

# Vpliv kemijske sestave na premenske točke ledeburitnih orodnih jekel

UDK: 669.15 - 194.58  
ASM/SLA: N8, M23b, S12, TSh, 2 - 60

Jože Rodič,  
Antonija Segel

V okviru raziskovalnega projekta ledeburitnih orodnih jekel v železarni Ravne so bile opravljene obsežne dilatometrijske preiskave, od katerih je v članku opisano določevanje premenskih točk za vsa jekla iz raziskovalnega programa.

Zanimiva je analiza vplivov kemijske sestave na temperaturo premenskih točk in na dilatacije v premenskem območju, čeprav ravno pri teh jeklih premenske točke nimajo tolikšnega pomena za toplotno obdelavo kot pri drugih. Zaradi raztapljanja karbidov je temperatura avstenitizacije pri kaljenju precej višja od temperature konca premene alfa-gama pri ogrevanju.

Analize regresije so pokazale izredno visoko statistično pomembnost obravnavanih odvisnosti, tako da so v zaključkih navedeni vplivi statistično zanesljivi, nomogrami v članku pa podrobneje prikazujejo ugotovitve te raziskave. Vse statistične analize porazdelitve in regresij so bile izvršene na računalniku IBM 370/135 z lastnimi posebnimi programi oddelka AOP v železarni Ravne.

Premenske točke predstavljajo zelo pomembne karakteristike vrste jekla in so odvisne od kemične sestave in hitrosti ogrevanja ter ohlajevanja. Spoznavanje premenskih točk preiskovanih jekel predstavlja seveda potrebno osnovo za sistematično planiranje raziskav na področju toplotne obdelave. Zato je bilo določanje premenskih točk vključeno tudi v prvo fazo raziskovalnega projekta ledeburitnih orodnih jekel. Pri tem smo imeli priliko primerjati premenske točke za enajst vrst jekel iz skupine orodnih jekel ledeburitnega tipa. Ponudila se je tudi možnost zanimive računalniške obdelave in analize korelacij, ki jo v nadaljnjem obravnavamo.

Metodika določevanja premenskih točk je splošno poznana, zato naj omenimo le nekaj osnovnih pogojev preizkušanja. Vse meritve smo izvajali z dilatometrom, tipa DITIRC firme ADAMEL in pri tem uporabljali hitrost ogrevanja in ohlajanja  $2,5^{\circ}\text{C min}^{-1}$ .

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

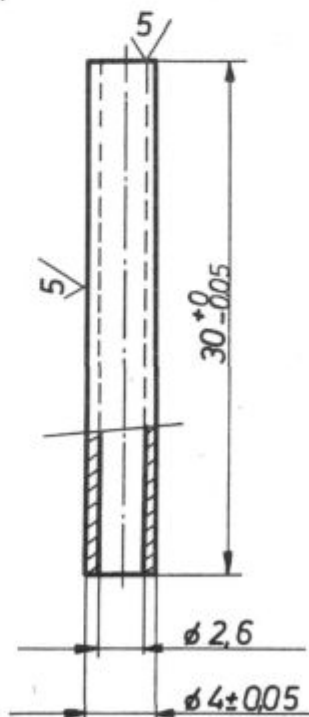
Antonija Segel, metalurški tehnik, raziskovalec za dilatometrijo v metalografskih laboratorijih Železarne Ravne.

Preizkušane za dilatometrijske meritve prikazuje slika 1.

Termoelement je privarjen uporovno v cevki — preizkušancu, katerega vložimo v kremenčevu cev in vse skupaj montiramo v dilatometer.

Pri ledeburitnih orodnih jeklih moramo s temperaturo in časom avstenitizacije omogočiti ustrezno raztapljanje karbidov. Prav pri teh jeklih je zelo pomembno zagotoviti natančno temperaturo avstenitizacije in enak čas, če hočemo rezultate med seboj primerjati. Zato smo tudi pri določevanju premenskih točk preizkušance vedno ogrevali do enake temperature  $1040^{\circ}\text{C}$  in jih po zadržanju 10 minut na tej temperaturi začeli ohlajati s predpisano hitrostjo.

Zaradi različnih načinov odčitavanja premenskih točk na dilatometrijskih krivuljah naj omenimo, da smo pri vseh naših preiskavah odčitavali premene v točki, kjer se začne krivulja odklanjati od premice.



Slika 1  
Proba za preiskave na dilatometru DITIRC — ADAMEL.

Fig. 1  
Test probe for DITIRC-ADAMEL dilatometer.

Tabela 1: Kemijske sestave in temperature premenskih točk preiskovanih jekel

Oznaka prob	Vrsta jekla	Kemijska sestava					Temperature premenskih točk °C					bainita %
		% C	% Cr	% W	% Mo	% V	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	B <sub>s</sub>	
		X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	X <sub>18</sub>	X <sub>19</sub>	X <sub>20</sub>	X <sub>01</sub>	X <sub>02</sub>	X <sub>03</sub>	X <sub>04</sub>	—	
J	2 C — 12 Cr	2,01	12,3	0	0,05	0,06	785	815	745	720	550	1—2
K	1,5 C — 12 Cr	1,58	12,7	0	0,01	0,01	805	840	760	725	—	—
L	1,5 C — 12 Cr — 1 V	1,56	12,3	0	0,01	1,05	800	830	755	725	550	1—2
M	1,5 C — 12 Cr — 1 Mo	1,57	12,0	0	0,99	0,06	800	835	740	685	545*	—
N	1,5 C — 12 Cr — 1 V — 1 Mo	1,58	12,0	0	0,94	1,15	815	840	750	700	—	—
R	Č. 4150 — OCR 12	2,03	11,3	0,10	0,06	0,13	770	805	740	705	560*	—
S	Č. 4650 — OCR 12 spec.	2,08	11,8	0,85	0,10	0,12	780	815	730	690	550	2
T	Č. 4750 — OCR 12 extra	1,59	11,8	1,11	0,66	0,16	800	835	740	690	—	—
U	Č. 4850 — OCR 12 VM	1,49	11,2	0,10	0,81	0,93	810	840	745	690	470*	—
V	Č. 4754 — CRV	0,91	10,6	0,10	1,05	0,25	800	835	730	630	455	50
Z	Č. 7680 — BRM-2	0,82	4,25	6,34	5,07	1,92	810	860	785	660	465	3

\* Pri tej temperaturi je dilatometrška krivulja nakazala začetek tvorbe bainita, ki pa ga pri meta-

lografskem pregledu nismo mogli odkriti.

Kemijske sestavine preiskovanih jekel so navedene v tabeli 1, ki podaja tudi temperature premenskih točk.

Znano je, da poteka pri ledeburitnih orodnih jeklih temperaturna premena alfa—gamma v tem-

perturnem intervalu, tako da registriramo pri ogrevanju začetek in konec premene ter obe premenski točki označujemo Ac<sub>začetek</sub> in Ac<sub>konec</sub>. Zaradi poenostavitve pri računalniški obdelavi ne uporabljamo teh različnih oznak (glej slika 2) in smo zato ti dve premenski točki označili z Ac<sub>1</sub> in Ac<sub>3</sub>. Analogno je pri ohlajanju premena Ar<sub>začetek</sub> označena z Ar<sub>3</sub> in Ar<sub>konec</sub> z Ar<sub>1</sub>. Te oznake smo uporabili v vseh tabelah in obdelavah, ker se nanašajo na računaniške vhodne podatke in oznake v banki podatkov za AOP.

		<b>DILATOMETRSKE PREISKAVE JEKEL</b>	
Vrsta jekla po ZB:			
VK	litarski delovni nalog	Zap. št.	Meril.
8	8	D	M
9	9	L	J
10	10	J	AUS

Naliv marnice	Koda	Vrednost	Naliv marnice	Koda	Vrednost
Ac <sub>1</sub>	801		Temp. kalenja v kalnici (°C)	810	
Ac <sub>3</sub>	802		Kalica sredstvo v kalnici	860	
Ar <sub>3</sub>	804		Hladihladilnik	806	9
Ar <sub>1</sub>	803				
M <sub>s</sub>	805				

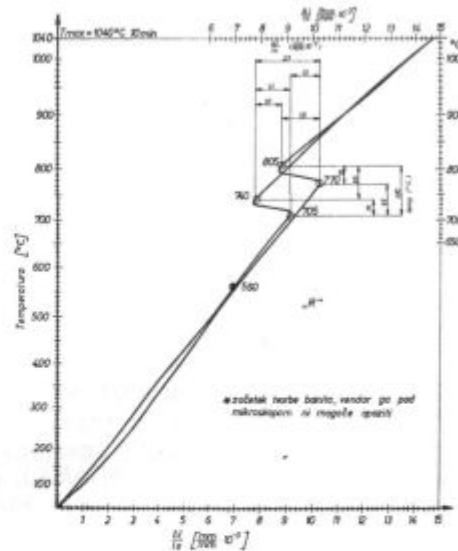
Šarža:		Dokument:	
Lokacija:	Vrsta:	Opomba:	Vrsta ali delovno:

Slika 2

Dokument za vnašanje dilatometriških meritev v banko podatkov AOP

Fig. 2

Sheet for recording dilatometric measurements for AOP data bank.

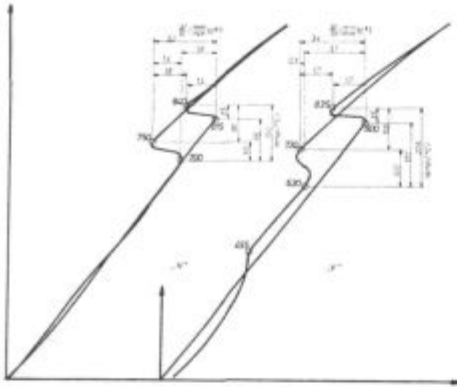


Slika 3

Dilatometriška krivulja posneta pri določevanju premenskih točk jekla C.4150 — OCR 12 (vzorec z oznako R)

Fig. 3

Dilatometric curve recorded in determining transformation points of C.4150 — OCR 12 steel (sample R)



Slika 4

Primer dilatometrijskih krivulj za jeklo Č.4850 — OCR 12 VM (oznaka N) in Č.4754 — CRV (oznaka V)

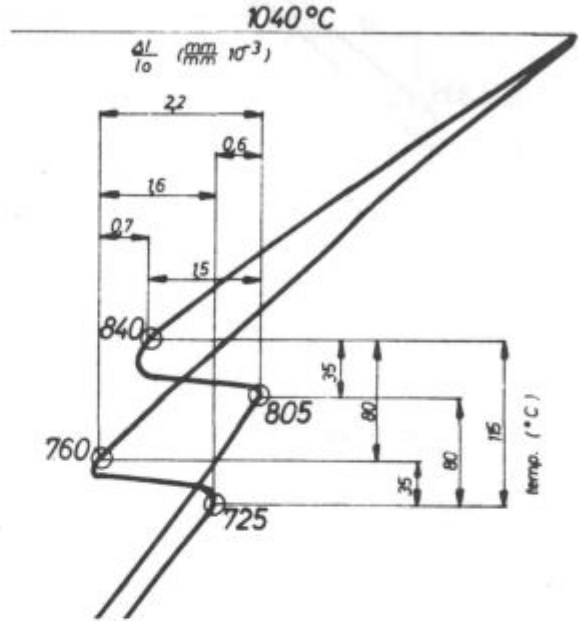
Fig. 4

Dilatometric curves of Č.4850 — OCR 12 VM (sample N) and Č.4754 — CRV (sample V) steel.

Za ilustracijo podaja slika 3 dilatometrijsko krivuljo jekla Č 4150 — OCR 12, slika 4 pa dilatometrijske krivulje za jekli Č 4850 — OCR 12VM in Č 4754 — CRV.

Jeklo Č 4850 — OCR 12 VM (»N«) je v vseh primerih pokazalo najenakomernejši potek krivulj zunaj premenskega območja. Krivulji ogrevanja in ohlajanja se skoraj pokrivata. Drugo skrajnost med obravnavanimi vrstami jekel kaže dilatometrijska krivulja za jeklo Č 4754 — CRV (»V«), ki je edina pokazala pri ohlajanju jasno izraženo bainitno premeno.

Ker nas pri zastavljeni raziskavi zanima le premensko območje, ne pa nizkotemperaturni del dilatometrijskih krivulj, podajamo na slikah 5 do 15 samo izreze premenskega območja za primerjave vseh preiskovanih jekel. Vse temperaturne razlike in razlike dilatacij med premenskimi točkami, ki so kotirane na slikah, podajata tabeli 2 in 3.

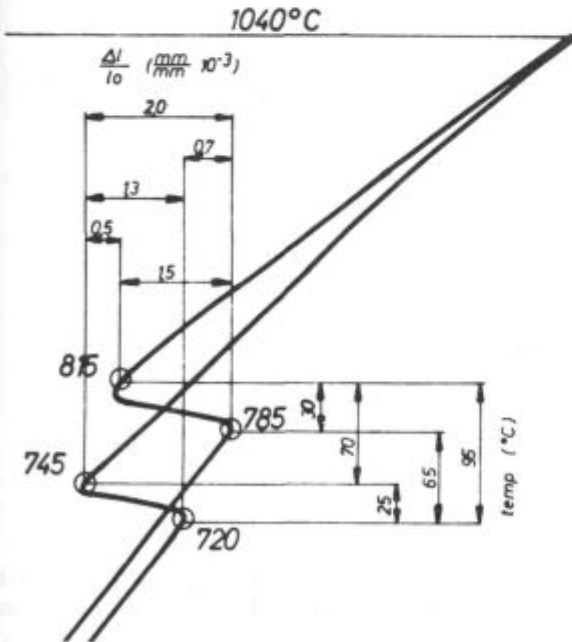


Slika 6

Jeklo K 1,5 % C — 12 Cr

Fig. 6

Steel K 1.5 % C — 12 % Cr

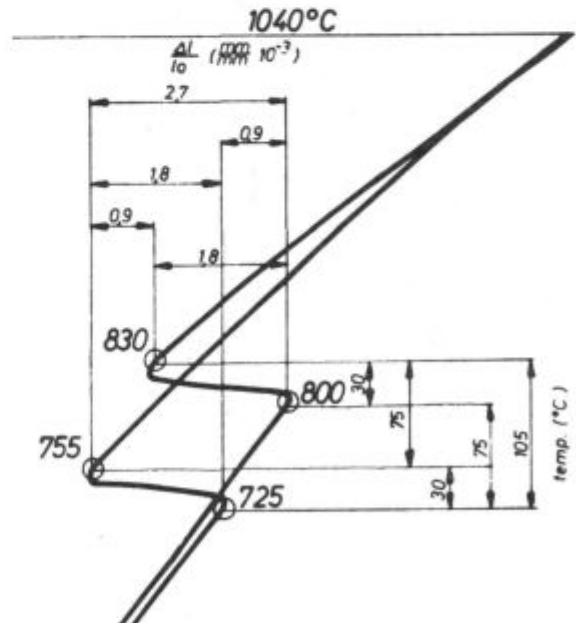


Slika 5

Jeklo J 2 % C — 12 % Cr

Fig. 5

Steel J 2 % C — 12 % Cr.

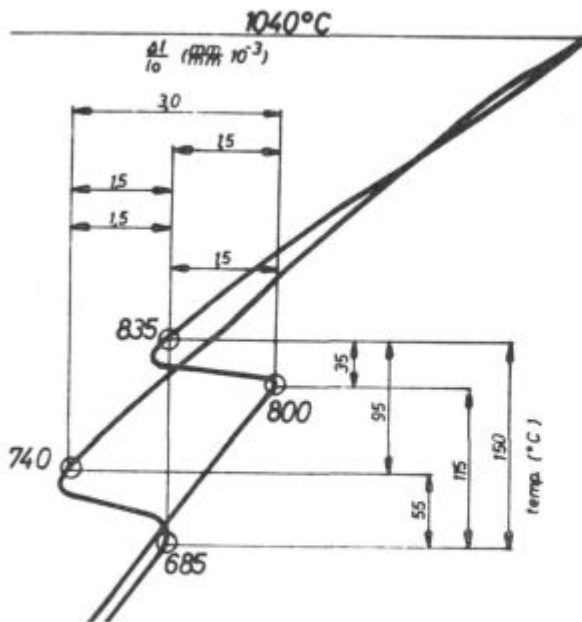


Slika 7

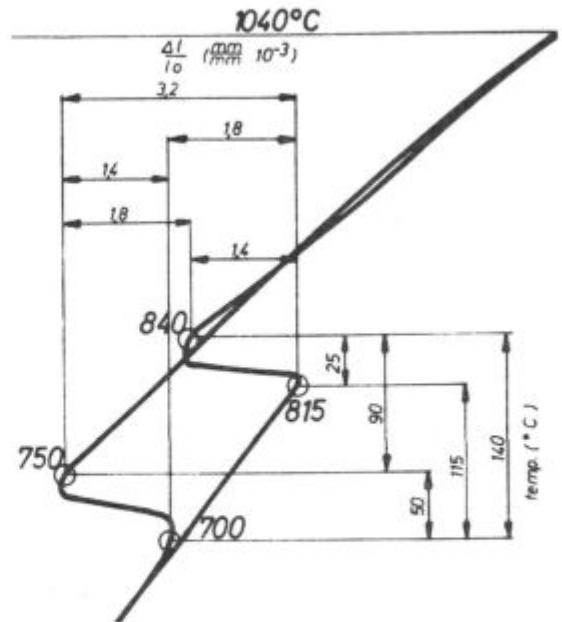
Jeklo L 1,5 % C — 12 % Cr — 1 % V

Fig. 7

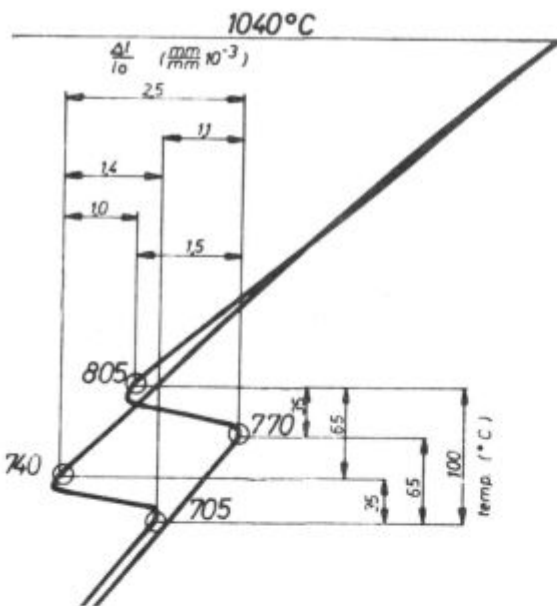
Steel L 1.5 % C — 12 % Cr — 1 % V



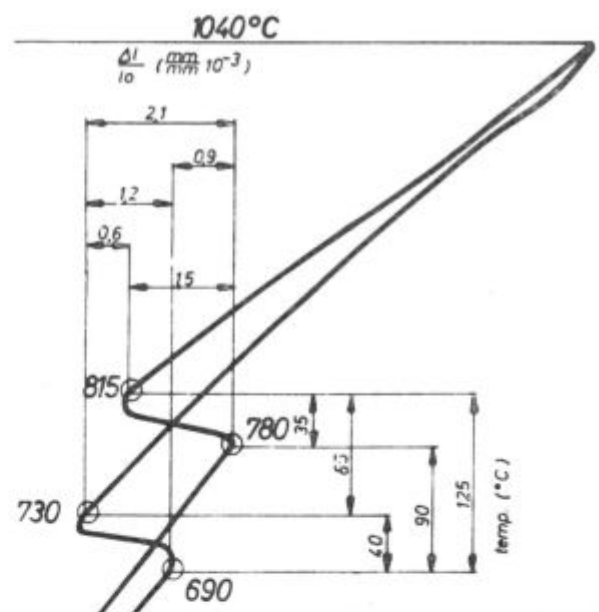
Slika 8  
Jeklo M 1,5 % C — 12 % Cr — 1 % Mo  
Fig. 8  
Steel M 1.5 % C — 12 % Cr — 1 % Mo



Slika 9  
Jeklo N 1,5 % C — 12 % Cr — 1 % V — 1 % Mo  
Fig. 9  
Steel N 1.5 % C — 12 % Cr — 1 % V — 1 % Mo



Slika 10  
Jeklo R Č.4150 — OCR 12  
Fig. 10  
Steel R Č.4150 — OCR 12

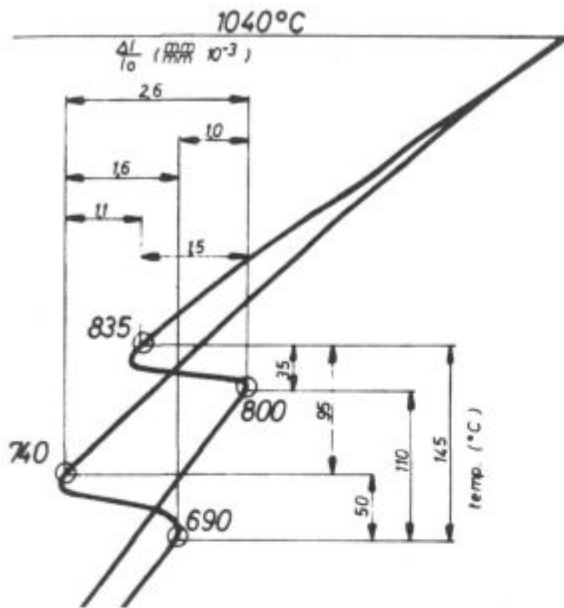


Slika 11  
Jeklo S Č.4650 — OCR 12 special  
Fig. 11  
Steel S Č.4650 — OCR 12 special

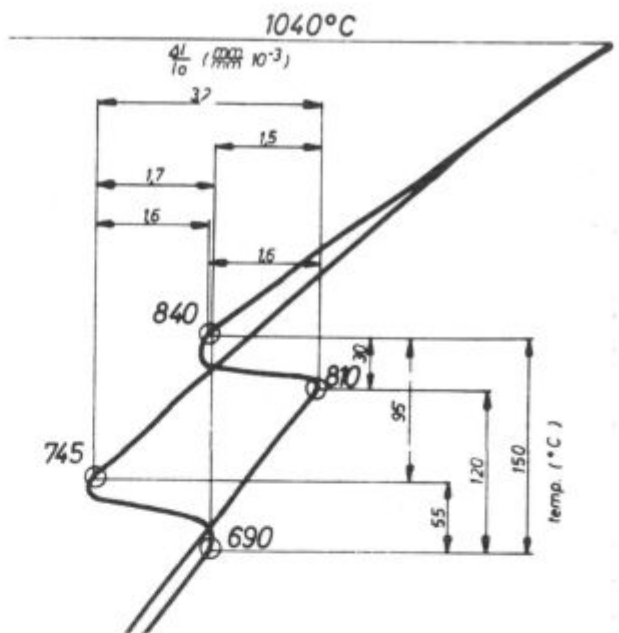
Vse podatke, označene z  $x_{01}$  do  $x_{20}$  v tabelah 1 do 3, smo uporabili kot vhodne podatke za analizo korelacij.

Tabela 4 podaja izvleček računalniškega izpisa, ki ponazarja območja variacij vseh spremenljivk v analizah korelacije, ki smo jih pri raziskavah izvršili.

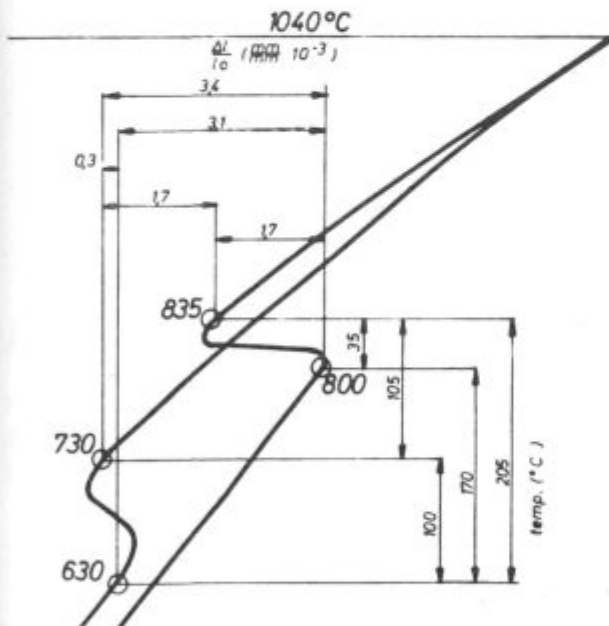
V tabeli 5, ki prikazuje korelacijsko matriko med odvisnimi spremenljivkami  $x_{01}$  do  $x_{14}$  in neodvisnimi spremenljivkami  $x_{16}$  do  $x_{20}$ , ki predstavljajo elemente v kemijski sestavi, so podani parcialni koeficienti korelacije med pari spremenljivk. Koeficienti brez predznaka, torej pozitivni, ponazarjajo premo sorazmerno odvisnost, negativni pa obrat-



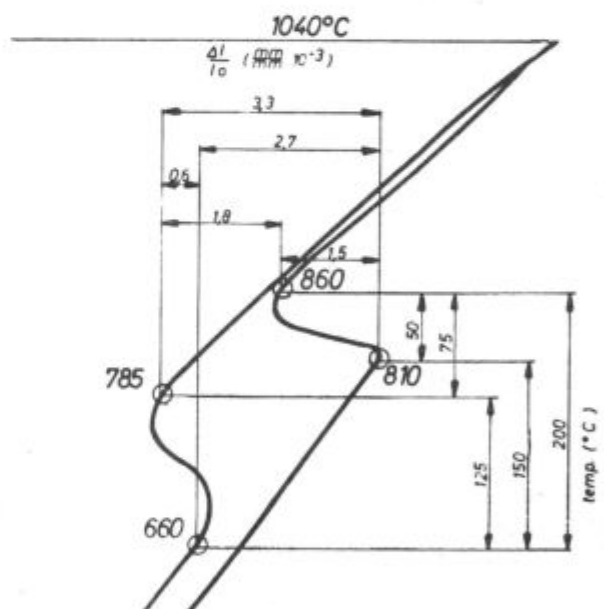
Slika 12  
Jeklo T Č.4750 — OCR 12 extra  
Fig. 12  
Steel T Č.4750 — OCR 12 extra



Slika 13  
Jeklo U Č.4850 — OCR 12 VM  
Fig. 13  
Steel U Č.4850 — OCR 12 VM



Slika 14  
Jeklo V Č.4754 — CRV  
Fig. 14  
Steel V Č.4754 — CRV



Slika 15  
Jeklo Z Č.7680 — BRM 2  
Fig. 15  
Steel Z Č.7680 — BRM 2

nosorazmerno odvisnost med spremenljivkama. Pregled take korelacijske matrike nam da zgoščeno mnogo informacij, ki jih lahko izkoristimo za nadaljne analize vplivov in odvisnosti. Poglejmo nekaj teh!

Pri ugotavljanju vplivov kemijske sestave — vsebnosti ogljika, kroma, volframa, molibdena in

vanadija — na temperature in temperaturne razlike premenskih točk so vse enačbe regresije zadovoljile kriterije statistične pomembnosti nad 99 %.

Slika 16 prikazuje vpliv ogljika in vanadija na temperaturo premene  $A_c$  začetek s koeficientom determinacije  $R^2 = 0,924$  in 95 % območjem napake  $\pm 8,9^\circ\text{C}$  za odvisno spremenljivko. Temperatura te

Tabela 2 — Temperaturna razlika med premenskimi točkami

Oznaka prob	Vrsta jekla	Temperaturne razlike v °C				
		Ac <sub>3</sub> — Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub> — Ar <sub>3</sub>	Ar <sub>3</sub> — Ar <sub>1</sub>	Ac <sub>1</sub> — Ar <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub> — Ar <sub>1</sub>
		x <sub>05</sub>	x <sub>08</sub>	x <sub>07</sub>	x <sub>04</sub>	x <sub>09</sub>
J	2 C — 12 Cr	30	70	25	65	95
K	1,5 C — 12 Cr	35	80	35	80	115
L	1,5 C — 12 Cr — 1 V	30	75	30	75	105
M	1,5 C — 12 Cr — 1 Mo	35	95	55	115	150
N	1,5 — 12 Cr — 1 V — 1 Mo	25	90	50	115	140
R	č. 4150 — OCR 12	35	65	35	65	100
S	č. 4650 — OCR 12 spec.	35	85	40	90	125
T	č. 4750 — OCR 12 extra	35	95	50	110	145
U	č. 4850 — OCR 12 VM	30	95	55	120	150
V	č. 4754 — CRV	35	105	100	170	205
Z	č. 7680 — BRM-2	50	75	125	150	200

Tabela 3 — Razlike dilatacij med premenskimi točkami

Oznaka prob	Vrsta jekla	Razlike med odčitki dilatacij premenskih točk				
		Ac <sub>1</sub> — Ac <sub>3</sub>	Ac <sub>3</sub> — Ar <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub> — Ar <sub>3</sub>	Ac <sub>1</sub> — Ar <sub>1</sub>	Ac <sub>1</sub> — Ar <sub>3</sub>
		x <sub>10</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>13</sub>	x <sub>14</sub>
J	2 C — 12 Cr	1,5	0,5	1,3	0,7	2,0
K	1,5 C — 12 Cr	1,5	0,7	1,6	0,6	2,2
L	1,5 C — 12 Cr — 1 V	1,8	0,9	1,8	0,9	2,7
M	1,5 C — 12 Cr — 1 Mo	1,5	1,5	1,5	1,5	3,0
N	1,5 C — 12 Cr — 1 V — 1 Mo	1,4	1,8	1,4	1,8	3,2
R	č. 4150 — OCR 12	1,5	1,0	1,4	1,1	2,5
S	č. 4650 — OCR 12 spec.	1,5	0,6	1,2	0,9	2,1
T	č. 4750 — OCR 12 extra	1,5	1,1	1,6	1,0	2,6
U	č. 4850 — OCR 12 VM	1,6	1,6	1,7	1,5	3,2
V	č. 4754 — CRV	1,7	1,7	0,3	3,1	3,4
Z	č. 7680 — BRM-2	1,5	1,8	0,6	2,7	3,3

Tabela 4 — Osnovni statistični podatki spremenljivk v analizi korelacij

št.	Spremenljivka naziv	Srednja vrednost	Območje	
			od	do
01	Premenska točka Ac <sub>1</sub> °C	797,7	770	815
02	Premenska točka Ac <sub>3</sub> °C	831,8	805	860
03	Premenska točka Ar <sub>3</sub> °C	747,2	730	785
04	Premenska točka Ar <sub>1</sub> °C	692,7	630	725
05	Temperaturna razlika Ac <sub>3</sub> — Ac <sub>1</sub> °C	34,1	25	50
06	Temperaturna razlika Ac <sub>3</sub> — Ar <sub>3</sub> °C	84,5	65	105
07	Temperaturna razlika Ar <sub>3</sub> — Ar <sub>1</sub> °C	54,5	25	125
08	Temperaturna razlika Ac <sub>1</sub> — Ar <sub>1</sub> °C	105,0	65	170
09	Temperaturna razlika Ac <sub>3</sub> — Ar <sub>1</sub> °C	139,1	95	205
10	Razlika dilatacij Ac <sub>1</sub> — Ac <sub>3</sub> 10 <sup>-3</sup>	1,54	1,40	1,80
11	Razlika dilatacij Ac <sub>3</sub> — Ar <sub>3</sub> 10 <sup>-3</sup>	1,20	0,50	1,80
12	Razlika dilatacij Ar <sub>1</sub> — Ar <sub>3</sub> 10 <sup>-3</sup>	1,31	0,30	1,80
13	Razlika dilatacij Ac <sub>1</sub> — Ar <sub>1</sub> 10 <sup>-3</sup>	1,44	0,60	3,10
14	Razlika dilatacij Ac <sub>1</sub> — Ar <sub>3</sub> 10 <sup>-3</sup>	2,74	2,00	3,40
16	% C v končni analizi	1,60	0,85	2,18
17	% Cr v končni analizi	11,19	4,29	12,70
18	% W v končni analizi	0,73	0,00	6,40
19	% Mo v končni analizi	0,89	0,01	5,15
20	% V v končni analizi	0,54	0,01	1,97

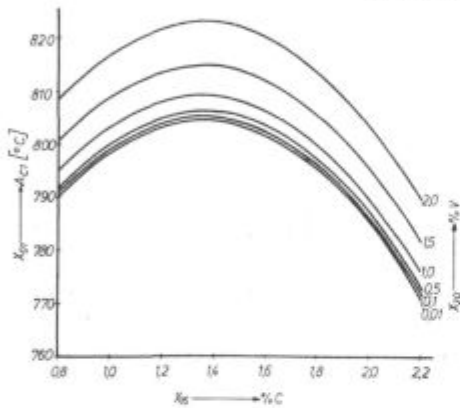
Tabela 5 — Izrez korelacijske matrike v izpisu računalnika (nazivi spremenljivk so navedeni v tabeli 4)

	Premenske točke				Razlike temperatur					Razlike dilatacij				
	$x_{01}$	$x_{02}$	$x_{03}$	$x_{04}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$
$x_{16}$	-0,74	-0,87	-0,50	0,66	-0,48	-0,43	-0,86	-0,85	-0,86	-0,30	-0,73	0,56	-0,81	-0,78
$x_{17}$	-0,29	-0,61	-0,68	0,57	-0,84	0,10	-0,87	-0,59	-0,69	0,05	-0,52	0,64	-0,67	-0,50
$x_{18}$	0,26	0,59	0,75	-0,39	0,86	-0,21	0,74	0,43	0,54	-0,17	0,35	-0,49	0,47	0,31
$x_{19}$	0,45	0,73	0,71	-0,56	0,78	0,005	0,87	0,65	0,73	-0,15	0,63	-0,56	0,68	0,58
$x_{20}$	0,59	0,67	0,74	-0,20	0,32	-0,10	0,56	0,41	0,43	0,10	0,60	-0,19	0,49	0,69

$$x_{01} = 719,22 + 126,934 \cdot x_{16} - 46,936 \cdot x_{16}^2 + 4,4597 \cdot x_{20}^2$$

Deleži povečanja R<sup>2</sup>:

$x_{16}$  . . . . . % C . . . . . za 0,8470  
 $x_{20}$  . . . . . % V . . . . . za 0,0768  
 Skupaj: 0,9238



Slika 16

Vpliv sestave na premensko točko Ac<sub>začetek</sub>

Fig. 16

Influence of composition on the transformation point Ac

premene je najvišja pri vsebnosti 1,4 % ogljika, ki ima prevladujoč vpliv. Vanadij povišuje temperaturo te premene v celotnem območju variacij, čeprav je njegov vpliv precej šibkejši od ogljika. Vpliv kroma, volframa in molibdena v tej regresijski analizi ni bil statistično pomemben.

Podobno so izraženi tudi vplivi kemijske sestave na temperaturo premene Ac<sub>konec</sub>, ki jih prikazuje nomogram na sliki 17. Poleg ogljika in vanadija je pokazala pomemben vpliv tudi vsebnost volframa. Koeficient determinacije pri tej odvisnosti je 0,953, napaka določitve odvisne spremenljivke s 95 % statistično zanesljivostjo pa je ± 8,3 °C. Vsebnost ogljika izraža pri svojem vplivu podoben maksimum kot na sliki 16, le da je ta maksimum pomaknjen k nekoliko nižji vsebnosti ogljika, kar je razumljivo zaradi dodatnega upoštevanja volframa — karbidotvorca. Volfram in vanadij v celotnem območju variacij povišujeta temperaturo premene Ac<sub>konec</sub>, čeprav je zanj parcialni koeficient korelacije znatno manjši kot za ogljik.

$$P = 99 \% \quad R^2 = 0,968 \quad 1,96 S_{y,x} = 8,6$$

$$x_{03} = 704,935 + 109,168 \cdot x_{16} - 37,65 \cdot x_{16}^2 - 0,1511 \cdot x_{17}^2 - 16,438 \cdot x_{19} - 66,021 \cdot x_{20} + 59,792 \cdot x_{20}^2$$

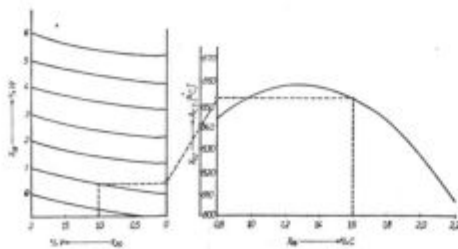
Deleži povečanja R<sup>2</sup>:

$x_{20}$  . . . . . % V . . . . . za 0,7528  
 $x_{17}$  . . . . . % Cr . . . . . za 0,1517  
 $x_{16}$  . . . . . % C . . . . . za 0,0460  
 $x_{19}$  . . . . . % Mo . . . . . za 0,0179  
 Skupaj: 0,9684

$$x_{02} = 770,566 + 106,382 \cdot x_{16} - 41,360 \cdot x_{16}^2 + 3,99 \cdot x_{18} + 0,838 \cdot x_{20}^2$$

Deleži povečanja R<sup>2</sup>:

$x_{16}$  . . . . . % C . . . . . za 0,8650  
 $x_{20}$  . . . . . % V . . . . . za 0,0479  
 $x_{18}$  . . . . . % W . . . . . za 0,0403  
 Skupaj: 0,9532

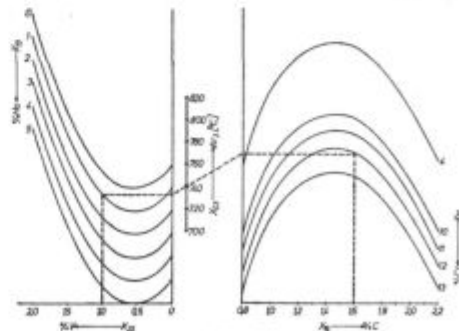


Slika 17

Vpliv sestave na premensko točko Ac<sub>konec</sub>

Fig. 17

Influence of composition on the transformation point Ac



Slika 18

Vpliv sestave na premensko točko Ar<sub>začetek</sub>

Fig. 18

Influence of composition on the transformation point Ar

Vpliv kemijske sestave na premenske točke je pri ohlajanju ( $A_r$ ) bistveno drugačen kot pri ogrevanju.

V odvisnosti temperature začetka premene pri ohlajanju (slika 18) od kemijske sestave so popolnoma zamenjane vloge posameznih elementov. Močno prevladuje vpliv vanadija, ki temperaturo začetka premene znižuje, kar je prav nasprotno od njegovega vpliva na premene pri ogrevanju. Najnižja je temperatura začetka premene pri 0,5 % V. Temperatura konca premene pa pri ohlajanju ne kaže statistično pomembne odvisnosti od vanadija (Slika 19).

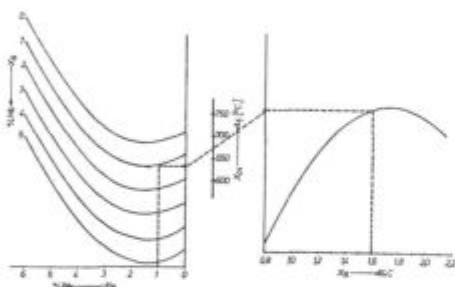
$$P > 99,9 \% \quad R^2 = 0,984 \quad 1,96 S_{y,x} = 10,1$$

$$x_{04} = 383,23 + 399,36 \cdot x_{16} - 115,4 \cdot x_{16}^2 -$$

$$- 25,28 \cdot x_{18} + 8,93 \cdot x_{18}^2 - 35,61 \cdot x_{19}$$

Deleži povečanja  $R^2$ :

$x_{16}$ . . . . .	% C . . . . .	za 0,6078
$x_{18}$ . . . . .	% W . . . . .	za 0,1959
$x_{19}$ . . . . .	% Mo . . . . .	za 0,1799
Skupaj: 0,9836		



Slika 19

Vpliv sestave na premensko točko  $A_{r\text{konec}}$

Fig. 19

Influence of composition on the transformation point  $A_r$

Temperaturo začetka premene pri ohlajanju precej znižuje krom. Molibdenov vpliv je manj pomemben, čeprav tako kot krom to temperaturo znižuje linearno.

Ogljik kaže tako pri ogrevanju kot pri ohlajanju enako obliko vpliva, le da je pri odvisnostih temperatur  $A_{c\text{začetek}}$ ,  $A_{c\text{konec}}$  in  $A_{r\text{konec}}$  najpomembnejši vplivni element, pri odvisnosti premene  $A_{r\text{začetek}}$  pa je njegov delež determinacije zelo majhen.

Na sliki 19 je precej jasno prikazan zelo podoben in skoraj enako močen vpliv molibdena in volframa na zniževanje temperature konca premene pri ohlajanju.

Zanimiva je ugotovitev, da na širino temperaturnega območja premen pri ogrevanju najmočnejše vpliva volfram, ki to razliko temperatur linearno povečuje s parcialnim koeficientom determinacije 0,748, medtem ko jo vanadij in krom linearno zmanjšujeta, vendar z znatno manjšim parcialnim koeficientom determinacije 0,146, oziroma 0,028. Enačba regresije je pri tem

$$\Delta T(A_{c\text{konec}} - A_{c\text{začetek}}) = 53,55 - 1,6 \% \text{ Cr} +$$

$$+ 2,32 \% \text{ W} - 5,91 \% \text{ V}$$

s 95 % napako  $\pm 4,1^\circ\text{C}$  in  $R^2 = 0,923$ .

Medtem ko je za vsa preiskovana jekla širina premenskega območja pri ogrevanju od 25 do 50°C, je premensko območje pri ohlajanju precej širše in znaša od 25 do 125°C. S koeficientom determinacije  $R^2 = 0,9696$  in napako 1,96  $S_{y,x} = 12,6$  velja enačba regresije

$$\Delta T(A_{r\text{začetek}} - A_{r\text{konec}}) = 216,14 - 36,96 \% \text{ C} -$$

$$- 0,728 (\% \text{ Cr})^2 - 11,36 (\% \text{ V})^2$$

Največji je parcialni koeficient determinacije za krom (0,804).

Temperaturne razlike med koncem premene pri ogrevanju in začetkom premene pri ohlajanju so za vsa preiskovana jekla 65 do 105°C. Rezultate za to regresijsko analizo podaja slika 20.

$$P > 99,9 \% \quad R^2 = 0,9904 \quad 1,96 S_{y,x} = 5,4$$

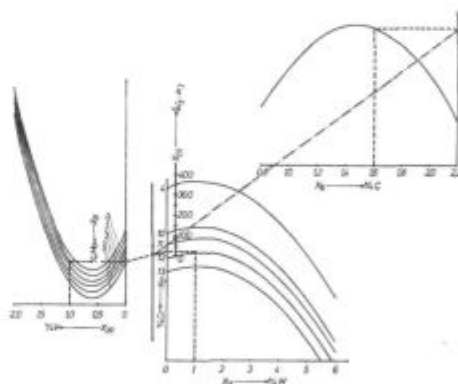
$$x_{06} = 193,18 + 193,29 \cdot x_{16} - 65,79 \cdot x_{16}^2 -$$

$$- 1,559 \cdot x_{17}^2 + 32,565 \cdot x_{18}^2 - 14,04 \cdot x_{18}^3 -$$

$$- 7,566 \cdot x_{19} - 166,77 \cdot x_{20} + 136,02 \cdot x_{20}^2$$

Deleži povečanja  $R^2$ :

$x_{20}$ . . . . .	% V . . . . .	za 0,3968
$x_{16}$ . . . . .	% C . . . . .	za 0,2540
$x_{19}$ . . . . .	% Mo . . . . .	za 0,2297
$x_{18}$ . . . . .	% W . . . . .	za 0,0593
$x_{17}$ . . . . .	% Cr . . . . .	za 0,0506
Skupaj: 0,9904		



Slika 20

Vpliv sestave na temperaturno razliko  $A_{c\text{konec}} - A_{r\text{začetek}}$

Fig. 20

Influence of composition on the temperature difference  $A_c - A_r$

Pri analizah širine premenskih območij je prav gotovo najpomembnejša razlika temperatur med koncem premene pri ogrevanju in koncem premene pri ohlajanju. Ta razlika ponazarja celotno širino premenskega območja, ne upoštevajoč raztapljanje in izločanje karbidov. Za celo skupino preiskovanih jekel se ta širina območja spreminja od 95 do 205°C in nanjo vplivajo prav vsi elementi kemijske sestave, kakor prikazuje slika 21.



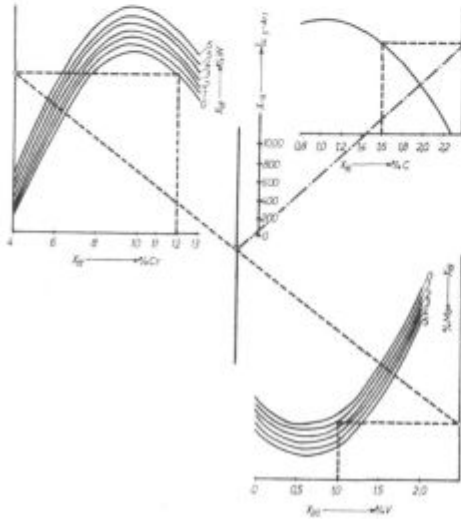
$$P > 99,9 \% \quad R^2 = 0,99995 \quad 1,96 S_{y,x} = 1,1$$

$$x_{09} = -2027,62 + 150,9 \cdot x_{16} - 72,76 \cdot x_{16}^2 + \\ + 463,99 \cdot x_{17} - 23,57 \cdot x_{17}^2 + 37,22 \cdot x_{18} - \\ - 30,57 \cdot x_{19} - 436,04 \cdot x_{20} + 353,88 \cdot x_{20}^2$$

Deleži povečanja  $R^2$ :

$x_{16}$ . . . . .	% C . . . . .	za 0,7951
$x_{17}$ . . . . .	% Cr . . . . .	za 0,1238
$x_{20}$ . . . . .	% V . . . . .	za 0,0417
$x_{19}$ . . . . .	% Mo . . . . .	za 0,0260
$x_{18}$ . . . . .	% W . . . . .	za 0,0133

Skupaj: 0,9999



Slika 21

Vpliv sestave na temperaturno razliko  $Ac_{konec} - Ar_{konec}$

Fig. 21

Influence of composition on the temperature difference  $Ac - Ar$

S celo serijo regresijskih analiz smo obravnavali dilatacije v premenskem območju. Tudi te regresije so bile vse statistično zelo pomembne.

Razlike dilatacij v celotnem območju od  $Ac_{začetek}$  do  $Ar_{konec}$  so vsekakor najzanimivejše, zato naj samo za ta primer podamo rezultate regresijske analize:

$$P > 99,9 \% \quad R^2 = 0,997 \quad 1,96 S_{y,x} = 0,138$$

$$\frac{\Delta l}{l_0} (Ac_{začetek} - Ar_{konec}) = x_{13} = 9,422 - \\ - 10,176 \cdot x_{16} + 2,8998 \cdot x_{16}^2 - 0,0397 \cdot x_{18} - \\ - 0,132 \cdot x_{18}^2 + 0,885 \cdot x_{19} + 0,242 \cdot x_{20}^2 \dots \\ \dots \left[ \frac{mm}{mm} \cdot 10^{-3} \right]$$

Deleži povečanja  $R^2$ :

$x_{16}$ . . . . .	% C . . . . .	za 0,7823
$x_{19}$ . . . . .	% Mo . . . . .	za 0,1041
$x_{18}$ . . . . .	% W . . . . .	za 0,0951
$x_{20}$ . . . . .	% V . . . . .	za 0,0154

Skupaj: 0,9969

## ZAKLJUČKI

Premenske točke so vsekakor značilna lastnost vrste jekla, zato je razumljivo, da nas je v raziskovalnem projektu najprej zanimala odvisnost premenskih karakteristik od kemijske sestave jekla.

Standardne premenske točke  $Ac$  in  $Ar$  so pri ledeburitnih orodnih jeklih v praksi res nekoliko manj pomembne, ker so pri toplotni obdelavi temperature avstenitizacije znatno višje zaradi raztapljanja karbidov. Kljub temu so nekatere ugotovitve izvršenih meritev in analiz zelo zanimive.

Posebna prilika za ugotavljanje vplivov posameznih legirnih elementov na premenske karakteristike se je nudila s serijo talin J, K, L, M, N, pri katerih lahko s planiranimi variacijami pri isti matični talini ugotavljamo vplive elementov posamezno. Pri vseh drugih talinah pa so mogoče zanimive medsebojne primerjave za tipične kemijske sestave jekel.

Ob sistematičnih variacijah kemijske sestave tipičnih jekel smo izkoristili tudi dane možnosti za statistične obdelave z metodo regresijske analize. Te smo razdelili na tri dele z ugotavljanjem vpliva kemijske sestave na:

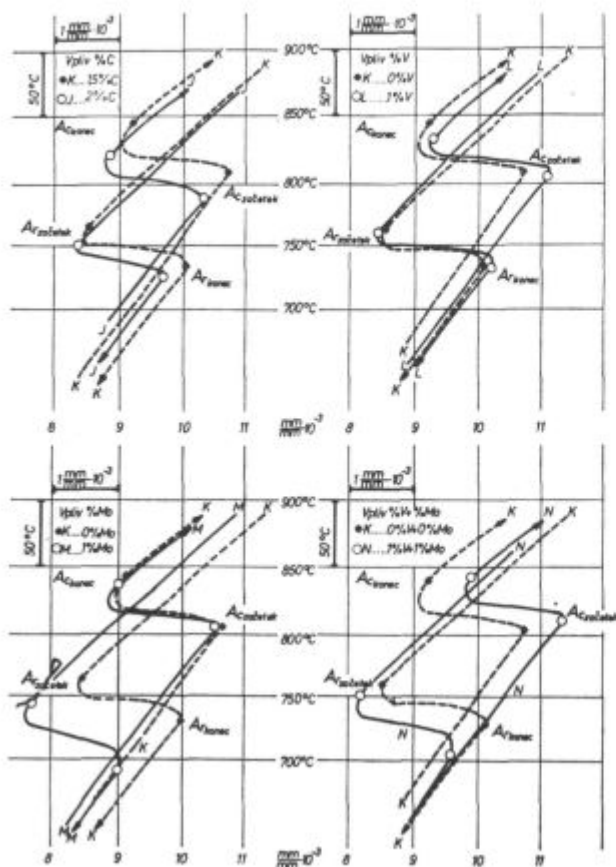
- temperature premenskih točk,
- temperaturne razlike med premenskimi točkami,
- dilatacije v premenskih območjih.

Iz nekaterih podatkov v tabelah 2 in 3 hitro ugotovimo, da talini V in Z znatno odstopata od družine ostalih ledeburitnih jekel. To je tudi razumljivo, saj sta to bistveno drugačni vrsti jekel in smo ju vključili v analizo predvsem zaradi medsebojnih primerjav.

Pri regresijskih analizah smo kljub razmeroma majhnemu številu šarž ugotovili izredno visoke stopnje determinacije ( $R^2$ ) in razmeroma majhne standardne napake za 95 % območje statistične zanesljivosti.

Premeni  $Ac_{začetek}$  (v analizi  $Ac_1$ ) in  $Ac_{konec}$  ( $Ac_3$ ) sta odvisni predvsem od vsebnosti ogljika, kar poleg nomogramov na slikah 16 in 17 nazorno ilustrira tudi zgornji levi del slike 22. Nižji odstotek ogljika zviša temperaturo obeh premenskih točk. V regresijski analizi sta se izkazala kot statistično pomembna vpliva vsebnosti vanadija in volframa, vendar sta oba z znatno nižjim koeficientom determinacije  $R^2$  v primerjavi z vplivom ogljika komaj omembe vredna. Tudi to ugotovitev potrjuje ilustracija na sliki 22. Molibden skoraj ne vpliva na premenske temperature pri ogrevanju.

Pri regresijah za temperature plemen  $Ar$  nekoliko preseneča majhen koeficient determinacije za vpliv molibdena, saj se ta močno izraža na slikah 18 in 19, pa tudi ilustracije na slikah 22 in 23 potrjujejo znane ugotovitve iz prakse drugih vrst jekel. Molibden močno vpliva na premene pri ohlajanju in povzroča histerezo, med  $Ac$  in  $Ar$ , ki jo večkrat v praksi kaljenja lahko s pridom izkori-

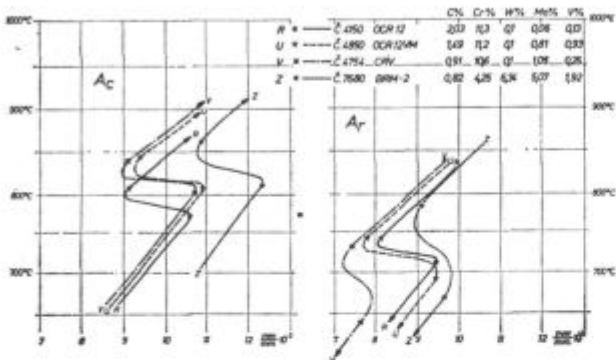


Slika 22

Vpliv ogljika, vanadija in molibdena na premenske točke Ac in Ar za ledeburitno orodno jeklo z 12 Cr

Fig. 22

Influence of carbon, vanadium, molybdenum on the transformation points Ac and Ar for ledeburite tool steel with 12 % Cr.



Slika 23

Primerjava premenskih točk za štiri vrste tipičnih ledeburitnih jekel

Fig. 23

Comparison of transformation points for four typical ledeburite steel.

ščamo. Naj kar takoj omenimo, da si pri ledeburitnih orodnih jeklih ne moremo privoščiti počasnega ohlajanja ali časovnega intervala med padanjem temperature od temperature avstenitizacije do  $Ar_{začetek}$  ker ne smemo dopuščati prekomernega izločanja karbidov iz trdne raztopine.

Iz prikazanega vpliva vanadija na sliki 22 bi sklepali, da je vpliv vanadija neznamenit. Podrobnejša analiza regresije s pomočjo slike 18 pa nam kaže izredno močan vpliv vanadija, obenem pa nam pojasni majhne razlike na sliki 22 zaradi sovpadanja temperatur  $Ar_3$  za 0 in 1 % V.

Sliki 18 in 19 nam zelo nazorno kažeta vpliv molibdena, obenem pa nam nakazujeta sugestije za spremembe kemijske sestave, če želimo potisniti premene Ar k nižjim temperaturam z izkoriščanjem možnosti počasnega prenosa orodij od ogrevanja na temperaturi avstenitizacije do ohlajalnega sredstva z zadržanjem v avstenitnem območju nad  $Ar_{začetek}$ . Te možnosti nam daje visoka vsebnost molibdena ob nižjih vsebnostih drugih legirnih elementov.

Tolerance določanja temperatur premenskih točk s 95 % statistično zanesljivostjo iz kemijske vsebnosti ogljika in karbidotvornih elementov v jeklu znašajo po opravljenih analizah  $\pm 8$  do  $10^\circ C$ .

V drugi seriji regresijskih analiz smo ugotavljali, kateri elementi odločajo, kolikšne so temperaturne razlike med premenskimi točkami. Zanimivo je, da na širino temperaturnega intervala premene alfa-gama pri ogrevanju najmočneje vpliva volfram.

Posebno zanimiva je temperaturna razlika med koncem premene pri ogrevanju in začetkom premene pri ohlajanju. Odvisnost te temperaturne razlike od sestave je prikazana na sliki 20. Žal je, kakor že omenjeno, ta analiza pri ledeburitnih orodnih jeklih le teoretično zanimiva, pri toplotni obdelavi v praksi pa skoraj nima pomena. Z enakim redom velikosti izražajo vpliv V, C, Mo, nekoliko manj pa W in Cr.

Na sliki 21 je obravnavano celotno temperaturno območje premen.

Drugih temperaturnih razlik nismo grafično prikazali, pač pa smo jih analizirali in podali z regresijskimi enačbami.

V tretjem delu regresijskih analiz so zanimivi podatki o jakosti vplivov posameznih elementov na velikost dilatacij v premenskih območjih.

Kot praktično dopolnilo k sliki 22 je na sliki 23 podana primerjava premenskih točk za štiri tipične vrste jekel. Ta primerjava dobro dopolnjuje prejšnje ugotovitve.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel werden die Einflüsse der chemischen Zusammensetzung auf die Umwandlungstemperaturpunkte und auf die teilweise und gesamte Dehnung im Um-

wandlungsbereich für elf Sorten der ledeburitischen Stähle behandelt. Die Regressionsanalyse umfasst folgende Gehaltsbereiche der einzelnen Elemente:

$C = 0.85 - 2.18 \%$ ,  $Cr = 4.29 - 12.7 \%$ ,  $W = 0 - 6.4 \%$ ,  
 $Mo = 0.01 - 5.15 \%$ ,  $V = 0.01 - 1.97 \%$ .

Die festgestellten Regressionsabhängigkeiten besitzen einen hohen Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) und eine verhältnismässig kleine Standardabweichung für den Bereich der 95 % statistischen Sicherheit.

Die Umwandlungspunkte  $A_c$  Anfang und  $A_c$  Ende sind vor allem vom Kohlenstoffgehalt abhängig und erreichen einen Maximum bei einem Gehalt von 1.4—1.6 %. Eine Verminderung oder eine Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes im Vergleich mit diesem Gehalt erniedrigt die Umwandlungstemperaturpunkte. Die Karbidbildenden Elemente beeinflussen die einzelnen Umwandlungspunkte verschieden oder mit verschiedener Stärke, was auf den Nomogrammen und von den Anteilen der Vergrößerung des

Bestimmtheitsmasskoeffizienten für die einzelnen Elemente dargestellt ist.

Molibden hat fast keinen Einfluss auf die Umwandlungstemperaturen beim Erwärmen, jedoch beeinflusst den Umwandlungsverlauf beim Abkühlen stark. Auf diese Weise vergrössert Molibden stark die Hysterese im Umwandlungsbereich.

Der Einfluss von Vanadium ist bedeutend beim Erwärmen sowie beim Abkühlen, es hat einen entscheidenden Einfluss vor allem auf die Umwandlungstemperatur  $A_c$  Anfang wo beim 0.5 % V ein Minimum der Umwandlungstemperatur auftritt, ein grosserer Vanadiumzusatz erhöht diese Temperatur stark.

Wolfram erweitert den Umwandlungstemperaturbereich stark.

## SUMMARY

Influence of the chemical composition on transformation temperatures, and on partial and overall dilatations in the transformation region is presented in the paper for 11 ledeburite tool steel. In analyses of regression the following composition intervals are included: 0.85 to 2.18 % C, 4.29 to 12.7 % Cr, 0 to 6.4 % W, 0.01 to 5.15 % Mo, and 0.01 to 1.97 % V.

The determined regression relationships have a very high degree of determination ( $R^2$ ) and relatively small standard error for the region of 95 % statistic reliability.

Transformations  $A_c$  and  $A_c$  depend mainly on carbon content and the maximum is exhibited at 1.4 to 1.6 % C. Lower and higher carbon values decrease the transformation temperatures. Carbide-forming elements influence the single transformation points in various ways and with dif-

ferent intensity as shown in nomograms and by the increase of the coefficient of determination for single elements.

Molybdenum has nearly no influence on transformation temperatures on heating but it has a very great influence during cooling. Thus hysteresis in the transformation region is highly enlarged.

Influence of vanadium is important in heating and in cooling, the highest influence has on the transformation point  $A_c$  where the minimum is reached at 0.5 % V while higher addition of vanadium intensively increases this temperature.

Tungsten highly enlarges the region of transformation temperatures.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено влияние химического состава на точки преобразования и на парциальные и общие дилатации в пределах преобразования 11-ти марок инструментальных сталей ледобуритного типа. В анализах регрессии включены следующие пределы содержания отдельных элементов:  $C = 0.85 - 2.18 \%$ ,  $Cr = 4.29 - 12.7 \%$ ,  $W = 0 - 6.4 \%$ ,  $Mo = 0.01 - 5.15 \%$ ,  $V = 0.01 - 1.97 \%$ .

Установленные регрессивные зависимости имеют очень высокую степень детерминации ( $R^2$ ) и сравнительно низкую стандартную погрешность в области 95-ти % статистической надежности.

Точки преобразования  $A_c$  начало и  $A_c$  конец зависят главным образом от содержания углерода максимум которого находится при содержании 1.4 — 1.6 %. Снижение или увеличение углерода в отношении на это содержание снижает темп-ру точек преобразования. Карбидообразующие элементы влияют на отдельные точки

преобразования различно, или же с различной силой; это показано на рисунках при помощи номограмм. Влияние оказывает также увеличение коэффициента детерминации на отдельные элементы.

Молибден почти не оказывает влияние на темп-ру преобразования при нагреву, хотя очень сильно влияет на процесс точек преобразования при охлаждении. Таким образом в пределах преобразования значительно увеличивает гистерезис.

Влияние ванадия имеет значение при нагреве а также при охлаждении, но его решающее влияние главным образом на темп-ру преобразования  $A_c$  начало, при которой темп-ра преобразования с содержанием 0.5 % V имеет свой максимум, по мере увеличения содержания ванадия, температура преобразования сильно повышается.

Вольфрам значительно расширяет зону темп-ого преобразования.