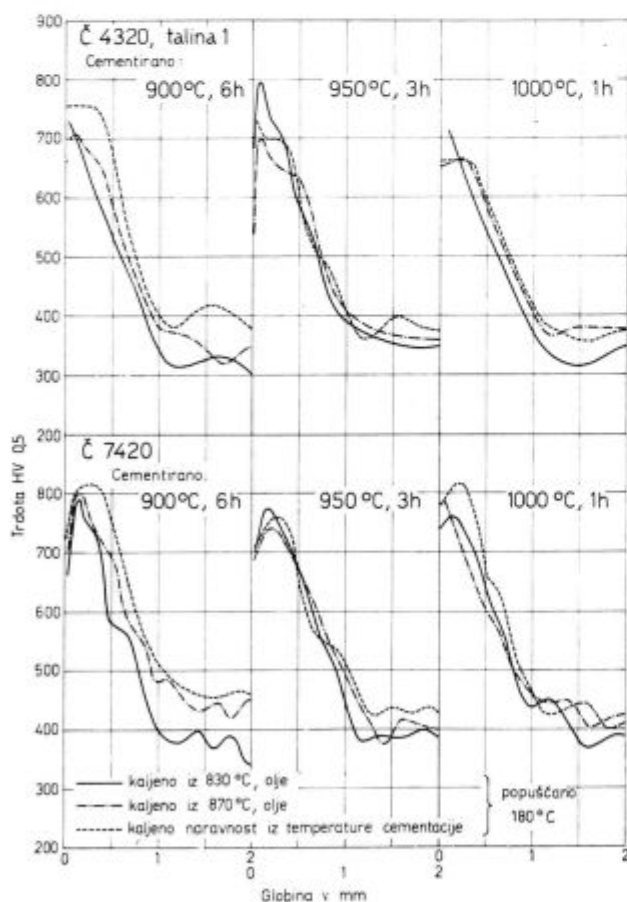


Visokotemperaturna cementacija

II. del: MEHANSKE PREISKAVE

V prvem delu tega članka smo opisali osnovne parametre cementacije pri različnih temperaturah in prikazali nekaj rezultatov metalografskih preiskav. V drugem delu, ki sledi, opisujemo vpliv različnih temperatur cementiranja na nekatere mehanske lastnosti jekla. Preiskali smo trdote jekel po cementaciji in kaljenju in izvršili nekaj upogibnih preiskusov, preiskusov udarne vzvojnne žilavosti in trajne trdnosti.

Preiskave trdot: Za jekli Č. 4320, talina 1 in Č. 7420 smo radialno izmerili trdote za vse načine standardne cementacije in kaljenja. Krivulje trdot kaže diagram na sliki 11. Iz teh krivulj lahko sklepamo:



Slika 11: Krivulje radialnih enot

— Jeklo Č. 7420 daje nekoliko večjo globino kaljenja in večjo trdoto nekaljenega jedra.

— Temperatura kaljenja ne vpliva dosti na globino kaljenja; opaznejše razlike so le pri vzorcih cementiranih na 900°C pri katerih je globina kaljenja večja, če je višja temperatura kaljenja.

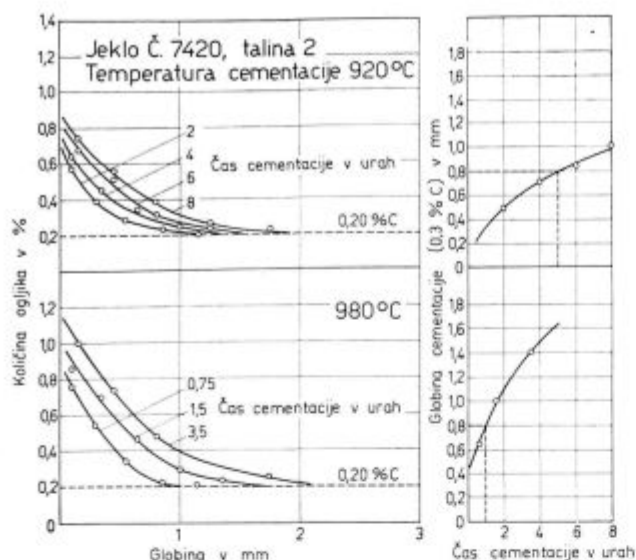
— Nizko trdoto tik pod površino povzroča zaostali avstenit. Če vzamemo kot merilo za nagnjenost k zaostajanju avstenita maksimalno doseženo trdoto in globino, v kateri je ta dosežena, lahko ugotovimo, da ima jeklo Č. 4320 mnogo slabšo kalilnost kot jeklo Č. 7420. Predvsem pa jeklo Č. 4320 ni primerno za direktno kaljenje iz temperatur nad 900°C. Jeklo Č. 7420 sicer tudi obdrži zaostali avstenit tik pod površino, vendar ne toliko, da bi nekaj pod površino ne dosegli zadovoljive trdote. Direktno kaljenje celo izboljša kalilnost tega jekla. Nekoliko slabšo kalilnost kaže to jeklo le po cementaciji na 950°C, kar je verjetno posledica malo višje površinske količine ogljika.

Za nadaljnje mehanske preiskave smo izbrali le jeklo Č. 7420, in sicer dve talini: talino 1 smo že preiskovali, talina 2 je pa nova. Na tabeli 4 vidimo, da sta kemični sestavi obeh talin zelo podobni.

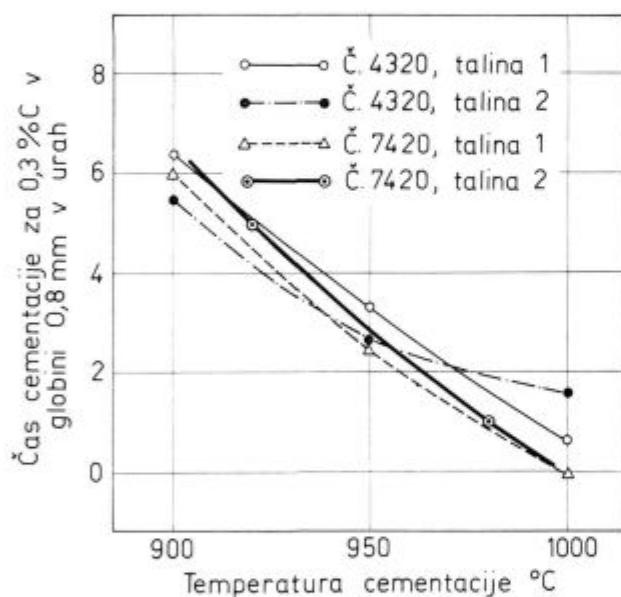
Tabela 4: Kemična sestava talin Č. 7420

Element	Č. 7420 talina 1	Č. 7420 talina 2
C	0,19	0,20
Si	0,27	0,30
Mn	0,73	0,70
P	0,02	0,027
S	0,016	0,014
Cr	0,43	0,50
Ni	0,15	0,12
Mo	0,45	0,48
Al _{netopen}	0,004	0,004
Al _{topen}	0,003	0,018
Vel. zrn ASTM	8	8

Mimo tega smo poenostavili načine cementiranja in kaljenja. Odločili smo se le za dve temperaturi cementacije in sicer 920 in 980°C. Nižja velja za normalno temperaturo cementiranja v plinih, dočim je cementiranje na 980°C visokotemperaturno. Namen nadaljnjih preiskav je bil torej primerjati lastnosti jekla po cementaciji na teh dveh temperaturah. Pri tem je seveda važno, da vzorce na obeh temperaturah enako globoko ce-



Slika 12: Količina ogljika v cementirani plasti po različnih temperaturah in globina cementiranja in globina cementacije v odvisnosti od časa cementiranja za jeklo Č. 7420, talina 2 in kaljenih preizkušancev jekla Č. 7420



Slika 13: Čas standardnega cementiranja v odvisnosti od temperature

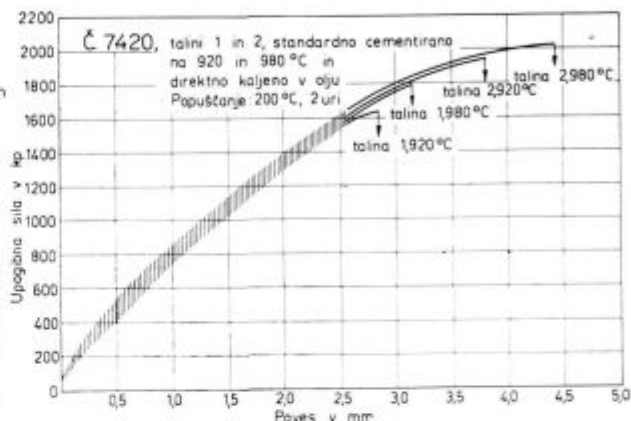
mentiramo, to je toliko časa, da na obeh temperaturah dosežemo standardno cementacijo z 0,3 % C v globini 0,8 mm. Za talino 1 že imamo podatke (glej I. del), dočim smo morali za talino 2 dodatno napraviti preizkuse za določitev standardne cementacije. Valjaste vzorce premera 20 mm smo na obeh temperaturah cementirali različne čase in s kemično analizo odstrujenih plasti ugotavljali količine ogljika iz površine v notranjost. Rezultate kaže slika 12. Krivulje kažejo, da dosežemo standardno cementacijo pri 920°C po 5 urah, pri 980°C pa po eni uri cementiranja. Iz diagrama na sliki 13 pa vidimo, da poteka cementiranje jekla Č. 7420, taline 2 zelo podobno kot cementiranje taline 1 in

obeh talin jekla Č. 4320, katere smo že preiskovali (glej I. del). Vse preiskuvance, ki smo jih potrebovali za nadaljne mehanske preiskave smo torej cementirali

- pri 920°C 5 ur in
- pri 980°C 1 uro.

Preiskuvance smo kalili na različne načine (podatke navajamo pri posameznih preizkusih), dočim smo jih enako popuščali na 200°C, 1 uro.

Statični upogibni preizkusi: Upogibali smo preizkuvance premera 12 mm in dolžine 200 mm med podporama z razmakom 134 mm. Preizkuse smo vršili s hitrostjo obremenjevanja 4 kp/s. Po dva preizkušanca vsake taline smo cementirali na 920 in 980°C, vse pa po cementaciji direktno kalili v



Slika 14: Upogibne krivulje

olju. Na tabeli 5 so podatki vseh teh preizkusov, dočim kaže slika 14 upogibne krivulje v koordinatah upogibna sila — poves. Vse vrednosti so povprečje obeh paralelnih preizkusov.

Tabela 5: Rezultati statičnih upogibnih preizkusov.

Jeklo	Temperatura standardne cementacije in direktnega kaljenja v °C	Poves f mm	Upogibna trdnost σ_{sm} kp/mm ²
Č. 7420, talina 1	920	2,85	324
	980	3,15	355
Č. 7420, talina 2	920	3,80	385
	980	4,43	401

Podatki na tabeli 5 in upogibne krivulje na sliki 14 kažejo, da daje cementacija pri višji temperaturi boljše upogibne vrednosti kot cementacija pri 920°C, ki je sicer v navadi.

Preizkusi udarne vzvojne žilavosti: Ta preizkus uporabljamo za določevanje žilavosti rdihih materialov. Preizkus udarne žilavosti ob zarezi, ki je v navadi za konstrukcijske materiale (Charpy), daje pri trdihih materialih zelo nizke vrednosti in majhne razlike, tako da ne moremo ločiti različno žilavihi jekel.

Preizkuse smo vršili na stroju »Carpenter«. Obliko in mere preizkušancev za ta stroj kaže slika 15. Po navodilu za ta stroj izračunamo udarno vzvojno žilavost takole:

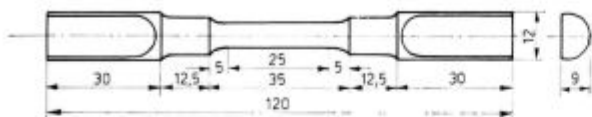
$$\rho_v = K \cdot (n_1^2 - n_2^2)$$

ρ_v = udarna vzvojna žilavost v kpm

K = konstanta stroja (0,000498)

n_1 = začetno število obratov v minuti

n_2 = število obratov v minuti po lomu.



Slika 15: Preizkušanec za preizkus udarne vzvojne žilavosti

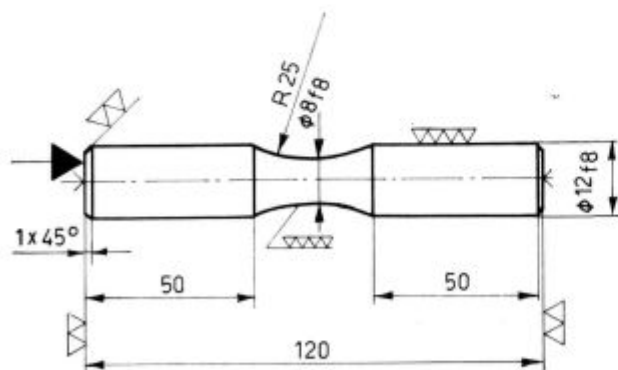
Vsi rezultati udarne vzvojne žilavosti, ki jih navajamo so povprečje štirih preizkusov. Omenimo naj le, da rezultati paralelk niso bistveno različni. Preizkušance smo standardno cementirali na 920 in 980°C in jih direktno kalili. Rezultate vsebuje tabela 6.

Tabela 6: Rezultati preizkusov udarne vzvojne žilavosti

Standardna cementacija na temperaturi °C	Način kaljenja	Udarne vzvojne žilavost v kpm	
		Č. 7420, talina 1	Č. 7320, talina 2
920	direktno	98,8	96,0
980	direktno	97,2	101,2

Rezultati kažejo, da temperatura cementacije ne vpliva na udarno vzvojno žilavost. Tudi med obema talinama ni bistvenih razlik.

Preizkusi trajne nihajne trdnosti: Trajne nihajne trdnosti smo ugotavljali z vrtilno upogibnimi trajnimi preizkusi. Odločili smo se za kratki preizkušanec (slika 16), ki je enostransko vpet in ima spremenljiv upogibni moment, ki linearno nara-



Na $\phi 8$ mm zarezu globine 0,2 mm in polmerom zaokrožitve 0,1 mm

Slika 16: Preizkušanec za preizkus trajne nihajne trdnosti

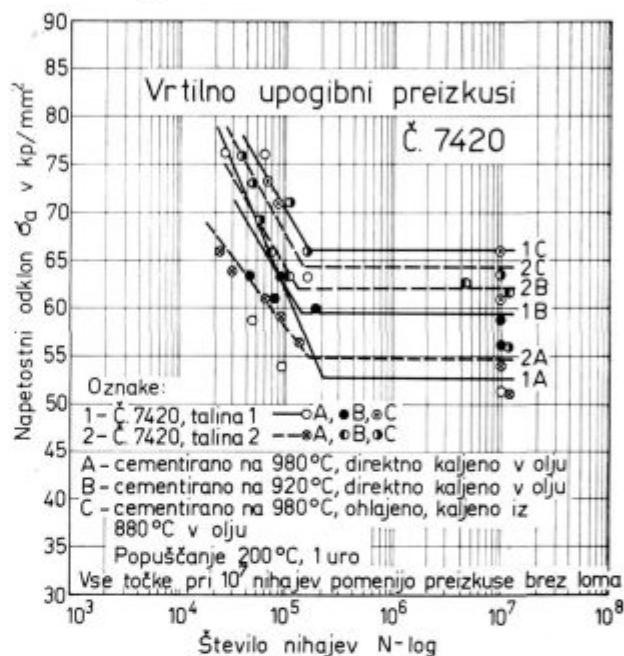
šča od točke vpetja do prijemališča upogibne sile. Vse preizkušance smo v sredini zarezali do globine 0,2 mm s polmerom zaokrožitve zarezu 0,1 mm. Dno zarezu je pri okoli 0,85 % C.

Za vsako od obeh talin smo določili Wöhlerjeve krivulje za sledeče variante cementiranja in kaljenja:

— standardno cementirano na 920°C in direktno kaljeno,

— standardno cementirano na 980°C in direktno kaljeno,

— standardno cementirano na 980°C, ohlajeno in nato kaljeno iz 880°C.



Slika 17: Wöhlerjeve krivulje različno cementiranih

Wöhlerjeve krivulje kaže slika 17, trajne trdnosti pa so navedne v tabeli 7.

Tabela 7: Trajno nihanje trdnosti

Oznaka (slika 17)	Talina jekla Č. 7420	Cementacija na temperaturi °C	Kaljenje	Trajna trdnost kp/mm²
1 A	1	980	direktno	52,8
1 B	1	920	direktno	59,5
1 C	1	980-ohlajeno	880°C	66,0
2 A	2	980	direktno	54,8
2 B	2	920	direktno	62,0
2 C	2	980-ohlajeno	880°C	64,5

Razlika med talinama 1 in 2 ni bistvena — pri direktnih kaljenjih ima talina 2 nekoliko višjo trajno trdnost, pri kaljenju iz 880°C pa talina 1.

Pri obeh talinah pa opazimo zelo jasno razliko pri različnih režimih cementiranja in kaljenja. Najnižjo trajno trdnost ima jeklo, cementirano na 980°C in direktno kaljeno, občutno višjo pa jeklo,

cementirano na 920° C in direktno kaljeno. Vsiljuje se vprašanje, ali se z višjo temperaturo slabša trajna trdnost zaradi visokotemperaturnega cementiranja ali zaradi direktnega kaljenja. Wöhlerjevi krivulji 1 C in 2 C, za kateri so bili preizkušanci standardno cementirani na 980° C, nato pa ohlajeni in kaljeni iz 880° C kažeta namreč najvišjo trajno trdnost. Zelo je torej verjetno, da cementiranje pri visoki temperaturi ne poslabša trajne trdnosti če nato jeklo ohladimo in kalimo iz nižje temperature in da jeklu poslabša trajno trdnost direktno kaljenje iz visoke temperature.

Sklepi: Iz rezultatov, ki smo jih dobili pri raziskovanju vpliva visokotemperaturne cementacije na mehanske lastnosti jekla lahko sklepamo sledeče:

— Krivulje radialnih trdot kažejo, da je kalilnost jekla Č. 7420 boljša kot jekla Č. 4320 in da je jeklo Č. 7420 primernejše za visokotemperaturno cementacijo in direktno kaljenje.

— Statični upogibni preizkus jekla, cementiranega pri visoki temperaturi (980° C) daje boljše upogibne karakteristike (poves, upogibna trdnost) kot preizkus jekla, cementiranega pri normalni temperaturi (920° C).

— Temperatura cementacije (920° C odnosno 980° C) ne vpliva na udarno vzvojno žilavost.

— Iz rezultatov trajnih trdnosti lahko sklepamo, da temperatura cementiranja ne vpliva na trajno trdnost, dočim direktno kaljenje, posebno iz visoke cementacijske temperature občutno znižuje trajno trdnost.

ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil dieses Artikels (Z. Z., 1967, 1, Nr. 1) beschrieben wir die Grundparameter der Hochtemperaturzementierung. Die Zementierung tätigten wir mit Stadtgas bei Temperaturen von 900, 950 und 1000° C und verschieden lang: 2, 4, 6 und 8 Stunden (die Apparatur für die Zementierung zeigt Bild 1, die Gaszusammensetzung die Tabelle 1). Wir untersuchten zwei Stahlsorten, deren chemische Zusammensetzung die Tabelle 2 zeigt. Die Gradienten der Kohlenstoffkonzentration für die verschiedenen Temperaturen und Zementierungsdauer zeigen die Diagramme auf den Abbildungen 3, 4 und 5. Wir stellten fest, dass wir die Standardzementierung (0,3% C in der Tiefe von 0,8 mm) erreichten:

- bei 900° C nach 6 Stunden Zementierung,
- bei 900° C nach 6 Stunden Zementierung,
- bei 950° C nach 3 Stunden Zementierung und
- bei 1000° C nach 1 Stunde Zementierung.

Die Oberflächenmenge an Kohlenstoff ist die grösste bei der Zementierung auf 950° C, besonders bei Chrom-

stahl C 4320 (Bild 7). Jedoch auch bei dieser Temperatur übersteigt die Standardzementierung nicht 1,25% C.

Wir untersuchten metallographisch den Stahl C 7420 und stellten fest, dass nach längerer Zementierungszeit auf 950 und 1000° C die Kristallkörner schwellen. Jedoch nach den Zeiten für die Standardzementierung ist diese Erscheinung noch nicht ausgeprägt (Abbildungen 8, 9 und 10).

Im II. Teil beschreiben wir den Einfluss der Hochtemperaturzementierung auf einige mechanische Eigenschaften des Stahles. Die Versuchsstücke wurden standardzementiert auf 920 und 980° C. Die Resultate des Biegeversuches sind besser, wenn wir den Stahl bei höherer Temperatur zementieren (Bild 14). Die mittels des Schlagdrehversuches bestimmte Zähigkeit des Stahls ist sehr gut und hängt nicht von der Zementierungstemperatur ab. Die Dauerfestigkeit bestimmten wir mit dem Umlaufbiegeversuch. Aus den Resultaten schliessen wir, dass die Zementierungstemperatur keinen Einfluss auf die Dauerfestigkeit hat, während direktes Härten, besonders aus hoher Zementierungstemperatur empfindlich die Dauerfestigkeit reduziert. (Bild 17 und Tabelle 7).

SUMMARY

In the first part of this article (Z. Z., 1967, 1, No. 1) the basic parameters of high temperature cementation were described. Cementation was carried out in city gas at temperatures 900°, 950° and 1000° centigrades for different periods: 2, 4, 6 and 8 hour (Fig. 1 is showing the arrangement for cementation and table 1 gas analysis). Two grades of steel were examined. Chemical analysis is shown in table 2. Carbon concentration gradients for different temperatures and time of cementation are shown in graphs of figure 3, 4 and 5. It was found out that standard cementation (0,6% C case depth 0,8 mm) was attained

- at 900° C after 6 hour cementation period
- 950° C after 3 hour cementation period
- 1000° C after 1 hour cementation period

The highest surface carbon concentration is shown at 950° C cementation, particularly for chromium steel C 4320 (Fig. 7). Nevertheless if standard cementation is employed it never exceeds 1,25% C.

Under microscope steel C 7420 was examined and found that after longer periods of cementation at 950 and 1000° C the grain size is increasing. Nevertheless after periods of standard cementation this phenomenon is not severe (Fig. 8, 9 and 10).

In part two the high temperature cementation influence on some mechanical properties is described. Standard cementation for the samples was carried out at 920 and 980° C. Bend test results are better if cementation is carried out at higher temperatures (Fig. 14). Impact strength determined by torsional impact test is very good and does not depend upon cementation temperature.