljenem stanju
 Y — trdota R_c v kaljenem stanju
 (μ) — odgovarjajoči premer karbidov

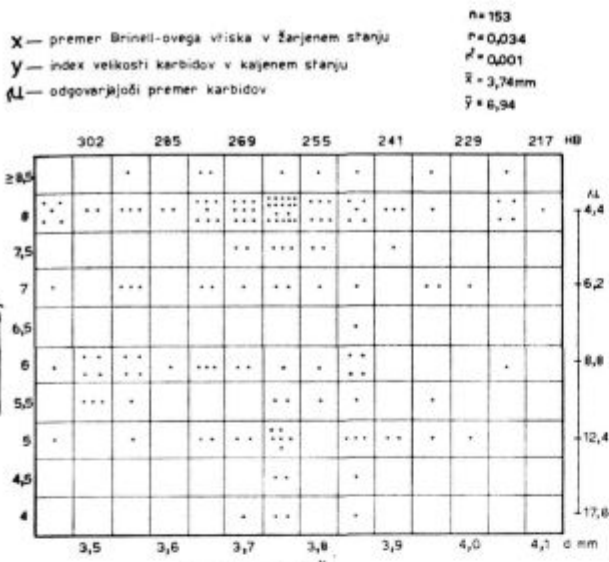


Slika 4

Regresija velikosti karbidov in trdote v kaljenem stanju

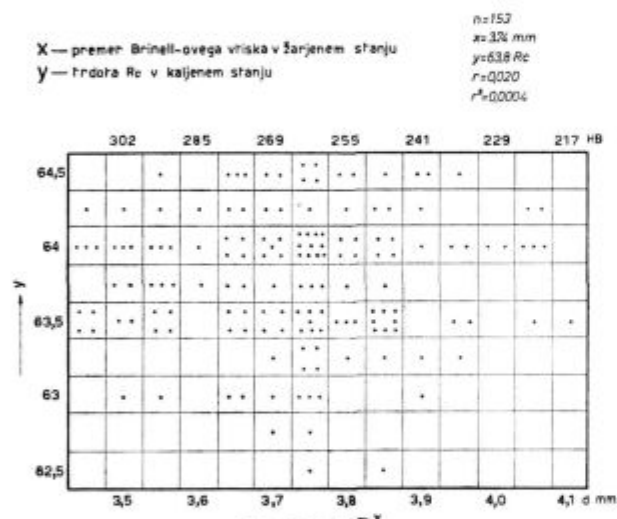
— Slika 4 kaže vpliv velikosti karbidov na trdoto v kaljenem stanju. Pri grobih karbidih je trdota nekoliko nižja kot pri finih karbidih. Ta vpliv je sicer jasno viden, ni pa posebno izrazit. Povprečna razlika znaša 0,5 HRC. Nižjo trdoto pri grobih karbidih bi lahko pripisovali manjši raztopnosti grobih karbidov v avstenitu.

Tak avstenit je manj legiran, obenem ima nižjo kritično temperaturo pregretja pri kaljenju, kar ima za posledico povečanje vsebnosti zaostalega avstenita. Razumljivo je tudi, da se izraža vpliv pomanjkanja večjega števila finih sekundarnih karbidov, ki normalno preprečujejo rast zrna in pregretje.



Slika 5

Korelacija trdote v žarjenem stanju in velikosti karbidov v kaljenem stanju



Slika 6

Korelacija trdote v žarjenem in kaljenem stanju

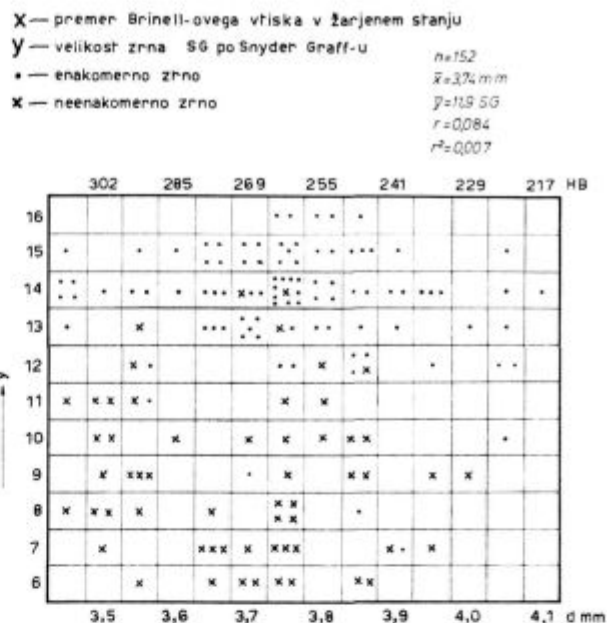
— Slike 5, 6 in 7 prikazujejo statistično nepomembne korelacije. Prav ta nepomembnost je do neke mere zanimiva, ker ugotavljamo:

— da trdota v žarjenem stanju ni odvisna od velikosti karbidov,

— da trdota v žarjenem stanju ne vpliva na trdoto v kaljenem stanju,

— da trdota v žarjenem stanju ni v zvezi z velikostjo avstenitnega zrna. To velja seveda le za obravnavane pogoje preizkušanja, ne pa kot splošen zaključek.

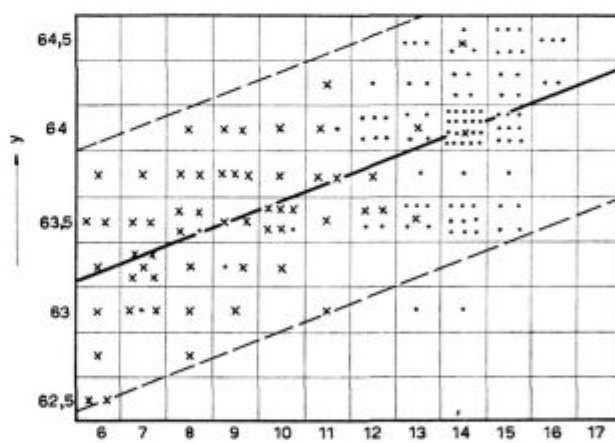
— Regresija na sliki 8 kaže, da je trdota pri finem avstenitnem zrnu nekoliko višja od trdote pri



Slika 7

Korelacija trdote v žarjenem stanju in velikosti avstenitnega zrna

X — velikost zrna SG po Snyder-Graff-u
 y — trdota Rc v kaljenem stanju
 $\bullet$ — enakomerno zrno
 $\times$ — neenakomerno zrno



Slika 8

Regresija velikosti avstenitnega zrna in trdote v kaljenem stanju

$n=153$
 $\bar{x}=11,9\text{ SG}$
 $\bar{y}=63,8\text{ Rc}$
 $r=0,628$
 $r^2=0,395$
 $S_{yx}=0,363$

$y = 62,595 + 0,099 \cdot x$
 $y \pm 1,96 \cdot S_{yx} = y \pm 0,71$
 $y - 1,96 \cdot S_{yx} = y - 0,71$

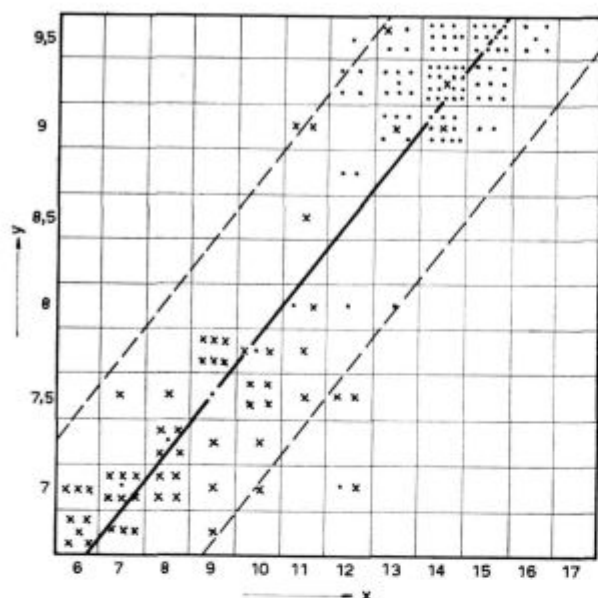
grobem zrnu. Ta ugotovitev je na osnovi teorije razumljiva, obenem pa potrjuje ugotovitve korelacij na slikah 3 in 4.

X — velikost zrna SG po Snyder-Graff-u

Y — ocena preloma F po Shepherd-u

• — enakomerno zrno

x — neenakomerno zrno



n = 153
 $\bar{x} = 11,9$ SG
 $\bar{y} = 8,5$ F
 $r = 0,909$
 $r^2 = 0,826$
 $S_{yx} = 0,428$

— $y = 4,742 + 0,316 \cdot x$
 - - - $y + 1,96 \cdot S_{yx} = y + 0,84$
 - - - $y - 1,96 \cdot S_{yx} = y - 0,84$

Slika 9

Regresija velikosti avstenitnega zrna in zrnatosti preloma

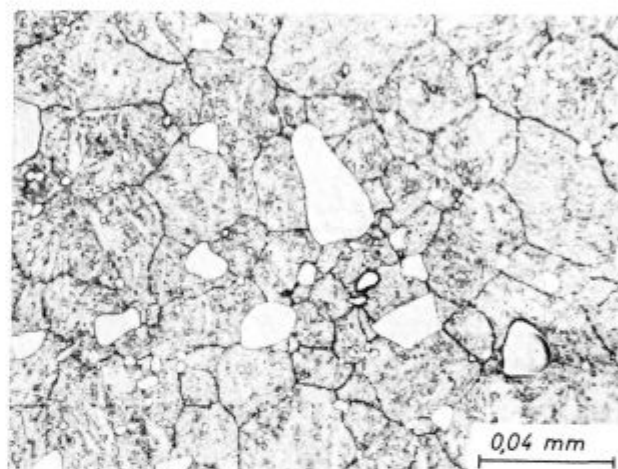
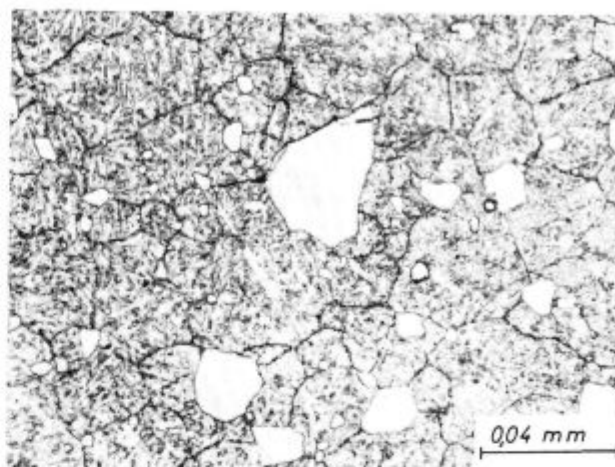
— Slika 9 le opravičuje uporabo ocenjevanja zrnatosti preloma po Shepherdovi metodi kot informativno oceno za velikost zrna v kaljenem stanju. Ti odnosi so sicer že poznani in smo jih le preverjali.

Na osnovi rezultatov v opisanih uvodnih raziskavah smo planirali nadaljnje tehnološke in fizikalne preizkuse in izbrali potreben material po skupinah grobih, srednjih in finih karbidov. Pri tvorbi posameznih skupin smo upoštevali vzorce s sledečimi indeksi velikosti karbidov:

grobi $I_k = 4 - 5$
 srednji $I_k = 6 - 7$
 fini $I_k \geq 8$

VPLIV VELIKOSTI KARBIDOV NA REZNO OBSTOJNOST STRUGARSKIH NOŽEV

Za orodja iz brzoreznega jekla je prav gotovo najvažnejša sposobnost rezanja. Zato smo večjo serijo poizkusov namenili ugotavljanju vpliva velikosti karbidov, temperature kaljenja in trdote po popuščanju na obstojnost strgarskih nožev pri



Slika 10

a in b

Mikrostrukture nožev z grobimi karbidi

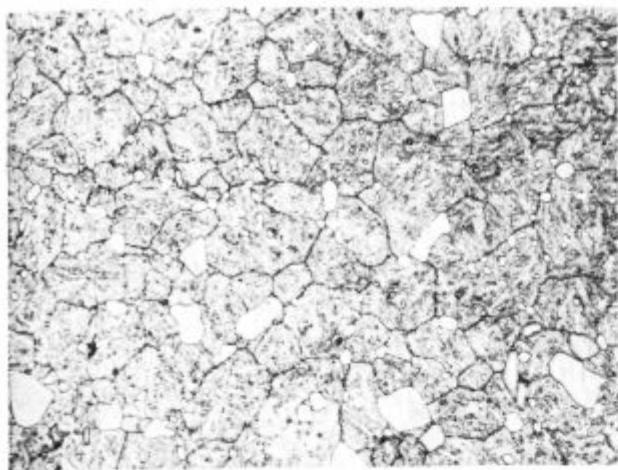
rezanju. Šlo je za primerjalno preizkušanje in ne za rezultate rezne obstojnosti splošnega značaja. Zato so bili nekateri pogoji preizkušanja stalni, čeprav ne optimalni.

Nože smo izbrali tako, da so imeli:

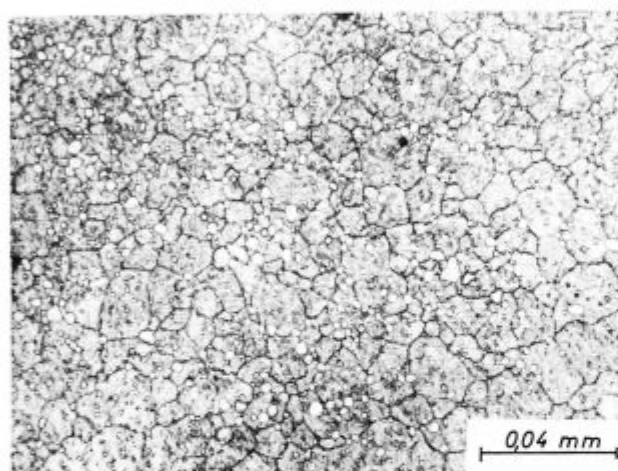
- grobe karbide $I_k = 4 - 4,5$ (glej sliki 10 a in b),
- srednje karbide $I_k = 6$ (glej sliko 11),
- fine karbide $I_k \geq 8$ (glej sliko 12).

Prikazane mikrostrukture na slikah 10 — 12 pri enaki povečavi podajajo le ilustracijo posameznih mest z največjimi karbidi za posamezne klasifikacijske skupine preizkušanih nožev.

Iz vsake izbrane palice smo izdelali po 12 strgarskih nožev, od teh pa smo po 4 enako toplotno obdelali s treh različnih temperatur kaljenja 1180°, 1210° in 1240° C z enakim popuščanjem 560° C dvakrat po eno uro. S tem je bilo obseženo celotno območje normalno uporabnih temperatur kalje-



Slika 11
Mikrostruktura nožev s srednjimi karbidi



Slika 12
Mikrostruktura nožev s finimi karbidi

nja za jeklo tipa 6-5-2 (BRM-2). Z vsakim nožem smo struženje izvedli pri različnih hitrostih rezanja z več ponovitvami.

Preizkuse smo izvajali po metodi Stahl — Eisen Prüfblatt 1161-52 z manjšimi spremembami.

Osnovni pogoji preizkušanja so bili naslednji:

$$\alpha = 8^\circ, \gamma = 15^\circ, \lambda = 0^\circ$$

(Kot $\lambda = 0^\circ$ ni najugodnejši, vendar smo ga izbrali zaradi materialnega prihranka nožev, kar je šlo v prid večkratnemu ponavljanju posameznih poizkusov.)

$$\chi = 60^\circ$$

$$a = 2 \text{ mm}$$

$$S = 0,5 \text{ mm/obrat}$$

Material obdelovanca: Č.4736 v poboljšanem stanju.

Struženje smo izvajali brez hlajenja.

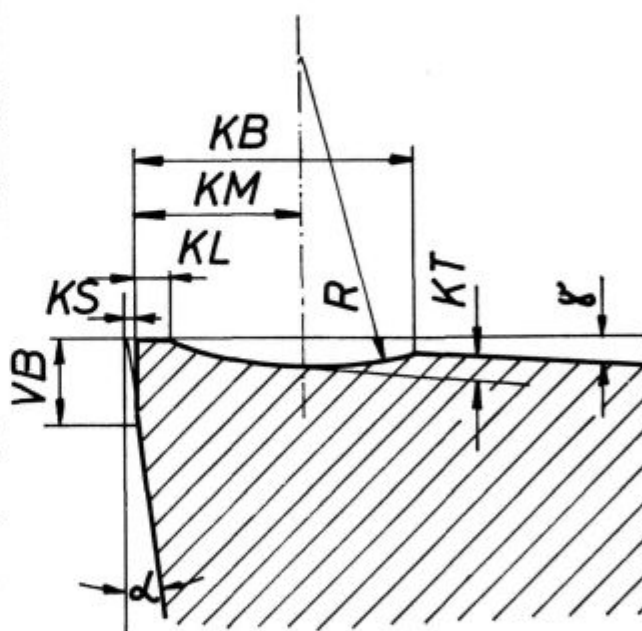
Kot vplivne faktorje smo pri analizi regresije upoštevali:

- velikost karbidov I_k v območju 4—8,
- temperaturo kaljenja T_{kalj} °C v območju 1180—1240° C,
- trdoto nožev HRC v območju 63,5—65,5 HRC,
- hitrost rezanja v v območju 19—26 m/min,
- trdnost obdelovanca σ_m v območju 85—97 kp/mm².

Imeli smo tudi ocene velikosti avstenitnega zrna za posamezne nože, vendar teh podatkov nismo mogli upoštevati kot neodvisno spremenljivko, ker je velikost avstenitnega zrna odvisna od temperature kaljenja in velikosti karbidov ter s tem že posredno upoštevana v regresijski odvisnosti.

V statistični analizi regresije smo z izračunom na elektronskem računalniku ZUSE Z-23 ugotavljali vpliv navedenih faktorjev na:

- obstojnost nožev (T),
- obrabo nožev, ki smo jo določali z meritvami širine obrabe na prosti ploskvi (VB mm), širine izjede na cepilni ploskvi (KB mm), oddaljenosti izjede od roba (KL mm) in globine izjede na cepilni ploskvi (KT mm) po skici na sliki 13.

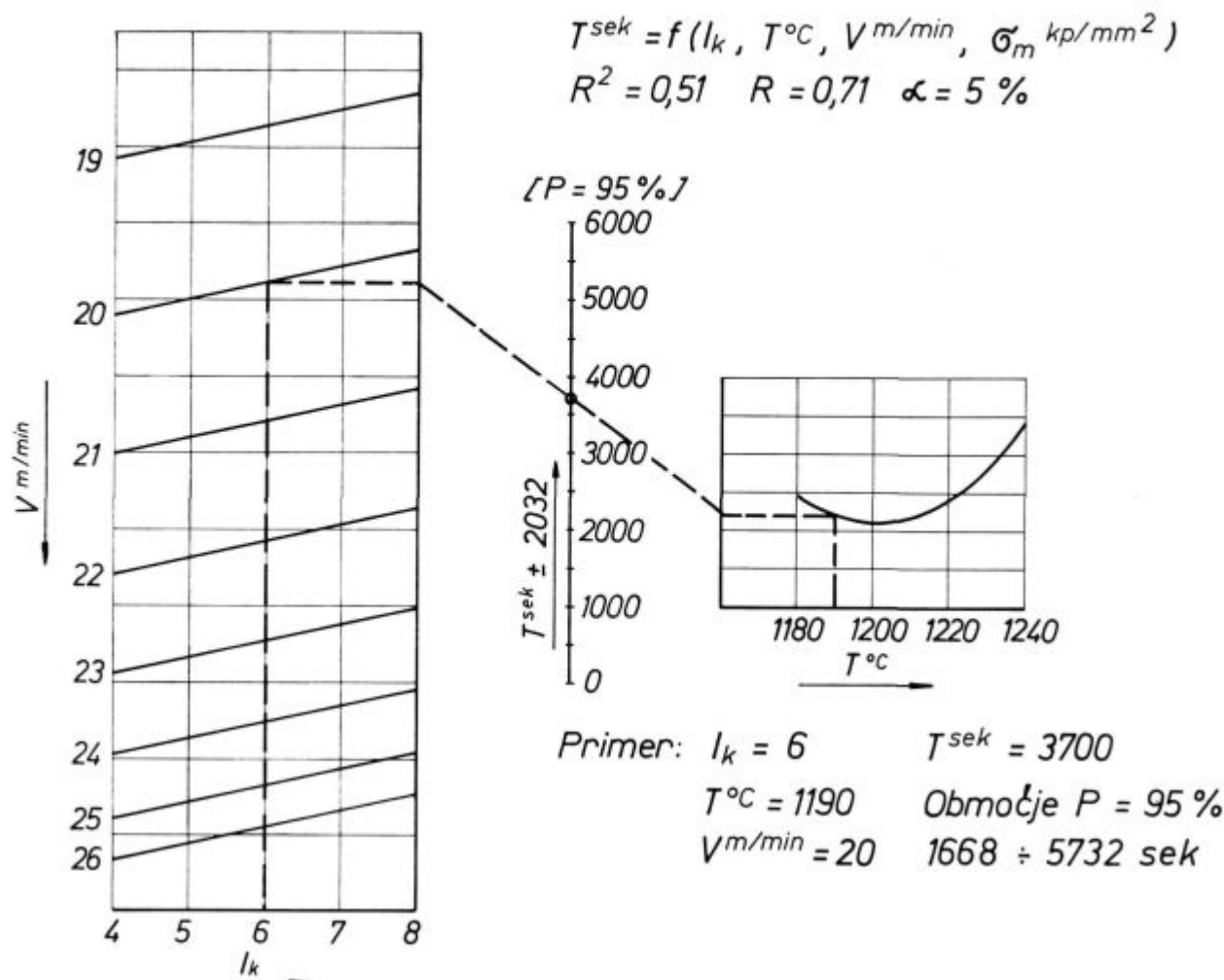


Slika 13
Skica meritev obrabe strgarskih nožev

Pri meritvah smo ugotovili naslednja območja, ki veljajo tudi kot omejitve veljavnosti rezultatov:

$$\begin{aligned} T &= 100 - 5400 \text{ sek.}; & VB &= 0,2 - 0,9 \text{ mm}; \\ KB &= 1,85 - 3,05 \text{ mm}; & KL &= 0,2 - 0,5 \text{ mm}; \\ KT &= 0,05 - 0,35 \text{ mm}. \end{aligned}$$

V statistični analizi smo upoštevali rezultate 266 poizkusov rezanja z vsemi omenjenimi meritvami. Pri analizah regresije smo vsako spremenljivko upoštevali s členi do četrte stopnje.



Slika 14

Vpliv velikosti karbidov, temperature kaljenja, hitrosti rezanja in trdnosti obdelovanca na obstojnost strgarskih nožev

V prvi analizi smo ugotavljali zakonitost odvisnosti:

$$T_{sek} = f(I_k, T_{kalj}^{\circ}\text{C}, V^{m/min}, \sigma_{m\text{ kp/mm}^2})$$

$$T_{sek} = f(I_k, T_{kalj}^{\circ}\text{C}, V^{m/min}, \sigma_{m\text{ kp/mm}^2})$$

Ugotovljena odvisnost je prikazana z nomogramom na sliki 14. Pri danih pogojih in omejitvah preizkušanja je regresijska odvisnost statistično pomembna na nivoju $\alpha = 50\%$. To pomeni, da s 95-odstotno statistično gotovostjo lahko pričakujemo prikazano odvisnost. Koeficient korelacije R je razmeroma visok in koeficient determinacije $R^2 = 0,51$ pomeni, da 51 odstotkov variacij obstojnosti nožev T_{sek} pripisujemo vplivu analiziranih faktorjev, preostalih 49 odstotkov variacij pa povzročajo ostali neznani ali neupoštevani vplivi. Trdnost preizkušanca pri danih pogojih — torej v območju 85—97 kp/mm² — ni predstavljala pomembnega vpliva na obstojnost nožev. Iz nomograma jasno vidimo, kako omogočajo finejši karbidi povečanje obstojnosti ter kako vpliva na povečanje obstojnosti hitrost rezanja in tempera-

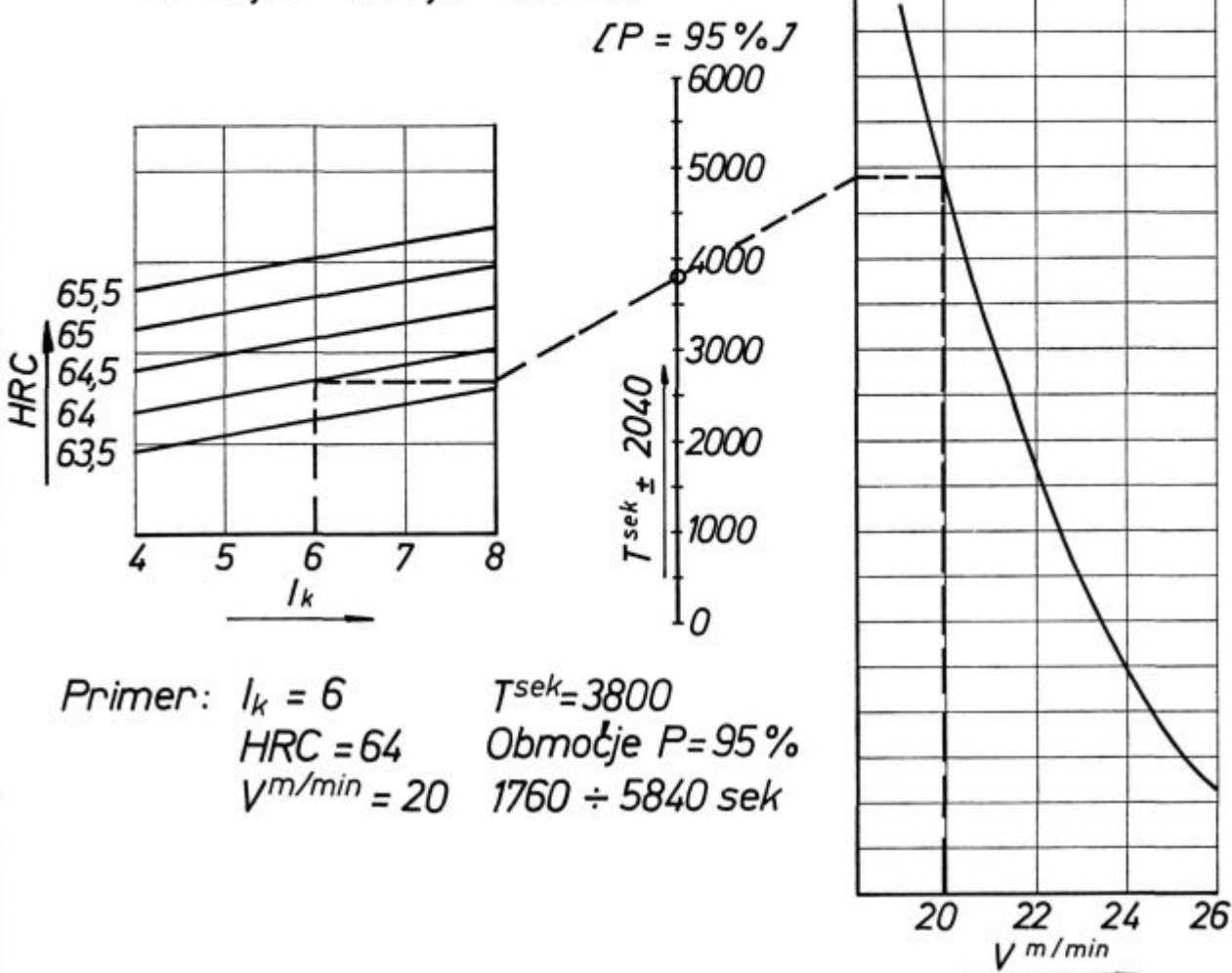
tura kaljenja. Če ostanejo drugi pogoji nespremenjeni, dobimo največjo obstojnost nožev pri zgornji meji uporabnega območja temperatur kaljenja. Pri kaljenju na 1200^o C je obstojnost nožev najmanjša. Ta ugotovitev nas spominja na podobne ugotovitve pri drugih analizah, ki jih bomo opisali kasneje in jih pri raziskavi nismo mogli docela prepričljivo pojasniti.

Opozoriti moramo, da prikazuje opisani nomogram le povprečno regresijsko odvisnost. Pri odčitnem rezultatu moramo upoštevati še napako, ki je določena z analizo statistične porazdelitve. Navedene so meje razsipanja za 95 odstotkov celotne populacije. Na nomogramu odčitani T_{sek} predstavlja pričakovano srednjo vrednost, posamezne vrednosti pa moramo s 95 odstotno statistično gotovostjo pričakovati v območju $T_{sek} \pm 2032$.

Podobna odvisnost je prikazana z nomogramom na sliki 15. Razlika je v tem, da je kot neodvisna spremenljivka oziroma kot vplivni faktor upoštevana trdota nožev HRC namesto temperature kaljenja.

$$T^{sek} = f(l_k, HRC, V^{m/min}, \sigma_m^{kp/mm^2})$$

$$R^2 = 0,50 \quad R = 0,71 \quad \alpha = 5\%$$



Slika 15

Vpliv velikosti karbidov, trdote nožev, hitrosti rezanja in trdnosti obdelovanca na obstojnost strgarskih nožev

Precej manjša je statistična pomembnost vpliva analiziranih faktorjev na pokazatelje obrabe VB (sl. 16), KB (sl. 17) in KT (sl. 18), medtem ko je regresija za KL statistično nepomembna. Iz analize bi lahko sklepali, da bi kot kriterij obrabe najlažje obvladali širino izjede KB, ker pri tem 28 odstotkov variacij lahko pojasnimo z vplivom analiziranih štirih faktorjev.

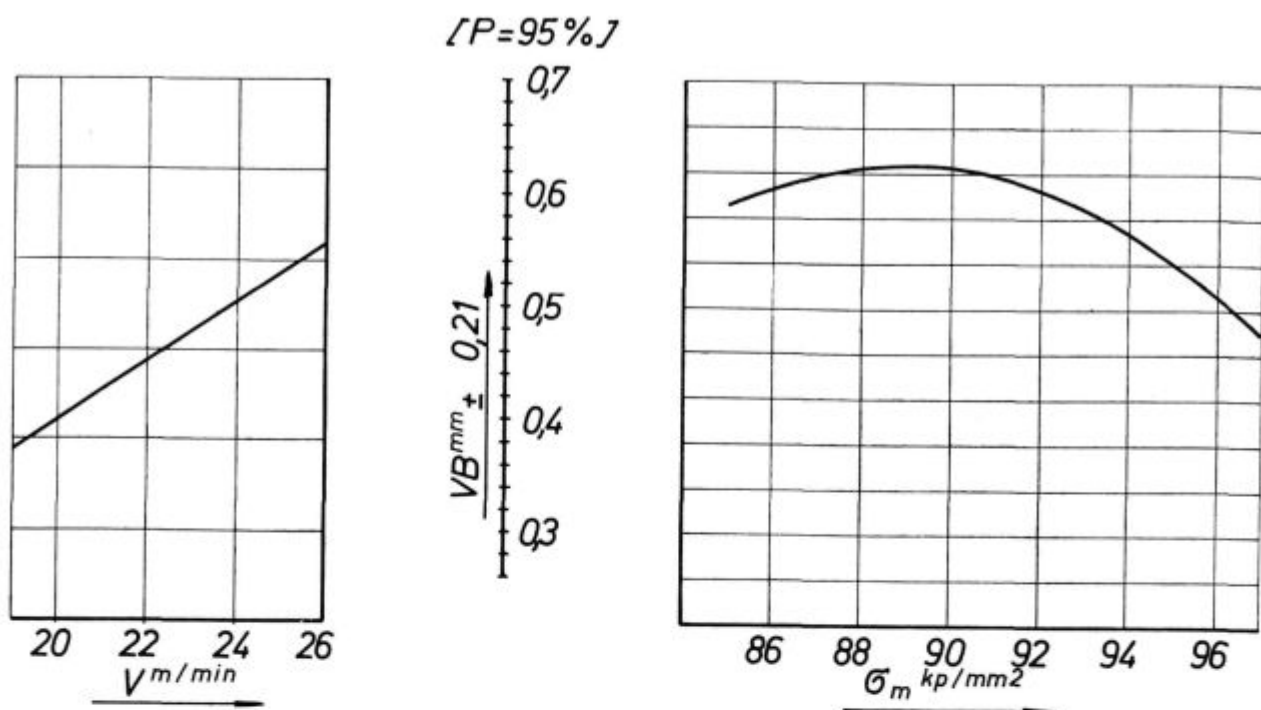
Z nomogrami na slikah 14–18 so prikazane povprečne medsebojne kombinacije v celotnem območju navedenih omejitev. Posebej moramo opozoriti, da rezultati največjih obstojnosti T niso povsem realni, ker smo zaradi omejene poti rezanja morali mnoge poizkuse po 90 minutah struženja prekiniti, čeprav bi noži vzdržali precej daljši čas rezanja. Ekstrapolacij se nismo mogli vedno poslužiti, zato smo večino rezultatov prekinjenih poizkusov pri izračunu množične regresije upoštevali s časom obstojnosti $T = 90$ minut. S tem so

ugotovljene odvisnosti nekoliko oškodovane, zaključki pa so še trdnješi, ker vsebujejo določeno pozitivno rezervo.

Zaradi zanimivosti si oglejmo neposredno primerjavo obstojnosti nožev z grobimi in finimi karbidi pri treh različnih temperaturah kaljenja in pri konstantni hitrosti rezanja 22 m/min. Na sliki 19 predstavlja vsak stolpec srednjo vrednost obstojnosti dvanajstih nožev pri opisanih pogojih preizkušanja. Poizkusi struženja so bili pri vseh nožih s finimi karbidi, ki so bili kaljeni s 1240°C, prekinjeni po 90 minutah, čeprav noži še niso bili dovolj obrabljeni in bi zdržali še daljši čas. Na osnovi preizkušanja pri večjih hitrostih rezanja smo v diagramu $T - v$ z ekstrapolacijo ocenili povprečno obstojnost nožev $T = 550$ minut pri hitrosti rezanja $v = 22$ m/min. Na sliki 19 so podane tudi srednje vrednosti trdot za posamezne skupine nožev.

$$VB^{mm} = f(l_k, HRC, V^{m/min}, \sigma_m^{kp/mm^2})$$

$$R^2 = 0,08 \quad R = 0,28 \quad \alpha = 5\%$$

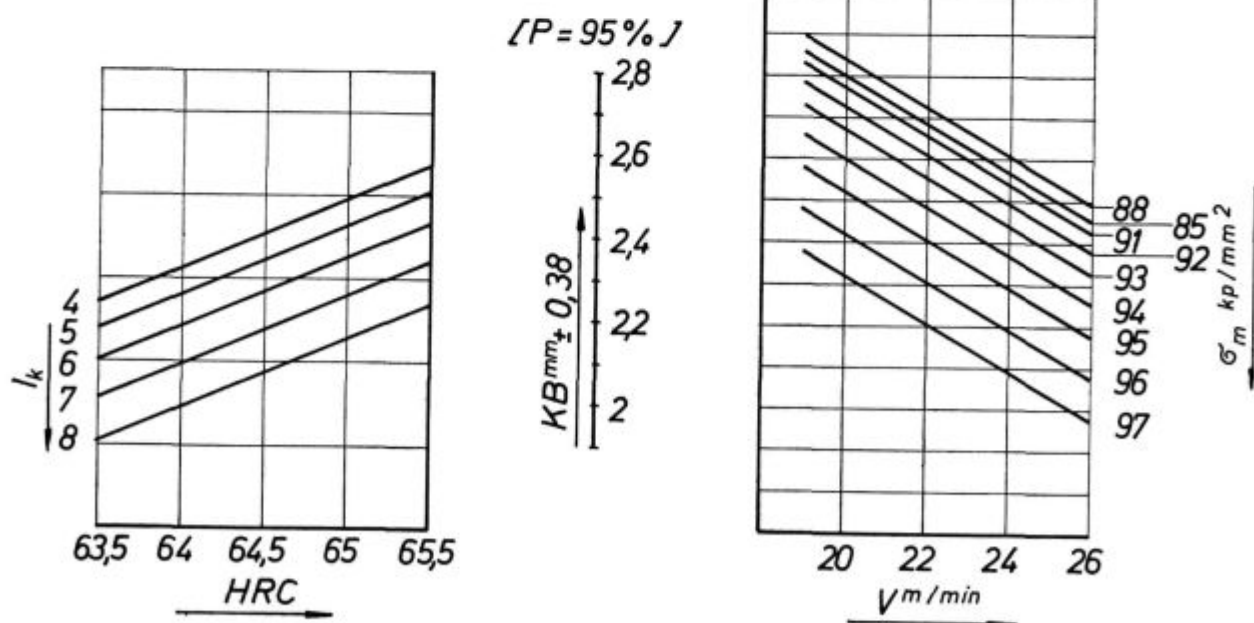


Slika 16

Vpliv velikosti karbidov, trdote nožev, hitrosti rezanja in trdnosti obdelovanca na širino obrabe na prosti ploskvi

$$KB^{mm} = f(l_k, HRC, V^{m/min}, \sigma_m^{kp/mm^2})$$

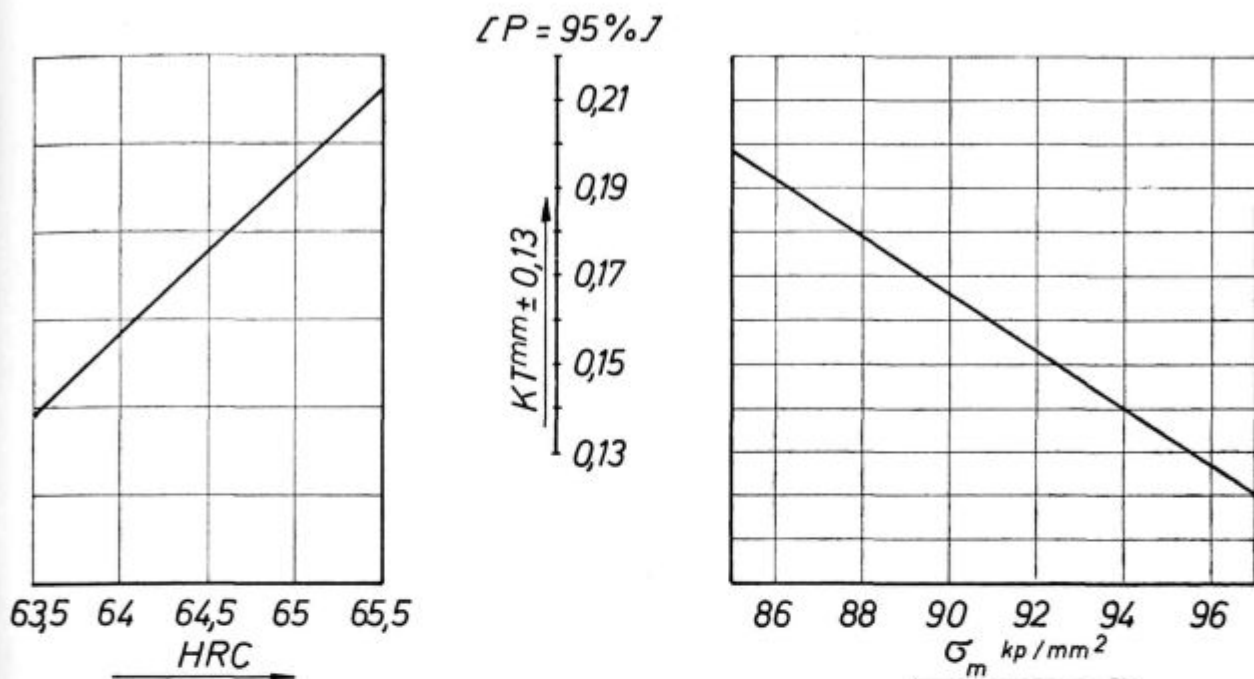
$$R^2 = 0,28 \quad R = 0,53 \quad \alpha = 5,1\%$$



Slika 17

Vpliv velikosti karbidov, trdote nožev, hitrosti rezanja in trdnosti obdelovanca na širino izjede na cepilni ploskvi

$$R^2 = 0,04 \quad R = 0,19 \quad \alpha = 5\%$$



Slika 18

Vpliv velikosti karbidov, trdote nožev, hitrosti rezanja in trdnosti obdelovanca na globino izjede na cepilni ploskvi

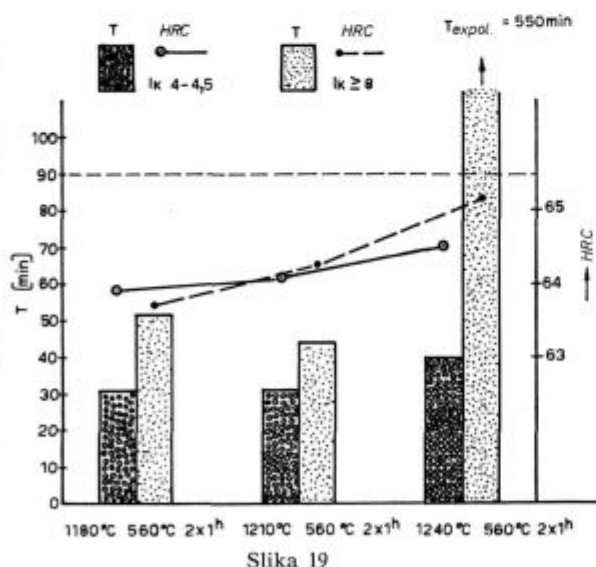
ξ_{4736} $G_m = 92 \text{ kp/mm}^2$ $\alpha = 8^\circ$ $\beta = 15^\circ$ $\lambda = 0^\circ$ $\xi = 90^\circ$ $2\epsilon = 60^\circ$ $r = 1 \text{ mm}$
 $V = 22 \text{ m/min}$ $a = 2 \text{ mm}$ $s = 0,5 \text{ mm/vrt}$

vitev, da pri nožih z grobimi karbidi toplotna obdelava ne vpliva na obstojnost v tolikšni meri kakor pri nožih s finimi karbidi. Noži s finimi karbidi imajo pri temperaturi kaljenja 1240°C približno desetkratno obstojnost v primerjavi z noži, kaljenimi z nižjih temperatur. Iz tega sledi, da moramo pri kaljenju strgarskih nožev izbirati temperature v bližini zgornje meje predpisanega območja. To priporočilo velja seveda le za strgarske nože. Pri orodjih, ki morajo biti žilava in posebno pri spiralnih svedrih so verjetno ti odnosi nekoliko drugačni zaradi posebnih pogojev rezanja. Praktične poizkuse spiralnih svedrov iz istega jekla in iz istih palic je prevzela Industrija alata Trebinje. Ti poizkusi še niso zaključeni, zato žal še ni mogoče podati primerjave spiralnih svedrov s strgarskimi noži.

Minimum rezne obstojnosti pri srednji temperaturi kaljenja ni pojasnjen, čeprav se je podoben vpliv pojavljal tudi pri preizkušanju drugih lastnosti.

Zaključek teh poizkusov rezne obstojnosti je v kratkem tak:

Grobi karbidi povzročajo v vseh primerih manjšo obstojnost strgarskih nožev, najbolj pa pride ta razlika do izraza pri optimalnih pogojih toplotne obdelave.



Slika 19

Primerjava povprečnih obstojnosti nožev z grobimi in finimi karbidi, kaljenimi s treh različnih temperatur. Hitrost rezanja pri preizkušanju je znašala 22 m/min.

S temi primerjavami brez dvomov ugotavljamo, da so obstojnosti nožev z grobimi karbidi slabše od nožev s finimi karbidi. Zelo zanimiva je ugotov-

Zaradi tega važnega zaključka smo nadaljnji program raziskave razširili s preizkušanjem vpliva velikosti karbidov na osnovne mehanske lastnosti brzoreznega jekla.

VPLIV VELIKOSTI KARBIDOV NA TRDOTO OSNOVNE STRUKTURE V ŽARJENEM, KALJENEM IN POPUŠČENEM STANJU

Z merilcem trdote Zwick smo pri majhni obtežbi 1 kg merili trdoto osnovne strukture, tako da smo se pri merjenju izognili karbidnim zrnom. Pri večji seriji smo na vsakem vzorcu izvedli po 10 meritev v žarjenem stanju, v kaljenem in v popuščenem stanju. Srednje vrednosti trdot so zbrane v tabeli 1.

Tabela 1 — Srednje vrednosti trdot $HV_{1\text{ kg}}$ osnovne strukture

Vzorci	Stanje	Žarjeno	Kaljeno	Popuščeno
z grobimi karbidi		272	906	907
s srednjimi karbidi		275	852	911
s finimi karbidi		270	873	873

Razlike so statistično: nepo- nepo- nepo-
membne membne membne

Na osnovi rezultatov analize variance za posamezna stanja toplotne obdelave lahko trdimo, da je vpliv velikosti karbidov na trdoto osnovne strukture nepomemben. Ugotovljene razlike trdot pri posameznih stanjih toplotne obdelave so torej slučajne.

Zanimivo je, da smo v uvodnih analizah ugotovili, da je povprečna trdota HRC v kaljenem (slika 4) in v popuščenem (sl. 20) stanju pomembno odvisna od velikosti karbidov.

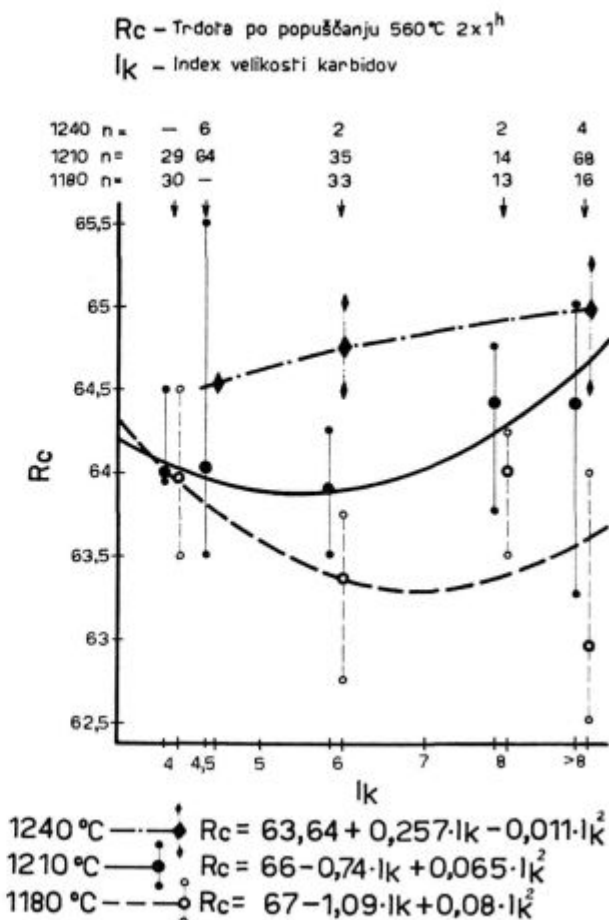
To pomeni, da z upoštevanjem obeh ugotovitev lahko razlike trdot pripisujemo predvsem različni velikosti karbidov in ne razlikam osnovnih struktur. Osnovna struktura se sicer pod vplivom karbidov spreminja, a ne v tolikšni meri, da bi statistično odločujoče vplivala na spremembe trdot.

Splošna prisotnost, topnost in razporeditev karbidov so neposredno odvisne od velikosti karbidov. Vse to pa pomembno vpliva na povprečno trdoto vzorcev.

VPLIV VELIKOSTI KARBIDOV NA LASTNOSTI BRZOREZNEGA JEKLA PRI POPUŠČANJU

Trdota v popuščenem stanju in popuščna obstojnost

Slika 20 prikazuje trdoto prob po dvakratnem popuščanju po eno uro na 560°C v odvisnosti od velikosti karbidov in temperature kaljenja. Na dia-



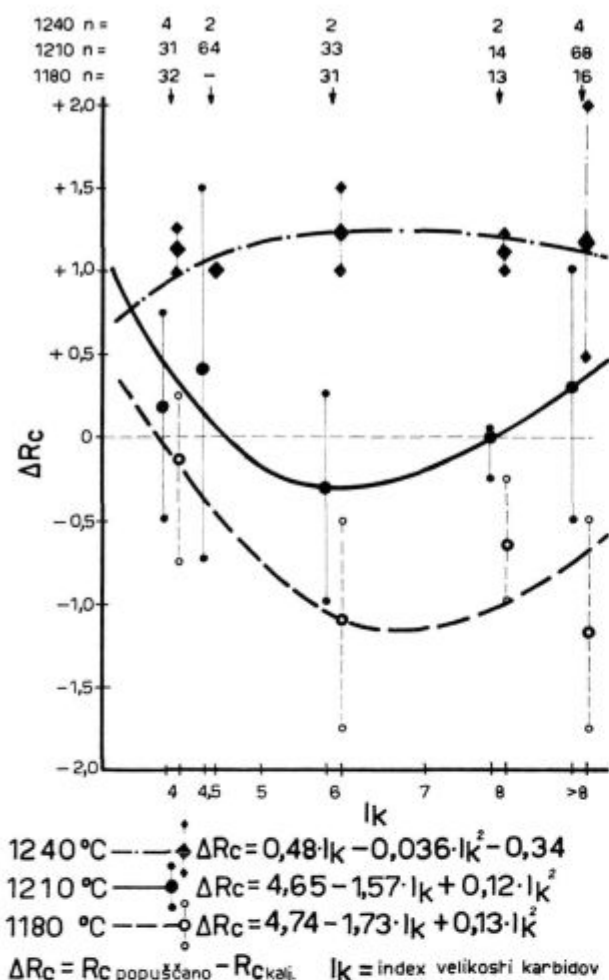
Slika 20

Vpliv velikosti karbidov na trdoto po popuščanju

gramu so podane srednje vrednosti, širine 95-odstotnega razsipanja in regresijske krivulje za posamezne temperature kaljenja. Navedeno je tudi število prob n .

Na enak način je na sliki 21 prikazana namesto trdote popuščna obstojnost, t. j. znižanje ali zvišanje trdote pri popuščanju.

Višja temperatura kaljenja daje v celotnem območju višje trdote v popuščenem stanju in večje popuščne obstojnosti, kar je popolnoma razumljivo. Krivulji za temperaturo kaljenja 1240°C se na obeh slikah razlikujeta od krivulj za temperaturi kaljenja 1180°C in 1210°C po svoji obliki in položaju. Primerjava kaže, da grobi karbidi zmanjšujejo vpliv temperature kaljenja na preiskovane lastnosti. To smo ugotovili tudi pri drugih raziskavah. Pri uvodnih raziskavah smo ugotovili linearno odvisnost med velikostjo karbidov in trdoto v kaljenem stanju (glej sliko 4). Vpliv velikosti karbidov v procesu popuščanja pa kaže paraboličen značaj z najnižjo vrednostjo pri srednji velikosti karbidov. Slika 21 kaže, da dobimo s toplotno obdelavo 1210°C olje + popuščanje 560°C 2×1 uro pri jeklu s srednjimi karbidi majhen padec trdote pri popuščanju, v primeru grobih in finih karbidov pa povečanje trdote pri popuščanju v odnosu na

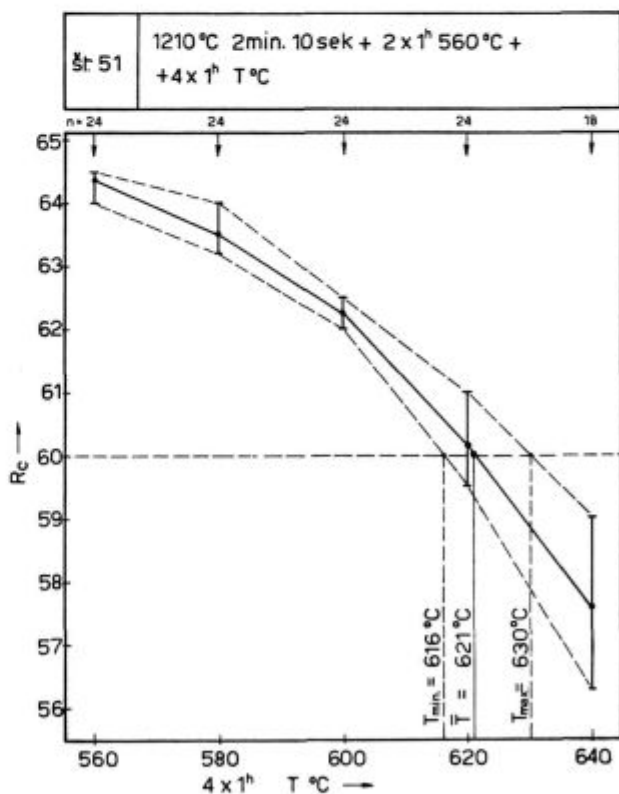


Slika 21

Vpliv velikosti karbidov na popuščno obstojnost

kaljeno stanje. Popuščna obstojnost je kot razlika trdote v popuščenem in trdote v kaljenem stanju neposredni pokazatelj tipičnega pojava sekundarne trdote brzoreznih jekel. Znano je, da na efekt sekundarne trdote pri brzoreznih jeklih vpliva premena zaostalega avstenita v martenzit in izločanje finih karbidov pri popuščanju. Najfinejši karbidi omogočajo raztapljanje velikih količin sekundarnih karbidov v toku avstenitizacije pri kaljenju. S tem se doseže večja legiranost avstenita in iz njega nastali martenzit se odlikuje z večjo popuščno obstojnostjo. Zaradi raztapljanja večje količine karbidov pri kaljenju se tudi pri popuščanju v intervalu sekundarne trdote izloča večja količina finih sekundarnih karbidov, kar povečuje trdoto. Kolikor so karbidi večji, toliko se težje raztapljajo. Posledica je manjša popuščna obstojnost martenzita in manjša možnost izločanja karbidov pri popuščanju. Efekt sekundarne trdote slabi s povečevanjem velikosti karbidov od finih do srednjih s povprečnim indeksom $I_k = 6$. Prisotnost neraztopljenih in enakomerno razporejenih karbidov v osnovni masi na temperaturi kaljenja

preprečuje prekomerno rast zrn in druge pojave pregretja jekla pri kaljenju. Vzorci z grobimi karbidi $I_k = 4$ imajo zelo majhno število karbidov, ki pa so zelo veliki in često neenakomerno razporejeni. Grobi karbidi se skoraj ne raztapljajo pri kaljenju in ostanejo nespremenjeni. Zaradi majhnega števila »ovir« za naraščanje zrn bo jeklo že pri normalni temperaturi kaljenja grobo zrnato in pregreto. V kaljeni strukturi je zelo velika količina zaostalega avstenita, ki s svojo premeno v martenzit pri popuščanju močno povečuje sekundarno trdoto. Po teh ugotovitvah bi lahko pričakovali, da je povečanje trdote in popuščne obstojnosti ob povečevanju karbidov od srednjih h grobim posledica močnega naraščanja količine zaostalega avstenita pri kaljenju in njegove premene v martenzit pri popuščanju. Pri temperaturi kaljenja 1240 °C so odnosi nekoliko spremenjeni, kljub temu pa potrjujejo postavljene zaključke. Kalilna temperatura je toliko višja, da je optimum pogojev avstenitizacije dosežen pri srednjih karbidih, medtem ko se pri finih, a posebno pri grobih karbidih že pojavljajo neugodni znaki pregretja. Vzorci z grobimi karbidi so pregreti že v tolikšni meri, da je količina zaostalega avstenita tolikšna, da normalno popuščanje ne omogoča več zadostne premene. Šele s ponovnimi popuščaji se doseže postopno povečevanje trdote, kolikor so karbidi tako grobi.



Slika 22

Primer interpolacijskega določanja temperature žarobstojnosti

ŽAROOSTOJNOST

Žaroobstoynost smo preizkušali po modificirani ruski metodi³. Po tej metodi se vse vzorce za določene pogoje toplotne obdelave enako kali in normalno popušča. Posamezne vzorce se po tej normalni toplotni obdelavi še štirikrat po 1 uro ogreva na različne temperature v stopnjah po 20° C. Trdote merimo po tem dodatnem štirikratnem ogrevanju. Z interpolacijo iščemo tisto temperaturo, ki po takem postopku daje trdoto 60 HRC. To je temperatura žaroobstoynosti jekla.

Slika 22 prikazuje tak primer interpolacijskega določanja temperature žaroobstoynosti, pri čemer je za vsako temperaturo preizkušenih 24 prob. V diagramu so za vsako temperaturo preizkušanja podane srednje vrednosti in širine razspanja merjenih trdot. Z interpolacijskim postopkom smo v danem primeru ugotovili srednjo temperaturo žaroobstoynosti 621° C, zgornjo mejo 630 in spodnjo mejo 616° C. Na tak način smo preizkusili skupno 954 prob in pri tem z interpolacijami dobili rezultate, ki jih prikazuje tabela 2.

Tabela 2 — Temperatura žaroobstoynosti v odvisnosti od velikosti karbidov in temperature kaljenja

Toplotna obdelava	Karbidi	Velikost karbidov			
		fini		grobi	
		$I_k = 4$	$I_k = 4,5$	$I_k = 8$	$I_k > 8$
1180° C + 560° C 2 × 1 ^h + T° C 4 × 1 ^h → 60 HRC		n = 24 $\bar{T} = 608^{\circ}$ C $T_{\max} = 613^{\circ}$ C $T_{\min} = 605^{\circ}$ C	—	n = 24 $\bar{T} = 607^{\circ}$ C $T_{\max} = 610^{\circ}$ C $T_{\min} = 604^{\circ}$ C	—
1210° C + 560° C 2 × 1 ^h + T° C 4 × 1 ^h → 60 HRC		n = 24 $\bar{T} = 608^{\circ}$ C $T_{\max} = 612^{\circ}$ C $T_{\min} = 605^{\circ}$ C	n = 72 $\bar{T} = 613^{\circ}$ C $T_{\max} = 625^{\circ}$ C $T_{\min} = 602^{\circ}$ C	n = 24 $\bar{T} = 615^{\circ}$ C $T_{\max} = 620^{\circ}$ C $T_{\min} = 604^{\circ}$ C	n = 48 $\bar{T} = 618^{\circ}$ C $T_{\max} = 630^{\circ}$ C $T_{\min} = 612^{\circ}$ C

Tudi pri žaroobstoynosti ugotavljamo, da ima temperatura kaljenja večji vpliv na temperaturo žaroobstoynosti pri finih karbidih kakor pri grobih, kar smo ugotovili tudi pri prejšnjih preizkusih.

Te poizkuse smo izkoristili tudi za ugotavljanje korelacije trdote HB in trdnosti σ_m za brzorezno jeklo (slika 24) v žarjenem stanju, pri čemer smo ugotovili povprečno odvisnost

$$\sigma_m = 0,336 \cdot HB$$

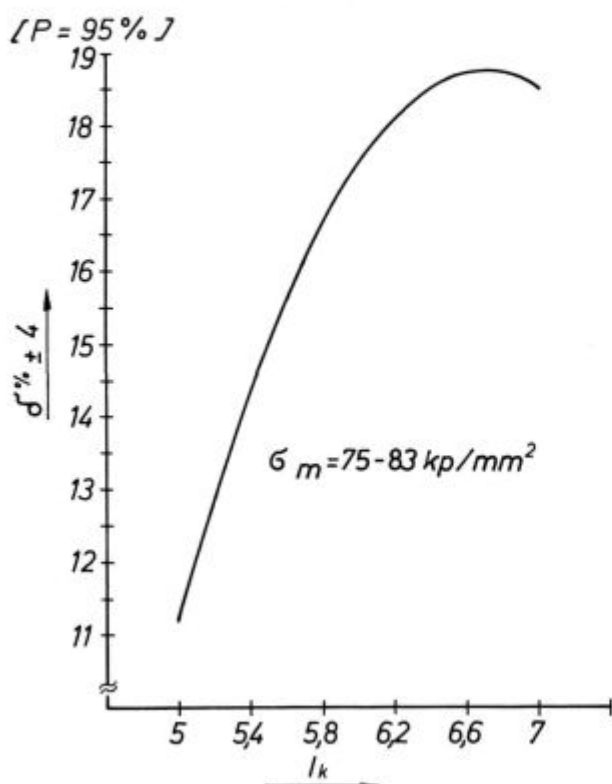
VPLIV VELIKOSTI KARBIDOV NA MEHANSKE LASTNOSTI PRI TRGALNEM POIZKUSU

Pri hladnem vlečenju drobnih dimenzij brzoreznega jekla so za sposobnost deformacije z vlečenjem odločilne mehanske lastnosti, ki jih določamo z normalnim trgalnim poizkusom. S serijo 93 palic iste šarže in dimenzije 9,6 mm Ø v žarjenem stanju, ki so imele velikost karbidov od $I_k = 5$ do $I_k' = 7$, smo ugotavljali vpliv velikosti karbidov na trdnost (σ_m), mejo raztezanja (σ_v), raztezek (δ) in kontrakcijo (ψ). Trdnost in meja raztezanja nista bili pomembno odvisni od velikosti karbidov, za raztezek in kontrakcijo pa smo ugotovili odvisnosti, ki jih prikazuje slika 23. Za to odvisnost veljajo omejitve $\sigma_m = 75 - 83$ kp/mm² in $\sigma_v = 53 - 59$ kp/mm². Iz tega sledi, da merjenje raztezka in kontrakcije pri trganju zelo dobro pokaže sposobnost jekla za hladno vlečenje. V tekoči kontroli so te meritve mnogo bolj priporočljive in merodajne kakor meritve trdote.

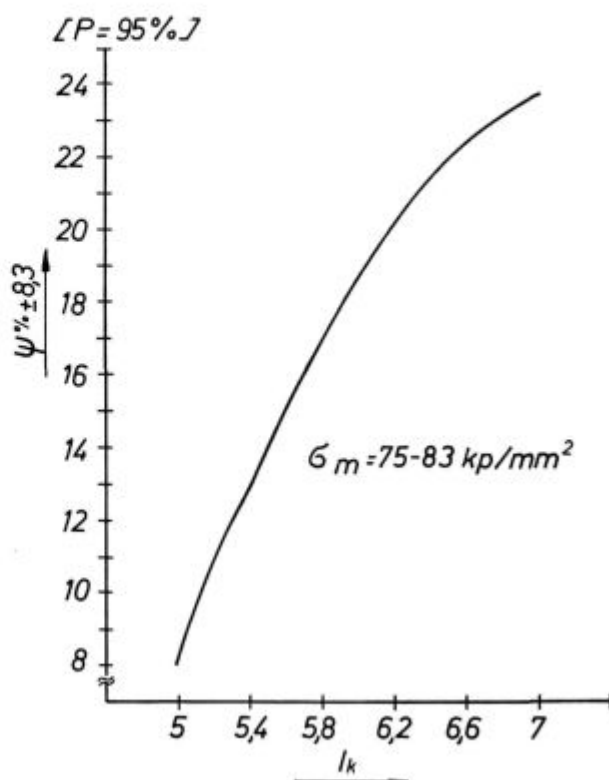
VPLIV VELIKOSTI KARBIDOV, TEMPERATURE KALJENJA, VELIKOSTI AVSTENITNEGA ZRNA IN TRDOTE NA ŽILAVOST

V zvezi s preizkušanjem rezne obstojnosti strgarskih nožev smo preizkušali tudi vpliv velikosti karbidov in velikosti avstenitnega zrna na udarno žilavost. Za te preizkuse smo izbrali probo brez zareze. Da bi zagotovili prelom točno v sredini, smo debelino probe oslabili za 1 mm z brušenjem po skici na sliki 25. Probe smo lomili na charpyjevem kladiu 10 kpm. V programu imamo še določanje žilavosti s pomočjo upogibnih prob, ki daje pri trdih orodnih jeklih boljše rezultate. Za spiralne svedre so karakteristike obremenitev precej drugačne, zato je v ta namen izbran postopek preizkušanja udarno torzijske žilavosti. Preizkuse udarno torzijske žilavosti in zdržljivosti spiralnih svedrov izvaja iz istega materiala Industrija alata Trebinje.

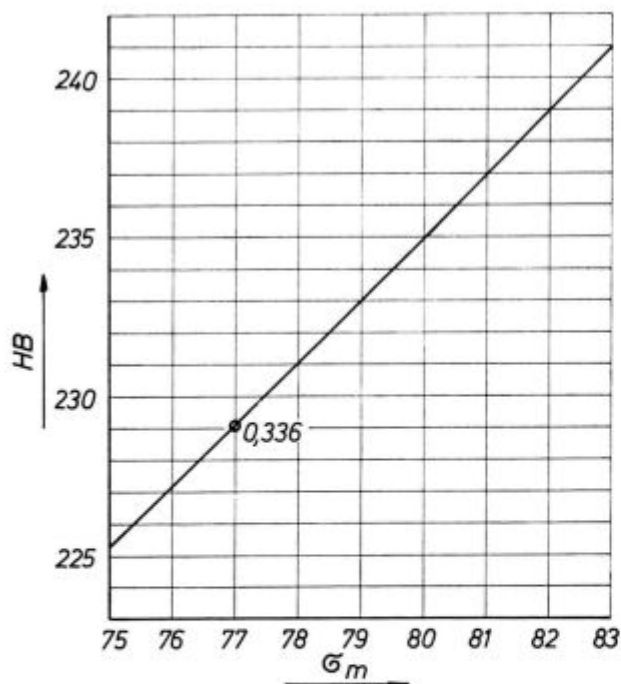
$$\begin{aligned}\sigma' \% &= f(l_k) \\ R^2 &= 0,46 \quad R = 0,68 \\ \alpha &= 5; 1; 0,1 \%\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\psi \% &= f(l_k) \\ R^2 &= 0,51 \quad R = 0,72 \\ \alpha &= 5 \%\end{aligned}$$



Slika 23
Vpliv velikosti karbidov na raztezek in kontrakcijo pri trgalnem poizkusu



Slika 24
Korelacija trdote HB in trdnosti σ_m za brzorezno jeklo v žarjenem stanju

Za meritve udarne žilavosti smo porabili 274 žilavostnih prob po skupinah glede na velikost karbidov (grobi, srednji in fini) ter po dveh temperaturah kaljenja 1180° C in 1210° C. Vse probe so bile enako popuščane na 560° C dvakrat po 1 uro. Rezultati teh poizkusov so podani v tabeli 3.

V tabeli 3 so za vsako skupino podani sledeči podatki:

- srednja vrednost žilavosti ($\bar{X}$),
- največja vrednost žilavosti ($X_{\max.}$),
- najmanjša vrednost žilavosti ($X_{\min.}$),
- število preizkušenih prob (n),
- varianca žilavosti (s^2),
- koeficient variacije ($V = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \%$)

Pomembnost vpliva velikosti karbidov in temperature kaljenja na žilavost smo ugotovili s statistično analizo variance za sistem šestih skupin v tabeli 3.

Po izračunu smo dobili kot rezultat standardno tabelo analize variance¹³.

Tabela 3

Velikost karbidov Tempe- ratura kaljenja	$I_k = 4 - 4,5$ (grobi)	$I_k = 6$ (srednji)	$I_k = 8$ (fini)
1180° C	1 $\bar{X} = 1,12 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\max} = 1,33 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\min} = 0,89 \text{ kpm/cm}^2$ $n = 24$ $s^2 = 0,0143$ $V = 10,6 \%$	3 $\bar{X} = 2,06 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\max} = 3,31 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\min} = 1,37 \text{ kpm/cm}^2$ $n = 31$ $s^2 = 0,4458$ $V = 32,3 \%$	5 $\bar{X} = 2,44 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\max} = 3,36 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\min} = 1,55 \text{ kpm/cm}^2$ $n = 23$ $s^2 = 0,2086$ $V = 18,8 \%$
1210° C	2 $\bar{X} = 1,06 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\max} = 1,55 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\min} = 0,75 \text{ kpm/cm}^2$ $n = 87$ $s^2 = 0,7224$ $V = 80,0 \%$	4 $\bar{X} = 1,85 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\max} = 2,78 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\min} = 1,20 \text{ kpm/cm}^2$ $n = 33$ $s^2 = 0,3263$ $V = 30,8 \%$	6 $\bar{X} = 1,95 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\max} = 2,78 \text{ kpm/cm}^2$ $x_{\min} = 1,36 \text{ kpm/cm}^2$ $n = 76$ $s^2 = 1,2254$ $V = 56,9 \%$

Rezultati analize variance:

	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Srednji kvadrati	F računsko	Statistična pomembnost
Postopki	147,11	$v_1 = 5$	29,42	$\frac{29,42}{0,057} = 516,14$	zelo velika
Napake	15,26	$v_2 = 269$	0,057		
Vsota	162,37	273			

Izračunana vrednost F je mnogo večja od kritične vrednosti v tabelah za 99-odstotno statistično gotovost.

Na osnovi teh rezultatov analize variance lahko trdimo, da so v celotnem sistemu šestih skupin razlike žilavosti statistično zelo pomembne. V celotnem območju preizkušanja moramo pričakovati pomemben vpliv velikosti karbidov in temperature kaljenja na žilavost. Podrobnejše informacije o vplivih dobimo po primerjavah posameznih serij »vsake z vsako«. Kot kriterij za ocenitev pomembne razlike smo vzeli statistično gotovost večjo od 99 %, za nepomembne razlike pa manjšo od 95 %. Pri ugotovitvi statistične gotovosti 95 do 99 % smo razlike označili za statistično polpomembne ali negotove. Za primerjave skupin smo uporabljali statistično testiranje¹³ s tako imenovanim parametrom t.

V naslednji shemi je podan pregled zaključkov o pomembnosti razlik v žilavosti pod vplivom velikosti karbidov pri navedenih temperaturah kaljenja. (Številčne oznake se nanašajo na šest skupin v tabeli 3.)

1180° C: **1** — **5** pomembna razlika
1 — **3** pomembna razlika
3 — **5** polpomembna razlika
1210° C: **2** — **6** pomembna razlika
2 — **4** pomembna razlika
4 — **6** nepomembna razlika

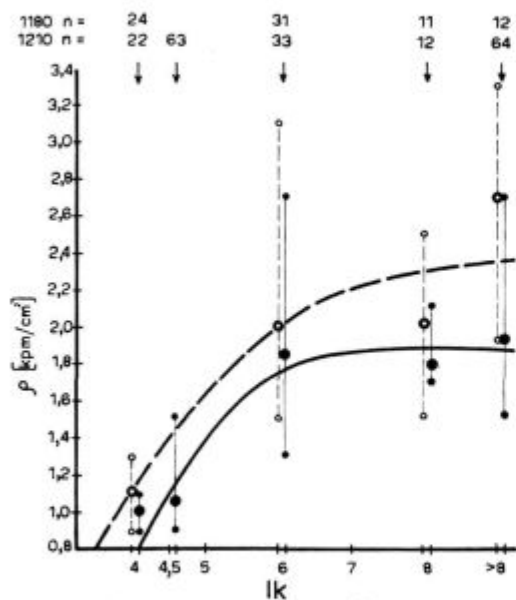
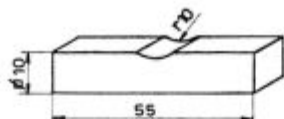
Na enak način smo testirali pomembnost razlik žilavosti pod vplivom temperature kaljenja pri enakih velikostih karbidov.

$I_k = 4-4,5$ (grobi) : **1** — **2** nepomembna
 $I_k = 6$ (srednji) : **3** — **4** nepomembna
 $I_k \geq 8$ (fini) : **5** — **6** pomembna

Rezultate preizkusov z območji razsipanja in s krivuljama regresijske odvisnosti prikazuje slika 25. Pri danih značilnostih statistične porazdelitve in medsebojnih odnosov smo ugotovili, da raz-

Toplotna obdelava:

1180 °C 2min. 10sek. olje + 560 °C 2 x 1 h
1210 °C



$$1180^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1,19 \cdot I_k - 0,07 \cdot I_k^2 - 2,45$$

$$1210^{\circ}\text{C} \quad \rho = 1,81 \cdot I_k - 0,13 \cdot I_k^2 - 4,31$$

ρ – žilavost I_k – Index velikosti karbidov

Slika 25

Vpliv velikosti karbidov in temperature kaljenja na žilavost

liko žilavosti med dvema skupinama prob lahko smatramo za statistično pomembno, če se obe srednji vrednosti razlikujeta za več kot 0,4 kpm na cm². Če upoštevamo, da je srednja vrednost velikosti karbidov pri jeklu BRM-2 (glej¹² tabela 1!) $I_k = 7,25$, smo s statistično analizo ugotovili, da se žilavost pomembno poslabša, če se indeks velikosti karbidov zmanjša pod $I_k = 5,5$. Povprečno so žilavosti pri temperaturi kaljenja 1180 °C večje kakor pri višji temperaturi kaljenja.

Statistično vrednotenje z upoštevanjem območja pomembnosti razlik nam daje pri srednji velikosti karbidov $I_k = 7,25$ za BRM-2 pri opisanih pogojih preizkušanja sledeče vrednosti za žilavost:

$\rho = 2,22 \pm 0,41$ (kpm/cm²) pri kaljenju 1180 °C

$\rho = 1,87 \pm 0,42$ (kpm/cm²) pri kaljenju 1210 °C

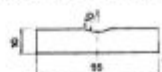
V teh območjih moramo smatrati razlike srednjih žilavosti med skupinami za nepomembne.

Iz tega sledi, da bi smeli pri kaljenju 1180 °C dopuščati $I_{k \min} = 5,5$, pri kaljenju 1210 °C pa $I_{k \min} = 5,25$.

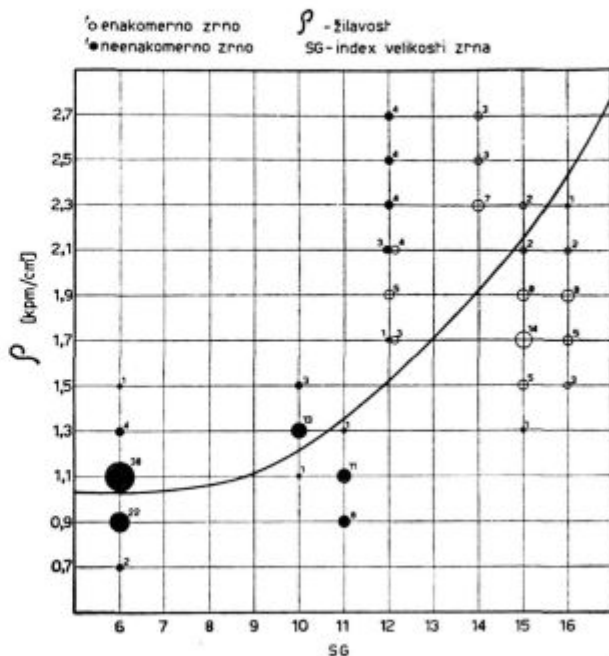
Slika 26 kaže, da je vpliv velikosti avstenitnega zrna na žilavost zelo močan. Če je zrno fino in enakomerno je tudi žilavost jekla razmeroma velika. Pri grobem in neenakomernem zrnu je žilavost majhna. V diagramu so podane točke z različnimi ploščicami v skladu s frekvenco pojavljanja posameznih vrednosti.

Toplotna obdelava:

1210 °C 2min. 10 sek. - olje + 560 °C 2 x 1 ura



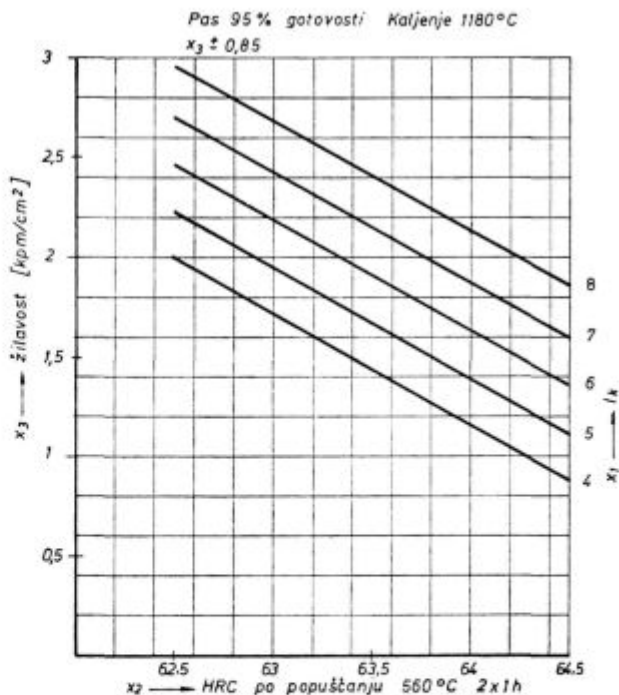
Udarno žilavostni preizkus na Charpy kladivu 10 kpm



Aproximacija interpolirane krivulje s parabolo $\rho = 1,66 - 0,198 \cdot [SG] + 0,015 \cdot [SG]^2$

Slika 26

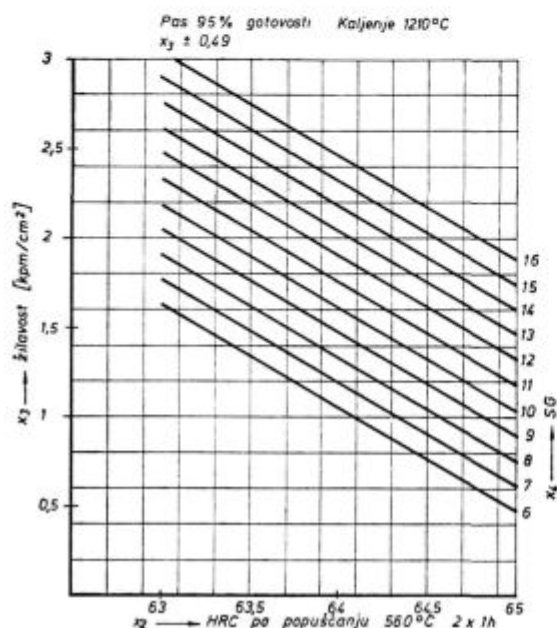
Žilavost v odvisnosti od velikosti avstenitnega zrna



Slika 27

Žilavost v odvisnosti od velikosti karbidov in trdote.
 $R = 0,80$ $R^2 = 0,64$ $S_y = 0,43$ $\alpha = 5; 1; 0,1 \%$

V diagramih na slikah 25 in 26 smo upoštevali pri določeni temperaturi kaljenja le vpliv velikosti karbidov ali velikosti zrna ločeno. Nedvomno ima močan vpliv na žilavost tudi trdota prob. Analiza regresije, ki je prikazana na sliki 27, je to pričakovano odvisnost popolnoma potrdila. Pri temperaturi kaljenja 1180°C smo upoštevali istočasno vpliv velikosti karbidov in trdote prob na žilavost. Pri drugi skupini prob, kaljenih na 1210°C, smo dodatno upoštevali še vpliv velikosti avstenitnega zrna na žilavost (slika 28).



Slika 28

Žilavost v odvisnosti od velikosti karbidov, trdote in velikosti avstenitnega zrna

$$R = 0,88 \quad R^2 = 0,78 \quad S_y = 0,25 \quad \alpha = 5; 1; 0,1 \%$$

Izračun te regresije nas je privedel do zanimivih ugotovitev:

Najprej sta se izkazala kot zelo pomembna vpliva na žilavost trdota prob in velikost karbidov. Ko smo upoštevali še vpliv velikosti avstenitnega zrna je izračun izločil vpliv velikosti karbidov, ker je variacija žilavosti boljše pojasnjena z vplivom trdote prob in velikosti zrna. Vpliv velikosti zrna je močnejši od vpliva velikosti karbidov. Iz prejšnjih analiz in uvodnih raziskav pa vemo, da ti dve spremenljivki nista med seboj neodvisni, saj smo že ugotovili (glej sliko 3), da je velikost avstenitnega zrna v dobri meri posledica velikosti karbidov. Torej je ukrep, ki ga je narekoval program pri izračunu regresije razumljiv in tudi pravilen. V vplivu velikosti zrna je posredno upoštevan tudi vpliv velikosti karbidov. (Pri temperaturi kaljenja 1180°C na sliki 27 nismo upoštevali velikosti avstenitnega zrna, ker nismo imeli o tem podatkov.) Pri upoštevanju vseh glavnih vplivov (na slikah 27 in 28) je enačba množične regresije popolnoma linearna, čeprav smo po programu računali regresijsko enačbo četrte stopnje. Znano je, da udarni

žilavostni preizkus ni posebno primeren za preizkušanje žilavosti trdih orodnih jekel. To potrjuje tudi veliko razsipanje rezultatov. Pri nadaljnjih raziskavah bomo uvedli metodo statičnega upogiba in zvoja. O vplivu velikosti karbidov in velikosti avstenitnega zrna na žilavost lahko po teh rezultatih zaključimo sledeče:

— grobi karbidi povprečnega premera nad 10 mikronov pomembno zmanjšujejo žilavost orodja,

— nižja temperatura kaljenja omogoča povprečno boljšo žilavost. Ta vpliv pa pride do izraza tem bolj, čim bolj so karbidi fini. Pri grobih in srednjih karbidih je vpliv temperature kaljenja na žilavost statistično nepomemben oz. negotov, kolikor razlika temperature kaljenja ni večja od 20°C.

— Pri velikosti karbidov pod 9 mikronov smo ugotovili razlike žilavosti pod vplivom velikosti karbidov samo pri nižji temperaturi kaljenja. Splošno velja ugotovitev, da je vpliv velikosti karbidov na žilavost toliko močnejši, kolikor je nižja temperatura kaljenja v okviru normalnega temperaturnega območja.

ZAKLJUČKI

Raziskava je dala precej zanimivih, praktično pomembnih ugotovitev in pomemben prispevek k poznanju problema grobih karbidov v brzoreznem jeklu. Zaključki o posameznih vplivih so bili navedeni že pri posameznih poglavjih, zato v končnih zaključkih ponovno navajamo le najpomembnejše v zgoščeni obliki.

Velikost primarnih karbidov v žarjenem jeklu se pri normalnem kaljenju ne spremeni.

Grobi karbidi v žarjenem jeklu so v neposredni zvezi s pojavom grobih karbidov, grobega in neenakomernega avstenitnega zrna, grobozrnatega preloma in nizke ter neenakomerne trdote v kaljenem stanju.

Brzorezno jeklo s finimi in enakomerno razporejenimi karbidi ima po normalnem kaljenju fino in enakomerno avstenitno zrno ter fino zrnati prelom. Grobi karbidi povzročajo grobo in neenakomerno avstenitno zrno in grob prelom.

Trdota v žarjenem stanju ni odvisna od velikosti karbidov in ne vpliva pomembno na velikost karbidov, trdoto in velikost avstenitnega zrna v kaljenem stanju.

Velikost karbidov ne vpliva pomembno na trdoto osnovne strukture niti v žarjenem niti v kaljenem niti v popuščnem stanju.

Velikost karbidov pomembno vpliva na popuščno obstojnost, na trdoto v popuščnem stanju in na žaroobstojnost jekla.

V žarjenem stanju je sposobnost hladne deformacije in sposobnost vlečenja v veliki meri odvisna od velikosti karbidov.

Velikost karbidov močno vpliva na rezno obstojnost strgarskih nožev. Noži s finimi karbidi imajo precej večjo rezno obstojnost kot noži z grobimi karbidi, kar velja še posebej za kaljenje na zgornji meji uporabnega temperaturnega območja.

Velikost karbidov močno vpliva na žilavost. Ne normalno grobi karbidi zelo občutno zmanjšajo žilavost jekla, medtem ko normalni karbidi ($I_k \geq 5,5$) kljub razlikam v velikosti ne vplivajo pomembno na žilavost. Nižja temperatura kaljenja v splošnem ugodno vpliva na žilavost, vpliv velikosti karbidov pa je toliko močnejši, kolikor nižja je temperatura v mejah normalnega območja kaljenja. Razlike v temperaturi kaljenja zelo pomembno vplivajo na žilavost v primeru finih karbidov. Pri srednjih in grobih karbidih je vpliv temperature kaljenja precej oslavljen.

Za strgarske nože in orodja, pri katerih žilavost nima odločilnega pomena, se priporoča kaljenje z višje temperature v okviru normalnega območja, ker to ugodno vpliva na obstojnost noža.

Vsi ti zaključki kažejo neugodne posledice grobih karbidov v brzoreznem jeklu. To moramo upoštevati tudi pri kritičnem ocenjevanju postopkov toplotne obdelave, s katerimi se lahko odpravi evtektična mreža in izboljša enakomernost porazdelitve karbidov, obenem pa se povzroči nastanek grobih karbidov.

Včasih se nekoliko grobim karbidom ni mogoče izogniti, zato moramo razumno presoditi mejo med škodljivo grobimi karbidi in nekoliko grobimi karbidi, ki še ne povzročajo težav in poslabšanja lastnosti. Po naših izkušnjah predstavlja to mejo $I_k = 5,5$ pri jeklu 6-5-2, pri drugih vrstah pa so karbidi povprečno za pol indeksa bolj grobi.

Celotna raziskava je bila izvršena z velikim številom vzorcev jekla iz iste šarže. Za zaključke in ugotavljanje medsebojnih odvisnosti je to določena prednost, ker je izključen vpliv kemijske sestave in dimenzije. Prav zaradi tega pa zaključkov ni mogoče povsem posplošiti, ampak bo treba še nekatere ugotovitve preveriti z jeklom iz večjega števila različnih šarž in različnih vrst. Pri teh nadaljnjih raziskavah nam bodo opisane odvisnosti in zaključki prav gotovo služili za solidno osnovo in smotrno planiranje potrebnih poizkusov.

Železarna Ravne nadaljuje cikel svojih raziskav na področju karbidov v brzoreznih jeklih z razvojem selektivnega jedkanja in metalografske identifikacije karbidov, z izolacijo karbidov in spektrografsko analizo in z drugimi sodobnimi metodami, pri čemer sodeluje Metalurški inštitut v Ljubljani.

Literatura

1. Hoyle G., E. Ineson, Modification of the ~~crst~~ structure of high-speed steel, JISI, 1959 Nov. str. 254—269.
2. Sukolski P. J., G. Hoyle, The extrusion of high-speed steel sections, JISI, 1959 Nov. str. 270—277.
3. Geller J. A., Instrumentalnije stali, Moskva, Metalurgizdat, 1964, str. 55—57.
4. Geller J. A., V. K. Zablokij, L. S. Kremnev, Termičeskaja obrabotka bistrorežuščej stali dlja uluščanja raspredeljenja karbidov, Metalovedenje i termičeskaja obrabotka metalov (1967) 9, str. 18—23.
5. Gühring A., Einfluss der Karbidensbildung auf die Leistung von Schnellstahlschneidbohrern, Härtereie — Technische Mitteilungen — Ribensahm, Bd 8, Heft 2, str. 9—19.
6. Jerofejev N. A., G. G. Zaharova, Vlijanje karbidnoj neodnorodnosti na vzniknovenje poverhnostnih defektov u sverl iz bistrorežuščih stalej, Metalovedenje i termičeskaja obrabotka metalov (1967) 9, str. 26—30.
7. Gill J. P., «High-Speed Steel, Carbide Segregate and Grain Size», Transactions ASM, Vol. 24 (1936) str. 736.
8. Hargue C. J., J. P. Hammond, C. S. Crouse, The angular-appearing carbides in high-speed tool steels, transactions ASM, Vol. 46 (1954) str. 716—726.
9. Megušar J., J. Sinkovic, Selektivno elektrolitsko jedkanje karbidov Me₂C in MeC v brzoreznem jeklu 6-5-2, Železarski zbornik 1 (1967) 2, str. 91—94.
10. Rodič J., Metode matematične statistike, Železarski zbornik 1 (1967) 2, str. 137—154.
11. Rodič J., J. Rodič, «Brzorezna jekla — I. del, Značilnosti metalografije brzoreznih jekel», Železarski zbornik 1 (1967) 3, str. 177—188.
12. Rodič A., J. Rodič, «Brzorezna jekla — II. del, Velikost karbidov v brzoreznih jeklih pred toplotno obdelavo», Železarski zbornik 2 (1968) 1, str. 1—20.
13. Rodič J., Metode matematične statistike, Zagreb, Metalburo, 1964.

ZUSAMMENFASSUNG

Der dritte Teil des Artikels über die Schnelldrehstähle behandelt den Einfluss der Grösse der Karbide auf die mechanischen und technologischen Eigenschaften des Schnelldrehstahles 6 — 5 — 2 (BRM-2).

Die Autoren haben bei der Untersuchung eine grosse Anzahl von Proben mit verschiedener Karbidgrösse aus Stahl der gleichen Charge und der gleichen Dimension verwendet. Mit diesem Material untersuchten sie systematisch den Einfluss der Karbidgrösse auf die einzelnen Eigenschaften. Das System der Forschungsplanung ermöglichte die statistische Verarbeitung der Resultate und das Testieren der Bedeutsamkeit der Schlüsse. Mittels der Varianzanalyse und der Mengenregression war es möglich, bei der Verarbeitung der Resultate der praktischen Versuche die grundlegenden Gesetze der gegenseitigen Abhängigkeit und der Einflüsse festzustellen. Diese Abhängigkeiten sind für die einzelnen Eigenschaften mit zahlreichen Diagrammen und Nomogrammen dargestellt.

In den Eingangsuntersuchungen sind die gegenseitigen Abhängigkeiten der Karbidgrösse und der Härte im geglähten und der gehärteten Zustände, die Grössen und die Gleichmässigkeiten des Austenitkorns und der Bruchkör-

nung im gehärteten Zustände bearbeitet. Auf Grund dieser Resultate wurde das Material für die Proben bei den folgenden Untersuchungen ausgewählt, so dass alle Versuche mit gleichwertigen Probengruppen mit groben, mittleren und feineren Karbiden durchgeführt wurden.

Das Wichtigste war die Versuchsserie zur Feststellung des Einflusses der Karbidgrösse und der Wärmebehandlung auf die Schneidhaltigkeit der Drehmesser. Die groben Karbide vermindern stark die Messerbeständigkeit besonders bei der günstigsten Wärmebehandlung. Bei den Versuchen wurden gesondert mehrere Kriterien des Messerverschleisses behandelt.

Mit zusätzlichen Versuchen haben die Autoren die Einflüsse auf die Härte des Stahls im geglähten, gehärteten und angelassenen Zustand, auf die Anlassbeständigkeit, auf die mechanischen Eigenschaften beim Ziehen und die Schlagzähigkeit bearbeitet.

Die gesamte Untersuchung führte zu zahlreichen praktisch bedeutsamen Schlüssen, die im Artikel genauer beschrieben sind.

Die groben Karbide wirken schlecht auf fast alle Grundeigenschaften des Schnelldrehstahles ein.

SUMMARY

The third part of paper on high speed tool steels is dealing with influence of carbide size on mechanical and technological characteristics of high speed tool steel 6-5-2 (BRM-2).

Authors have used in their research great number of specimens with different size of carbides. Specimens were made out of steel of the same charge and same dimensions. With this material they have systematically studied influence of carbide size on different characteristics of steel. System of planning of research have enabled the use of statistical treatment of results and testing of significance of results.

By analysis of variance and multiple regression the authors were able to find out the basic laws governing the relations of dependability and influences on the basis of practical tests. These dependabilities have been illustrated for some characteristics by many diagrams and monograms.

In introductional research work were treated relations of carbide grain size and hardness after annealing and

quenching, size and uniformity of austenitic grain and granular structure of fracture after quenching.

On the basis of these results the material was chosen for specimens for further research work so that all the tests were carried out on equal groups of specimens with coarse, medium and fine carbides.

The most important was the series of tests to find out the influence of carbide size and heat treatment on cutting durability of cutting tools. Coarse carbides especially at most suitable heat treatment remarkably cut down the durability of tools. When testing many criterions of durability of cutting tools were studied.

The authors have studied influence of carbides on hardness of steel after annealing, quenching and tempering, influence of carbide size on tempering durability, mechanical properties when drawing and on impact stress. The complex research has lead to number of important facts which are described in detail.

Coarse carbides have very bad influence upon nearly all basic properties of high speed cutting steel.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В третьей части статьи о быстрорежущей стали рассмотрено влияние величины карбидов на механические и технологические свойства быстрорежущей стали марки 6-5-2 (BRM-2).

При исследовании авторы употребили большое количество проб одинаковой величины одного и того же литья стали различной величины карбидов. С этим материалом систематически испытано влияние величины карбидов на отдельные свойства стали. Систем планировки испытания разрешила статистическое рассмотрение результатов и анализ важных заключений.

При помощи анализа дисперсии и массовой регрессии получена возможность при рассмотрении результатов практического исследования определить основные закономерности взаимозависимости влияний. Эти зависимости на отдельные свойства стали приказаны целым рядом диаграмм и номограмм.

В начале исследована зависимость величины карбидов от твердости стали в состоянии отжига и закалки, величина и равномерность аустенитного зерна и зернистость перелома в состо-

янии закалки. На основании полученных результатов выбран материал для проб последующих испытаний. Таким образом испытание выполнено на пробах собранных в однородные группы с грубыми, средними и мелкими карбидами.

Самое важное представляла серия исследований влияния величины карбидов и термической обработки на устойчивость токарных ножей. Грубые карбиды, несмотря на самый подходящий режим терм-ой обработки резко уменьшают стойкость ножей. При этом испытании рассмотрено несколько критерии износа ножей.

Авторы также рассмотрели влияния на твердость стали в состоянии отжига, закалки и отпуска, влияние на устойчивость в состоянии отпуска, на механические свойства при волочении и на ударную вязкость.

Совокупное исследование привело до многочисленных в практике важных выводов которые в статье подробно описаны.

Грубо зернистые карбиды влияют почти на все основные свойства быстрорежущей стали отрицательно.