

Vpliv toplotne obdelave na žilavost brzoreznih jekel

Na trdoto, žilavost in druge lastnosti brzoreznih jekel močno vpliva toplotna obdelava. V članku je opisana obširna raziskava udarne upogibne žilavosti različno toplotno obdelanih brzoreznih jekel. Rezultati meritev so bili obdelani s statistično analizo porazdelitve regresije in variance ter s pomočjo elektronskega računalnika. Za merjenje udarne upogibne žilavosti je bila uporabljena metoda, pri kateri se uporabljajo probe z oslabitvijo. Rezultati analize variance so pokazali, da je metoda dovolj zanesljiva glede na ločevalno sposobnost brzoreznih jekel že pri 15 paralelkah.

Statistična obdelava pri meritvah dobljenih podatkov je pokazala

— da je za dobro žilavost brzoreznih jekel važna predvsem temperatura kaljenja in manj temperatura popuščanja in

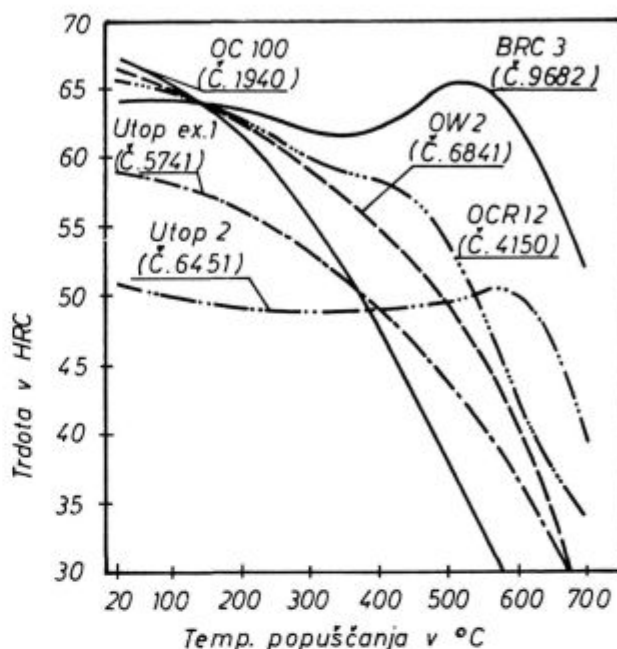
— da ima pri najvišjih doseženih trdotah in pri trdotah od 64–65 HRC v primerjavi z drugimi brzoreznimi jekli najvišjo žilavost molibdenovo jeklo BRM-2 (S 6-5-2).

V članku so v obliki tabel in nomogramov prikazane odvisnosti žilavosti važnejših brzoreznih jekel od temperature kaljenja in popuščanja ter zveze med trdoto, žilavostjo in magnetnimi meritvami.

UVOD

Orodja iz brzoreznega jekla lahko uporabljamo za obdelavo pri velikih hitrostih rezanja, zato ker obdržijo svojo trdoto in odpornost na obrabo v širokem temperaturnem območju segrevanja orodja med obdelavo. Med obdelavo lahko temperatura naraste celo do slabo rdečega žara (600°C) in pri tem trdota ne pade pod vrednost, ki je potrebna za rezanje. Na sliki 1 je prikazana popuščna obstojnost brzoreznih jekel v primerjavi z drugimi orodnimi jekli. Značilna lastnost brzoreznih jekel je prav pojav sekundarne trdote.

Za praktično uporabo brzoreznih jekel ni važna samo trdota, obstojnost proti obrabi in sposobnost rezanja, temveč tudi udarna žilavost, ki je pri brzoreznih jeklih v primerjavi z drugimi vrstami jekla zelo nizka in je ravno zato toliko bolj pomembna.



Slika 1
Popuščna obstojnost brzoreznih jekel v primerjavi z drugimi orodnimi jekli

S pomočjo laboratorijskih poizkusov smo naredili primerjavo med udarno upogibno žilavostjo, trdoto in magnetno meritvijo brzoreznih jekel in ugotavljali vpliv toplotne obdelave na žilavost teh jekel.

VSEBINA IN POTEK LABORATORIJSKIH POSKUSOV

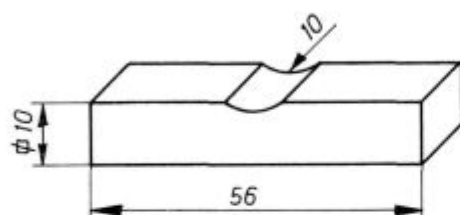
Navadni Charpyjev poskus upogibne udarne žilavosti z normalno zarezo (DVM) ima pri orodnih jeklih majhno sposobnost ločenja, če pa vzamemo probe brez zareze, dobimo zelo veliko trosenje rezultatov. Pri preizkušanju trdega orodnega jekla z žilavostjo 2–9 kpm/cm² je za gotovost 99 % potrebnih 30 do 40 paralelek^{2,3}. V obratni praksi udarni upogibni poskus z normalno zarezo proba ali nezarezo proba ni zadovoljiv za orodna jekla, ker zahteva preveč prob.

V ZDA so začeli preizkušati orodna jekla s probami, ki imajo le zelo plitvo in milo zarezo, tako da ni velikih koncentracij napetosti⁴. To metodo smo pričeli uvajati tudi v Železarni Ravne. Pri

* Opomba: Članek predstavlja povzetek praktičnega dela diplomske naloge avtorja.

naših poskusih smo delali s 15 paralelkami. Dimenzije prob kaže slika 2.

Za vsako vrsto jekla smo izbrali samo eno šaržo in enotno dimenzijo kv. 15 mm.



Slika 2

Proba z oslavitvijo za preizkus udarne upogibne žilavosti

Kemijsko sestavo preizkušenih šarž kaže tabela 1.

Tabela 1

Vrsta jekla	C	Mn	Cr	Si	W	V	Ni	Co	Mo	S
BRC-3 (C.9682)	0,71	0,20	4,30	0,24	18,0	1,54	—	9,8	0,75	0,029
BRC (C.6980)	0,73	0,21	4,32	0,44	18,8	0,99	—	4,8	1,0	0,018
BRW-2 (C.6882)	0,90	0,43	3,75	0,60	12,3	2,25	—	—	0,68	0,019
BRW (C.6880)	0,75	0,36	4,45	0,42	17,0	1,44	—	—	—	0,019
BRM-2 (C.7680)	0,87	0,38	4,25	0,17	6,5	2,05	—	—	5,3	0,018
BRU (C.9683)	1,21	0,33	4,25	0,36	10,5	3,5	0,28	10,3	3,7	0,008

Pri vzorcih jekla BRW-2 silicij in mangan nista v predpisanih mejah, zato so vsi zaključki v zvezi z BRW-2 le orientacijski in jih ni mogoče splošiti. Vsa uporabljena jekla so bila skovana iz ingota teže 250 kg in žarjena pri predpisanih temperaturah.

Za vsako vrsto jekla smo izbrali tri temperature kaljenja, in to tiste, ki pridejo za določeno jeklo najbolj v poštev. Izjema je le BRM-2, pri kateri smo izbrali štiri kalilne temperature zaradi posebne interesantnosti tega jekla v širšem območju temperatur kaljenja. Vsako jeklo, kaljeno pri določeni temperaturi, smo popuščali pri treh popuščnih temperaturah, ki so za vse vrste jekla in tudi za vse temperature kaljenja enake (tabela 2).

Probe smo zbrusili na končno dimenzijo in jih predgrevali na temperaturi 400–450°C in 850 do 880°C. Pri predgrevanju na 400–450°C smo držali

probe v peči 45 minut, pri predgrevanju na 850 do 880°C pa 30 minut. Vse vrste jekla razen BRM-2 smo držali v solni kopeli na temperaturi kaljenja 2 minuti. BRM-2 smo držali na temperaturi kaljenja 1 min. 50 sek. Po segretju na kalilno temperaturo smo ohlajali probe v termalni kopeli s temperaturo 520°C (ca. 5 min.), nato pa na zraku do normalne temperature. Kaljene probe smo popuščali pri 530°C, 560°C in 590°C, tako da so bile probe, kaljene pri določeni temperaturi, popuščane pri treh različnih temperaturah. Čas popuščanja je bil za vse probe enak, in sicer 2-krat 1 uro z vmesnim ohlajanjem na normalno temperaturo, ki je trajalo najmanj 1 uro. Druga temperatura popuščanja je bila za 10°C nižja od prve.

Pri magnetni meritvi zaostalega avstenita nismo dobili absolutnih vrednosti, temveč le relativne, ki povedo, da je pri večjih odčitkih več zaostalega avstenita, pri manjših odčitkih pa manj. Nekatere magnetne meritve smo »umerili« na zaostali avstenit z rentgensko strukturno analizo.

REZULTATI IN DISKUSIJA

Vse podatke meritev žilavosti, trdote in vsebnosti zaostalega avstenita z magnetno metodo smo obdelali z analizo porazdelitve, regresije in variance na elektronskem računalniku.

Rezultati analize porazdelitve žilavosti in trdot so vpisani v tabeli 3 in narisani na slikah od 3 do 8. Že na prvi pogled opazimo pri vseh brzoreznih jeklih nizke žilavosti in veliko trosenje. Najvišje žilavosti dosegajo BRM-2, BRC in BRW, najnižjo udarno žilavost pa ima BRC-3, ki doseže v najboljšem primeru 0,49 kpm/cm². Opazimo še določeno grupiranje po temperaturah kaljenja. Trosenje je skoraj v vseh primerih večje pri višji žilavosti.

Srednje vrednosti ($\bar{x}$) in standardne odklone (s), ki smo jih dobili z analizo porazdelitve in so vpisani v tabeli 3, smo uporabili za primerjavo med različnimi vrstami brzoreznih jekel. Če pregledamo tabele, bomo videli, da so skoraj pri vseh vrstah jekel in variantah toplotne obdelave trdote dovolj visoke, to je nad 63 HRC.

Tabela 2

Temp. kaljenja	1170° C			1200° C			1230° C			1260° C			1290° C			1320° C		
Temp. pop. (°C)	530	560	590	530	560	590	530	560	590	530	560	590	530	560	590	530	560	590
BRC-3										15	15	15	15	15	15	15	15	15
BRC										15	15	15	15	15	15	15	15	15
BRM-2							15	15	15	15	15	15	15	15	15			
BRW							15	15	15	15	15	15	15	15	15			
BRW-2	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15						
BRU				15	15	15	15	15	15	15	15	15						

Ta trdota se v praksi navadno jemlje kot spodnja meja trdot brzoreznih jekel za strgarske nože. Zanimive so najvišje dosežene trdote in primerjava žilavosti pri teh trdotah, vendar pa je za praktično uporabo bolj važna žilavost pri trdotah od 63 do 65 HRC, ker se orodja z višjo trdoto težko brusijo in imajo razmeroma majhno

žilavost. Z analizo variance smo medsebojno primerjali žilavosti pri najvišjih trdotah in pri trdotah od 64,1 do 65,0 HRC ter iskali pomembnost razlik med posameznimi rezultati.

S pomočjo tabele 4 smo razdelili trdote v razrede, ki so tudi vpisani v tabeli 3.

Tabela 3 a

BRC-3	Temp. kaljenja		1260° C			1290° C			1320° C		
	Temp. popuščanja		530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C
	Trdota po popuščanju (HRC)	$\bar{x}$	67,4	67,0	65,4	67,3	67,2	65,7	66,7	66,8	65,4
		s	0,21	0,31	0,23	0,32	0,26	0,26	0,33	0,32	0,31
		V	0,3 %	0,5 %	0,4 %	0,5 %	0,4 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %
	n = 14	Razr. trd.	1	2	3	1	1	3	2	2	3
	Žilavost po popuščanju	$\bar{x}$	0,33	0,36	0,49	0,25	0,29	0,44	0,24	0,27	0,32
s		0,06	0,07	0,11	0,09	0,09	0,07	0,04	0,05	0,11	
V		18,2 %	19,4 %	22,6 %	34,6 %	29,3 %	15,9 %	15,5 %	17,1 %	33,1 %	
BRC	Temp. kaljenja		1260° C			1290° C			1320° C		
	Temp. popuščanja		530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C
	Trdota po popuščanju (HRC)	$\bar{x}$	64,4	63,5	62,5	64,5	63,4	62,1	64,8	64,1	63,1
		s	0,29	0,65	0,93	0,57	0,50	0,33	0,30	0,39	0,31
		V	0,5 %	1,0 %	1,5 %	0,9 %	0,8 %	0,5 %	0,5 %	0,60 %	0,5 %
	n = 14	Razr. trd.	4	5	6	4	5	6	4	4	5
	Žilavost po popuščanju	$\bar{x}$	0,70	0,88	1,01	0,63	0,89	1,00	0,47	0,48	0,51
s		0,12	0,25	0,31	0,12	0,22	0,22	0,08	0,10	0,09	
V		17,3 %	28,6 %	30,6 %	18,7 %	25,2 %	21,8 %	16,7 %	21,6 %	18,1 %	
BRW	Temp. kaljenja		1230° C			1260° C			1290° C		
	Temp. popuščanja		530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C
	Trdota po popuščanju (HRC)	$\bar{x}$	63,8	64,1	63,3	64,4	64,9	64,1	64,1	64,5	63,9
		s	0,46	0,36	0,33	0,40	0,71	0,27	0,50	0,54	0,31
		V	0,7 %	0,6 %	0,5 %	0,6 %	1,1 %	0,4 %	0,8 %	0,8 %	0,5 %
	n = 14	Razr. trd.	5	4	5	4	4	4	4	4	5
	Žilavost po popuščanju	$\bar{x}$	0,95	0,91	1,24	1,02	0,92	0,85	0,66	0,54	0,61
s		0,11	0,10	0,15	0,10	0,11	0,12	0,05	0,08	0,09	
V		12,0 %	11,4 %	11,9 %	10,2 %	12,4 %	13,6 %	7,2 %	14,2 %	14,5 %	
BRW.2	Temp. kaljenja		1230° C			1260° C			1290° C		
	Temp. popuščanja		530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C	530° C	560° C	590°C
	Trdota po popuščanju (HRC)	$\bar{x}$	64,2	64,7	63,6	64,4	64,8	64,0	64,6	65,3	65,1
		s	0,26	0,67	0,42	0,39	0,50	0,54	0,34	0,38	0,31
		V	0,40 %	1,0 %	0,7 %	0,6 %	0,8 %	0,8 %	0,5 %	0,6 %	0,5 %
	n = 14	Razr. trd.	4	4	5	4	4	5	4	3	3
	Žilavost po popuščanju	$\bar{x}$	0,97	0,92	0,99	0,86	0,74	0,76	0,57	0,54	0,59
s		0,17	0,10	0,14	0,08	0,10	0,13	0,09	0,09	0,11	
V		17,8 %	11,3 %	13,6 %	9,3 %	13,4 %	17,4 %	16,1 %	16,9 %	17,9 %	

Tabela 3 b

BRM-2	Temp. kaljenja		1170° C			1200° C			1230° C		
	Temp. popuščanja		530° C	560° C	590° C	530° C	560° C	590° C	530° C	560° C	590° C
	Trdota po popuščanju (HRC)	$\bar{x}$	63,9	63,3	62,3	64,1	63,4	62,5	65,1	64,7	63,7
		s	0,21	0,46	0,33	0,29	0,33	0,24	0,18	0,32	0,46
		V	0,3 %	0,7 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,4 %	0,3 %	0,5 %	0,7 %
	n = 14	Razr. trd.	5	5	6	4	5	6	3	4	5
	Žilavost po popuščanju	$\bar{x}$	1,44	1,46	1,46	1,26	1,32	1,53	0,95	0,83	0,85
s		0,18	0,16	0,21	0,12	0,10	0,19	0,14	0,25	0,12	
V		12,4 %	10,7 %	14,2 %	9,6 %	7,8 %	12,6 %	15,0 %	30,3 %	14,4 %	
n = 14											
BRU	Temp. kaljenja		1200° C			1230° C			1260° C		
	Temp. popuščanja		530° C	560° C	590° C	530° C	560° C	590° C	530° C	560° C	590° C
	Trdota po popuščanju (HRC)	$\bar{x}$	66,4	65,5	64,0	66,9	65,8	64,4	66,8	65,9	65,0
		s	0,21	0,31	0,34	0,23	0,32	0,23	0,49	0,31	0,39
		V	0,3 %	0,5 %	0,5 %	0,4 %	0,5 %	0,4 %	0,7 %	0,5 %	0,6 %
	n = 14	Razr. trd.	2	3	5	2	3	4	2	3	4
	Žilavost po popuščanju	$\bar{x}$	0,42	0,76	0,97	0,44	0,59	0,74	0,36	0,49	0,47
s		0,57	0,13	0,14	0,06	0,11	0,15	0,10	0,07	0,08	
V		1,35 %	16,5 %	14,6 %	14,6 %	17,9 %	19,7 %	27,7 %	14,3 %	16,9 %	
n = 14											

Tabela 4

Trdota HRC	Razred trdot
nad 67,1	1
66,1—67,0	2
65,1—66,0	3
64,6—65,0	4 a
64,1—64,5	4 b
63,1—64,0	5
62,1—63,0	6
61,1—62,0	7
60,1—61,0	8
pod 60	9

Ko smo primerjali med sabo žilavosti pri najvišjih trdotah, smo iz vsake vrste jekla izbrali tiste variante toplotne obdelave, ki dajo najvišje trdote. Če je doseglo več variant najvišji razred trdot, smo za analizo variance uporabili vse. Tako smo na primer pri BRU primerjali žilavosti pri treh različnih toplotnih obdelavah, ki so za to jeklo dale najvišje trdote (2. razred trdot). Srednje vrednosti udarne žilavosti in standardne odklone pri omenjenih najvišjih trdotah smo vpisali v tabelo 5. Posamezne vrste jekel z določeno toplotno obdelavo smo oštevilčili in jih z analizo variance primerjali po načelu vsak z vsakim.

V tabeli 6 so udarne upogibne žilavosti pri najvišjih trdotah vpisane po velikosti. Najvišjo žilavost ima BRW (1260 + 530° C). Ta pa se nepomembno razlikuje od žilavosti BRM-2 (1230 + 530° C). Z analizo variance smo ugotovili, da se

od prve najvišje udarne žilavosti pomembno razlikuje šele tretja, to je žilavost BRW, kaljenega pri 1260° C in popuščanega pri 560° C. Za vsako srednjo vrednost udarne žilavosti ($\bar{x}$) smo iskali prvo nižjo srednjo vrednost, ki se pomembno razlikuje od nje, kajti vse ostale nižje vrednosti se od nje tudi pomembno razlikujejo. V tabeli 6 so grafično prikazane prve pomembne razlike glede na nižje vrednosti. Dobili smo značilne stopnice, na osnovi katerih smo poiskali vrstni red srednjih vrednosti po statistični pomembnosti razlik. Posamezne srednje vrednosti udarne žilavosti pa lahko še grupiramo po rangih, ki lahko služijo za kvantitativno analizo regresij. Rangov je toliko kot primerjalnih vrednosti. V posamezni rang lahko pridejo vse tiste srednje vrednosti, ki se med seboj nepomembno razlikujejo. Tako si prvo in drugo mesto delita BRW (1260 + 530° C) in BRM-2 (1230 + 560° C), katerih srednje vrednosti udarne žilavosti se med seboj nepomembno razlikujeta in prideta zato oba v rang 1,5. Od prvih dveh, ki se po žilavosti nepomembno razlikujeta, pa ima BRM-2 višjo trdoto kot BRW. Najslabšo žilavost pri najvišjih doseženih trdotah imata BRC-3 in BRU. Kadar bomo torej posamezno vrsto jekla toplotno obdelovali na najvišje trdote, lahko pri BRM-2 in BRW pričakujemo najvišje, pri BRC-3 in BRU pa najnižje žilavosti.

Za praktično uporabo brzoreznih jekel je veliko važnejša primerjava žilavosti pri trdotah 64,1 do 65 HRC. Od vseh vrst jekel so vpisane v tabelo 7 udarne žilavosti pri tisti toplotni obdelavi, ki doseže 4. razred trdot, to so trdote od 64,1 do

Tabela 5: Primerjava udarne žilavosti pri najvišjih trdotah

n = 14						
	BRC-3	BRC	BRW-2	BRW	BRM-2	BRU
Zaporedna številka	1	4	6	8	11	13
$\bar{x}$	0,33	0,63	0,54	0,92	0,95	0,42
s	0,06	0,12	0,09	0,11	0,14	0,57
Toplotna obdel. in trdotni razred	1260 + 530° C 1	1290 + 530° C 4 b	1290 + 560° C 3	1260 + 560° C 4 a	1230 + 530° C 3	1200 + 530° C 2
Zaporedna številka	2	5	7	9	12	14
$\bar{x}$	0,25	0,47	0,59	0,85	0,83	0,44
s	0,09	0,08	0,11	0,12	0,25	0,06
Toplotna obdel. in trdotni razred	1290 + 530° C 1	1320 + 530° C 4 a	1290 + 590° C	1260 + 590° C 4 a	1320 + 560° C 4 b	1230 + 530° C 2
Zaporedna številka	3			10		15
$\bar{x}$	0,29			1,02		0,36
s	0,09			0,10		0,10
Toplotna obdel. in trdotni razred	1290 + 560° C 1			1260 + 530° C 4 a		1260 + 530° C 2

Tabela 6: Zaporedje po velikosti rezultatov žilavosti pri najvišjih trdotah

Vrstni red rezultatov	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rezultati $\bar{x}$	1 02	0 95	0 92	0 85	0 83	0 63	0 59	0 54	0 47	0 44	0 42	0 36	0 33	0 29	0 25
Stanje* po oznakah v izračunu računalnika	10	11	8	9	12	4	7	6	5	14	13	15	1	3	2
Pomembnost razlik $\geq 95\%$ v srednjih vrednostih $\bar{x}$ EV-enaki varianci RV-različni varianci															
Vrstni red po statistični pomembnosti razlik $\bar{x}$	1-2	1-2	3-5	3-5	3-5	5-7	5-7	8	9-11	9-11	9-11	12-14	12-14	12-14	15
Rangi po pomembnosti razlik	1,5	1,5	4	4	4	6,5	6,5	8	10	10	10	13	13	13	15
Vrsta jekla	BRW	BRM-2	BRW	BRW	BRM-2	BRC	BRW-2	BRW-2	BRC	BRU	BRU	BRU	BRC-3	BRC-3	BRC-3
Temp. (°C) : kaljenja	1260	1230	1260	1260	1230	1290	1290	1290	1320	1230	1200	1260	1260	1290	1290
popuščanja	530	530	560	590	560	530	590	560	530	530	530	530	530	560	530

Tabela 7: Primerjava udarne žilavosti pri trdoti 64,1—65,0 HRC

n = 14

	BRC-3	BRC	BRW-2	BRW	BRM-2	BRU
Zaporedna številka	1	4	8	13	19	23
$\bar{x}$	0,49	0,70	0,97	0,91	1,26	0,74
s	0,11	0,12	0,17	0,10	0,12	0,15
Toplotna obdelava	1260 + 590° C	1260 + 530° C	1230 + 530° C	1230 + 560° C	1200 + 530° C	1230 + 590° C
Zaporedna številka	2	5	9	14	20	24
$\bar{x}$	0,44	0,63	0,92	1,02	0,83	0,47
s	0,07	0,12	0,10	0,10	0,25	0,08
Toplotna obdelava	1290 + 590° C	1290 + 530° C	1230 + 560° C	1260 + 530° C	1230 + 560° C	1260 + 590° C
Zaporedna številka	3	6	10	15	21	
$\bar{x}$	0,32	0,47	0,86	0,92	0,68	
s	0,11	0,08	0,08	0,11	0,14	
Toplotna obdelava	1320 + 590° C	1320 + 530° C	1260 + 530° C	1260 + 560° C	1260 + 530° C	
Zaporedna številka	1320 + 560° C	7	11	16	22	
$\bar{x}$		0,48	0,74	0,85	0,65	
s		0,10	0,10	0,12	0,07	
Toplotna obdelava			1260 + 560° C	1260 + 590° C	1260 + 560° C	
Zaporedna številka			12	17		
$\bar{x}$			0,57	0,66		
s			0,09	0,05		
Toplotna obdelava			1290 + 530° C	1290 + 530° C		
Zaporedna številka				18		
$\bar{x}$				0,54		
s				0,08		
Toplotna obdelava				1290 + 560° C		

65 HRC (po tabeli 4). Tudi to tabelo smo obdelali z analizo variance po načelu vsak z vsakim, kar pomeni 276 kombinacij. Srednje vrednosti žilavosti so v tabeli 8.

Pri vsaki srednji vrednosti žilavosti smo iskali prvo nižjo srednjo vrednost, ki se pomembno razlikuje od nje. Pomembnost razlike med srednjimi vrednostmi je večja kot 95 % in je odvisna od difference srednjih vrednosti, standardnega odklona ter števila podatkov.

Srednje vrednosti, ločene po statistični pomembnosti razlik, si delijo mesto, tako da jih pride več v isti rang. V najvišjem je samo BRM-2, kaljen pri 1200° C in popuščan pri 530° C. Drugo in tretje mesto si delita BRW in BRW-2 in prideta torej v rang 2,5. Najnižje žilavosti doseže BRC-3, kaljen pri 1320° C in popuščan pri 560° C.

V tabeli 8 lahko najdemo za posamezno vrsto brzoreznih jekel najboljšo toplotno obdelavo za najvišjo žilavost pri trdoti 64,1 do 65,0 HRC.

Vse variante toplotne obdelave, ki dajo za posamezne vrste jekel najvišje trdote in najvišje žilavosti pri trdotah 64,1 do 65,0 HRC, so vpisane v tabelo 9.

Rezultati analize variance v tabelah 6 in 8 kažejo, da je metoda merjenja udarne upogibne žilavosti z oslabitvijo dovolj zanesljiva že pri 15 paralelkah, kar je za več kot polovico manj od tistih, ki jih zahteva metoda brez zareze ali oslabitve. Na 95 % in večjem nivoju gotovosti lahko ločimo žilavosti, ki jih dobimo z različno toplotno obdelavo določenega brzoreznega jekla.

Nomogrami na slikah 9 do 12 kažejo odvisnost udarne žilavosti od temperature kaljenja in popuščanja.

Toplotna obdelava ima največji vpliv na udarno žilavost pri BRC in BRM-2 (to nam pove koeficient determinacije R^2), medtem ko pri BRW-2 in pri BRU nima pomembnega vpliva ob danih omejitvah

Tabela 8: Zaporedje po velikosti rezultatov žilavosti pri trdotah 64,1–65 HRC

Vrstni red rezultatov	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Rezultati $\bar{x}$	1,26	1,02	0,97	0,92	0,91	0,91	0,86	0,85	0,83	0,74	0,74	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,57	0,54	0,49	0,48	0,47	0,47	0,44	0,32	
Stanje po oznakah v izračunu računalnika	19	14	8	9	15	13	10	16	20	23	11	4	21	17	22	5	12	18	1	7	24	6	2	3	
95 % in večja pomembnost razlik v srednjih vrednostih $\bar{x}$																									
EV - enaki varianci RV - različni varianci																									
Vrstni red po statistični pomembnosti razlik $\bar{x}$	1	2-3	2-3	4-9	4-9	4-9	4-9	4-9	4-9	10-15	10-15	10-15	10-15	10-15	10-15	16-17	16-17	18-19	18-19	20-23	20-23	20-23	20-23	24	
Rangi po pomembnosti razlik	1	2,5	2,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,7	6,7	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	16,5	16,5	18,5	18,5	21,5	21,5	21,5	21,5	24	
Vrsta jekla	BRM-2	BRW	BRW-2	BRW-2	BRW	BRW	BRW-2	BRW	BRM-2	BRU	BRW-2	BRC	BRM-2	BRW	BRM-2	BRC	BRW-2	BRW	BRC-3	BRC	BRU	BRC	BRC-3	BRC-3	
Temp. (°C): kaljenje popuščanje	1200 530	1260 530	1230 530	1230 560	1260 560	1230 560	1260 530	1260 590	1230 560	1230 590	1260 560	1260 530	1260 530	1290 530	1260 560	1290 530	1290 560	1290 530	1290 560	1260 590	1320 560	1260 590	1320 530	1290 590	1320 560

Tabela 9

	BRC-3	BRC	BRW-2	BRW	BRW-2	BRU
Toplotna obdelava za najvišje trdote (°C)	1260 + 530 1290 + 530 1290 + 560	1290 + 530 1320 + 530	1290 + 560 1290 + 590	1260 + 560 1290 + 560	1230 + 530	1200 + 530 1230 + 530 1260 + 530
Dosežene trdote (HRC)	nad 67	64,5	nad 65	64,5	65,1	nad 66
Toplotna obdelava za trdoto 64–65 HRC in najvišje žilavosti (°C)	1260 + 590	1260 + 530	1230 + 530	1260 + 530	1200 + 530	1230 + 590
Dosežene žilavosti (kpm/cm ²) rang	0,49 18,5	0,70 12,5	0,97 2,5	1,02 2,5	1,26 1	0,74 12,5

preizkušanja. Pri BRC-3, BRM-2 in BRW je pri danih omejitvah udarna žilavost tem manjša, čim višja je temperatura kaljenja. Pri BRC (slika 10) doseže udarna žilavost največjo vrednost pri 1280 do 1300°C. V mejah preizkušanja temperatura popuščanja ne vpliva pomembno na žilavost BRW in BRM-2.

Udarne žilavost brzoreznih jekel BRC, BRC-3, BRM-2 in BRW je predvsem odvisna od kaljenja in ne od popuščanja. To je posebno izrazito pri BRM-2 in BRW, kjer temperatura popuščanja nima praktično nobenega vpliva na žilavost. Ta ugotovitev, ki je bila že večkrat praktično potrjena, pomeni, da moramo za visoko žilavost posebno paziti na najbolj primerno temperaturo kaljenja, za visoko trdoto pa predvsem na temperaturo popuščanja. Metalografski pregledi, ki smo jih

izvršili na vseh preiskovanih jeklih, so potrdili dejstvo⁵, da ima brzorezno jeklo s finejšim zrnem višjo žilavost od tistih, ki imajo bolj grobega. Kako se večja zrno s temperaturo kaljenja, kaže slika 13.

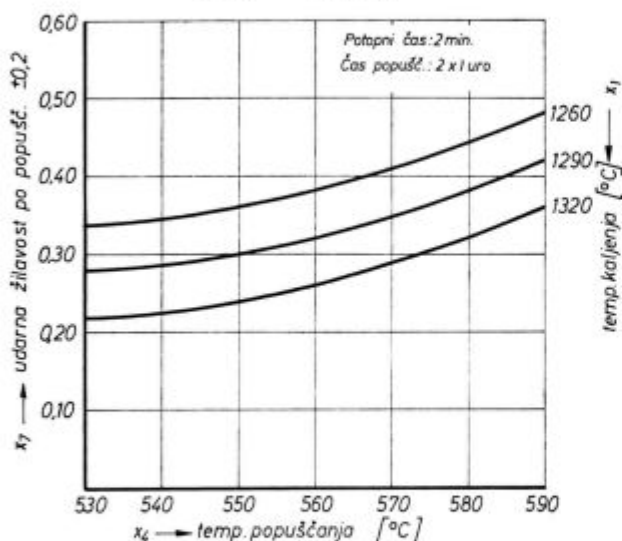
V praksi je pomemben odnos žilavosti in trdote, saj hočemo večkrat vedeti, kakšna bo žilavost, če bo trdota večja in obratno. To odvisnost smo povezali še z magnetnimi meritvami in dobili nomograme, ki jih kažejo slike 14 do 17. S pomočjo elektronskega računalnika smo iskali obravnavano zvezo za vse vrste jekel, ki smo jih preizkušali. Za BRW-2 in BRU smo pri izbranem kriteriju dobili koeficient determinacije $R^2 = 0$, to pa pomeni, da vse variacije udarne žilavosti ostanejo nepojasnjene in jih pripisujemo drugim vplivnim faktorjem. Največ ugotovljenih variacij udarne

BRC 3

$$x_7 = f(x_1, x_4)$$

$$R^2 = 0,47 \quad R = 0,69$$

$$\Delta = 5 \quad S_y = 0,08$$



Slika 9

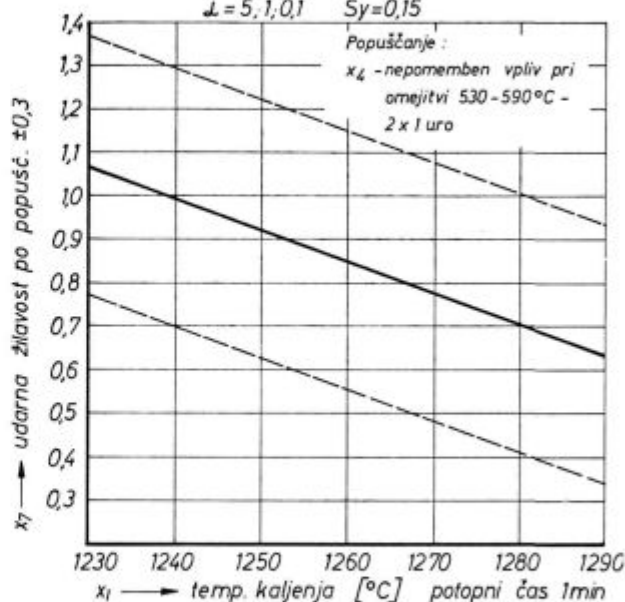
Udarne žilavost v odvisnosti od temperature kaljenja in popuščenja

BRW

$$x_7 = f(x_1, x_4)$$

$$R^2 = 0,57 \quad R = 0,76$$

$$\Delta = 5,1; 0,1 \quad S_y = 0,15$$



Slika 11

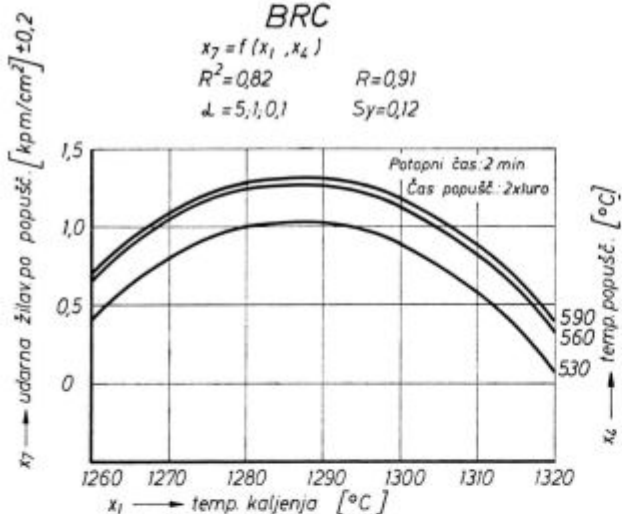
Udarne žilavost v odvisnosti od temperature kaljenja in popuščenja

BRC

$$x_7 = f(x_1, x_4)$$

$$R^2 = 0,82 \quad R = 0,91$$

$$\Delta = 5,1; 0,1 \quad S_y = 0,12$$



Slika 10

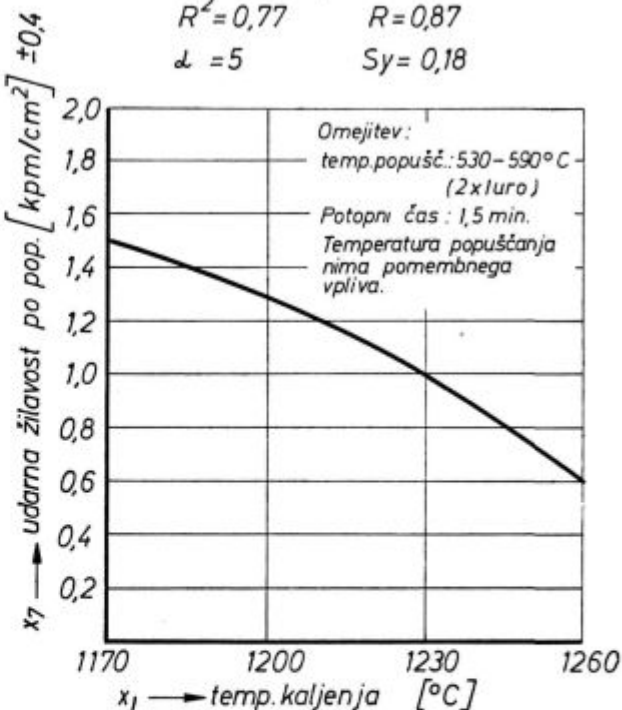
Udarne žilavost v odvisnosti od temperature kaljenja in popuščenja

BRM2

$$x_7 = f(x_1, x_4)$$

$$R^2 = 0,77 \quad R = 0,87$$

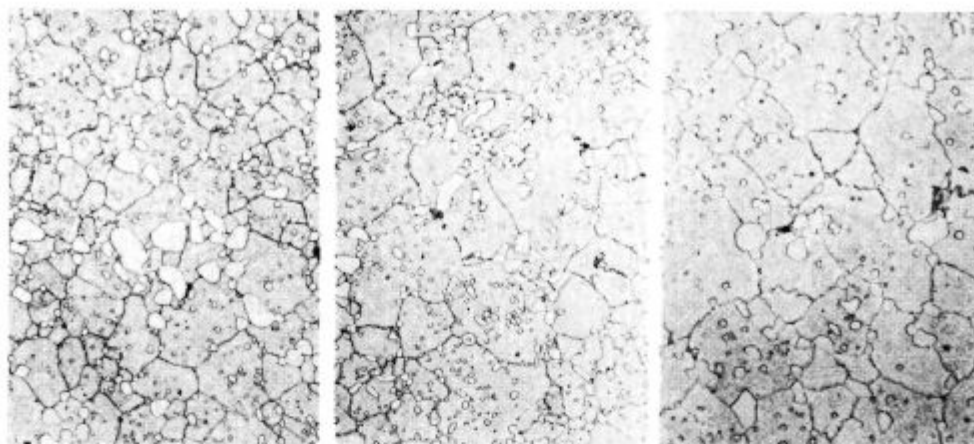
$$\Delta = 5 \quad S_y = 0,18$$



Slika 12

Udarne žilavost v odvisnosti od temperature kaljenja in popuščenja

žilavosti ima BRM-2 (slika 17), kjer je koeficient determinacije $R^2 = 0,55$. Na slikah 14, 15 in 17 vidimo, da sta si udarna žilavost in trdota v obratnem sorazmerju; čim večja je trdota, tem manjša je žilavost in obratno. BRW na sliki 15 pa ima najmanjšo udarno žilavost pri trdoti 64 do 64,5 HRC. Pri BRC in BRW magnetna meritev po popuščenju nima pomembnega vpliva na udarno žilavost in tudi pri ostalih ima zelo majhen vpliv.



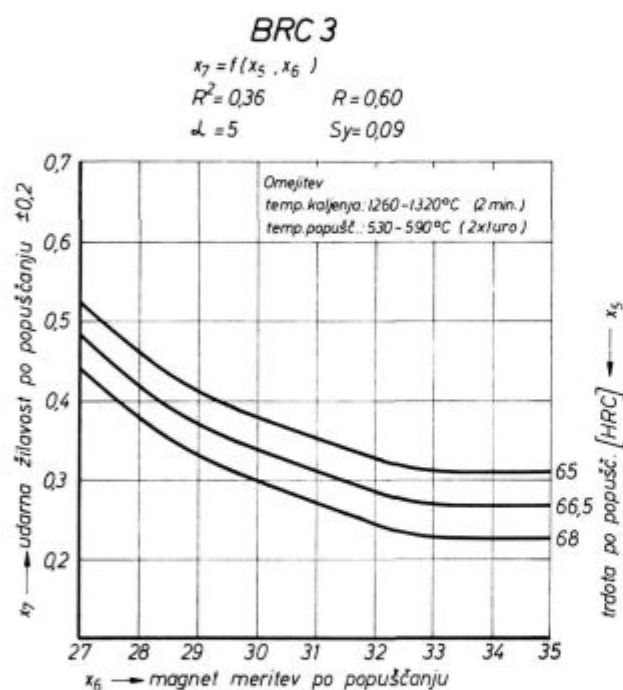
1260°C

1290°C

1320°C

Slika 13

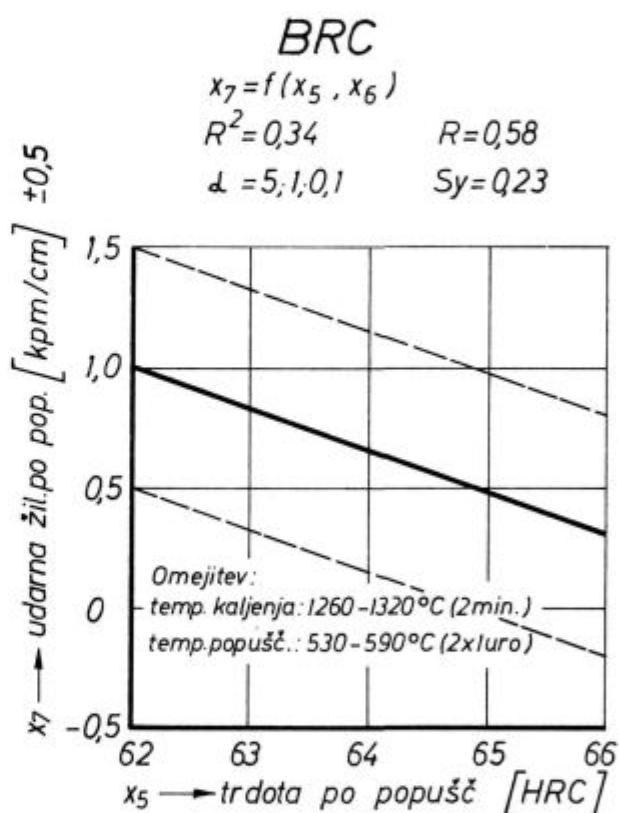
Jeklo BRC-3, kaljeno pri različnih temperaturah
(povečava 500 ×)



Slika 14

Zveze med udarno žilavostjo, trdoto in magnetoskopsko meritvijo po popuščanju

Strugarski noži iz BRM-2 imajo najvišjo rezo obstojnost, takrat, kadar so kaljeni pri 1240°C; 10-krat nižjo pa, če so kaljeni pri 1200°C⁵. Naši poizkusi kažejo, da dobimo najvišjo žilavost (pri trdoti od 64–65 HRC) pri 1200°C, najvišjo trdoto pa pri 1230°C. Za praktično uporabo jekla BRM-2 bo torej zanimivo območje temperature kaljenja od 1200 do 1240°C. Višjo temperaturo kaljenja v omenjenem območju bomo uporabili takrat, kadar bomo želeli imeti visoko trdoto in rezo obstojnost, nižjo pa takrat, kadar bo posebno važna žilavost orodja. Zanimiva ugotovitev v zvezi z BRM-2 je ta, da za to jeklo nismo dobili najvišje



Slika 15

Zveza med udarno žilavostjo, trdoto in magnetno meritvijo po popuščanju

žilavosti pri najnižji temperaturi kaljenja (1170°C), kot je običajno pri drugih orodnih jeklih, temveč pri temperaturah, ki so za 30°C višje od najnižjih preizkušanih.

Avtorji⁵ navajajo, da so dobili pri velikosti avstenitnega zrna od 12 do 16 po Snyder-Graffovi metodi za BRM-2 žilavost od 1,5 do 2,4 kpm/cm². Mi pa smo dobili pri isti velikosti avstenitnega zrna žilavost samo od 1,2 do 1,5 kpm/cm². To lahko

BRW

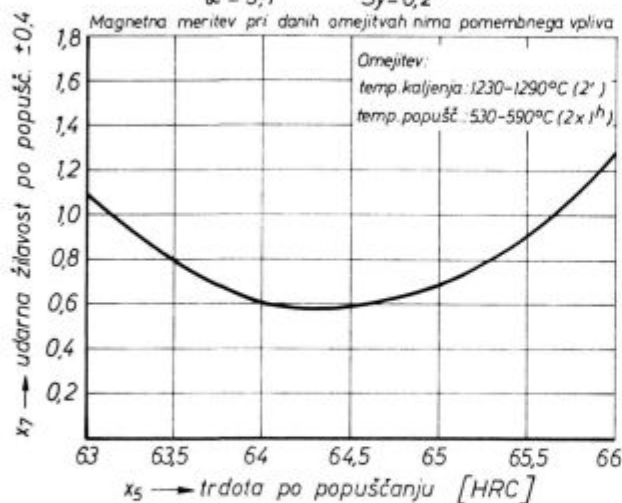
$$x_7 = f(x_5, x_6)$$

$$R^2 = 0,26$$

$$R = 0,51$$

$$\alpha = 5,1$$

$$S_y = 0,2$$



Slika 16

Zveza med udarno žilavostjo, trdoto in magnetoskopsko meritvijo po popuščenju

BRM 2

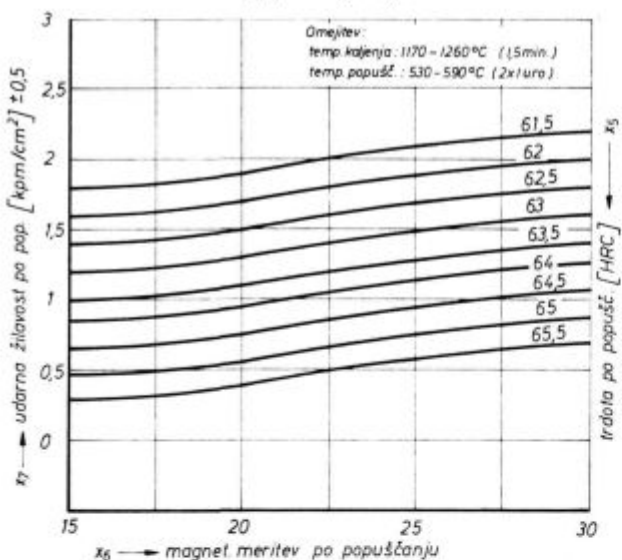
$$x_7 = f(x_5, x_6)$$

$$R^2 = 0,55$$

$$R = 0,74$$

$$\alpha = 5,1, 0,1$$

$$S_y = 0,25$$



Slika 17

Zveza med udarno žilavostjo, trdoto in magnetoskopsko meritvijo po popuščenju

pripisujemo vplivu različne kemijske sestave med posameznimi šaržami in oslavitvam na probah, ki so bile samo brušene, morale pa bi biti tudi polirane. Glede na to, da so bile vse probe izdelane na isti način, so rezultati kljub temu uporabni za primerjavo med posameznimi vrstami brzoreznih jekel in za analizo vpliva toplotne obdelave na udarno upogibno žilavost brzoreznih jekel.

BRC-3 ima najboljšo kombinacijo toplotne obdelave glede na rezo obstojnost pri temperaturi kaljenja 1290°C in temperaturi popuščenja 560°C. Pri isti kombinaciji toplotne obdelave smo dobili trdoto nad 67 HRC. Najvišjo žilavost pa smo dobili pri temperaturi kaljenja 1260°C. Za visoko žilavost bomo torej izbrali nižjo, za visoko trdoto in rezo obstojnost pa visoko temperaturo kaljenja, v območju od 1260 do 1290°C.

ZAKLJUČEK

Na osnovi vseh dosedanjih analiz in primerjav med jekli BRC-3, BRC, BRW-2, BRW, BRM-2 in BRU v območju planiranega preizkušanja lahko zaključimo:

- da je za dobro žilavost važna predvsem temperatura kaljenja in manj temperatura popuščenja,

- da dosežeta najvišje trdote BRC-3 in BRU, najnižje pa BRW in BRM-2, ki pa so še vedno v mejah uporabnosti,

- da imata pri najvišjih trdotah, ki smo jih dobili za posamezna jekla, najvišjo žilavost BRM-2 in BRW, najnižjo pa BRC-3,

- da ima pri trdoti 64 do 65 HRC najvišjo žilavost BRM-2 in nato BRW, najnižjo pa BRC-3,

- da so optimalne temperature kaljenja za BRM-2 glede na žilavost, trdoto in rezo obstojnost v območju od 1200 do 1240°C,

- da so optimalne temperature kaljenja za BRC-3 glede na žilavost, trdoto in rezo obstojnost v območju od 1260 do 1290°C (v obeh omenjenih območjih velja nižja temperatura za visoko žilavost, višja pa za visoko trdoto in rezo obstojnost).

Ugotovili smo, da je metoda za preizkušanje udarne upogibne žilavosti z oslavitvijo dovolj zanesljiva glede na ločevalno sposobnost brzoreznih jekel že pri 15 paralelkah. To pomeni, da je potrebno pri tej metodi za enak učinek preizkušanja več kot polovico manj prob, kot jih zahteva običajni preizkus brez oslavitve.

Literatura

1. Segel J.: Diplomsko delo, Fakulteta za montanistiko, wertung von Zähigkeitsuntersuchungen an ungekerbten Ljubljana, 1969
2. Bungardt K., O. Mülders, W. Spyra: »Statistische Aus-Schlagbiegeproben aus Stählen hoher Härte« — Stahl und Eisen 77, št. 26
3. Uranc F.: »Žilavost orodnih jekel« — Železarski zbornik, 1967, I., str. 205—215
4. Steven G.: »Impact Fest for Evaluating Tool Steels« Metal Progress, 1959, 5
5. Rodič J., Rodič A.: »Brzorezna jekla III. del — Železarski zbornik, 1968., II., str. 165—185
6. Pratnekar T.: »Raziskave obstojnosti brzoreznih jekel« — Železarski zbornik, 1968., II., str. 113—133

ZUSAMMENFASSUNG

Die Wärmebehandlung hat einen grossen Einfluss auf die Härte, Zähigkeit und andere Eigenschaften der Schnellarbeitsstähle. Im Artikel ist eine umfangreiche Untersuchung der Schlagbiege Zähigkeit verschiedener wärmebehandelter Schnellarbeitsstähle beschrieben. Die Messungsergebnisse wurden durch die Verteilungsanalyse, durch die Regresionanalyse und durch die Varianzenanalyse und mit Hilfe einer Elektronenrechenmaschine ausgewertet.

Für die Messung der Schlagbiege Zähigkeit war eine Methode ausgewählt, bei welcher geschwächte (gekerbte) Proben verwendet wurden. Die Ergebnisse der Varianzenanalyse zeigten, dass die Methode in Hinsicht der Trennungsfähigkeit der Schnellarbeitsstähle schon bei 15 Parallelen zuverlässig genug ist.

Die statistische Bearbeitung durch die Messungen erhaltener Daten zeigte:

— dass für eine gute Zähigkeit der Schnellarbeitsstähle vor allem die Härtetemperatur und weniger die Nachlass-temperatur wichtig ist,

— dass bei den höchst erreichten Härten und bei den Härten von 65—65 HRC im Vergleich zu den anderen Schnellarbeitsstählen die beste Zähigkeit der Molybdenstahl BRM-2 (S 6-5-2) hat.

Im Artikel sind in der Form von Tabellen und Nomo-grammen die Abhängigkeit der Zähigkeit von der Härte und Nachlass-temperatur für die wichtigsten Schnellarbeitsstähle so wie die Verbindungen zwischen der Härte, der Zähigkeit und der magnetischen Messungen, wiedergegeben.

SUMMARY

Heat treatment has a great influence on hardness, toughness, and other properties of high-speed steels. Extensive study on impact bending toughness of differently heat-treated high-speed steels is described in the paper. Results of the measurements were analyzed by the method of distribution, regression, and variance, using a computer. Impact bending toughness was measured by the method where samples with a shallow (1 mm deep) round (radius 10 mm) notch were used. Results of the variance analysis showed that the method is reliable enough to distinguish high-speed steels already with 15 probes.

Statistical treatment of the results obtained by measurements showed that

— a good toughness of high-speed steels is influenced mainly by the quenching temperature and less by the tempering temperature, and that

— molybdenum steel BRM-2 (S 6-5-2) has the highest toughness at the highest obtained hardnesses, which being 64 to 65 HRC, among the other high-speed steels.

In the paper, tables and nomograms represent relationship between the toughness and the quenching and tempering temperature respectively, and the relations between the hardness, toughness and magnetic measurements for the most important high-speed steels.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На твердость, вязкость и на другие качества быстрорежущей стали существенно влияет термическая обработка. В статье описаны обширные исследования о ударной изгибной вязкости быстрорежущей стали подвергнутой переменной термической обработке. Итого измерения были рассмотрены анализом разделения, регрессии и дисперсии, также при помощи электронного счетчика.

Для измерения ударной изгибной вязкости был применен метод при котором употреблены образцы с ослаблением. Результаты анализа дисперсии показали, что метод достаточно надежный что касается отделения быстрорежущих сталей уже при 15 параллель. Статистическая обработка изменений полученных дан-

ных показала: а) для получения хорошей вязкости быстрорежущей стали в особенности имеет влияние темп-ра закалки, темп-ра отпуска играет второстепенную роль, б) при максимальной полученной твердости или при твердостях 64—65 HRC, с сравнении с другими сортами быстрорежущей стали, самую высокую вязкость имеет молибденовая сталь марки BRM-2 (S 6-5-2).

В статье, в форме таблиц и номограмм, показана зависимость вязкости важнейших сортов быстрорежущей стали от темп-ры закалки и темп-ры отпуска а также связь между твердостью, вязкостью и магнитными измерениями.