

# Primerjalne preiskave konvencionalnega in kontinuirno ulitega cementacijskega jekla Č. 4320, ki je legirano z niobijem

UDK: 669.14.018-298:620.17

ASM/SLA: Ay-b, S21, Nb

D. Kmetič, F. Vodopivec, F. Vizjak,  
J. Žvokelj, B. Arzenšek

Zaradi ekonomskih prednosti se vedno večji delež jekla lije po kontinuirnih postopkih. Od slovenskih železarn je napravo za konti litje prva dobila Železarna Store in za njo Železarna Jesenice. Predelovalna industrija bo imela na razpolago vedno več konti jekla. Zaradi specifičnih lastnosti, ki izvirajo iz načina izdelave, so za uporabnost teh jekel potrebne določene preiskave.

Namen dela je seznaniti uporabnike z lastnostmi in uporabnostjo cementacijskega jekla Č. 4320, pri katerem smo dosegli afinacijo kristalnih zrn z niobijem.

## 1. UVOD

Od kvalitetnih konstrukcijskih jekel, zlasti cementacijskih, se zahteva poleg homogenosti in predpisanih mehanskih lastnosti tudi določena velikost primarnih in sekundarnih kristalnih zrn. Za afinacijo kristalnih zrn se najpogosteje uporablja aluminij. Pri konti litju gredic manjšega preseka, jekla v ponovci ne moremo pomirjati z aluminijem, ker se vključki aluminijevega oksida nabirajo v izlivnem kanalu in onemogočajo normalno litje. Nekaj aluminija sicer dodajajo pri litju v curek, vendar premalo, da bi imelo jeklo dovolj topnega aluminija, torej aluminija, vezanega v nitrid, ki regulira velikost kristalnih zrn.

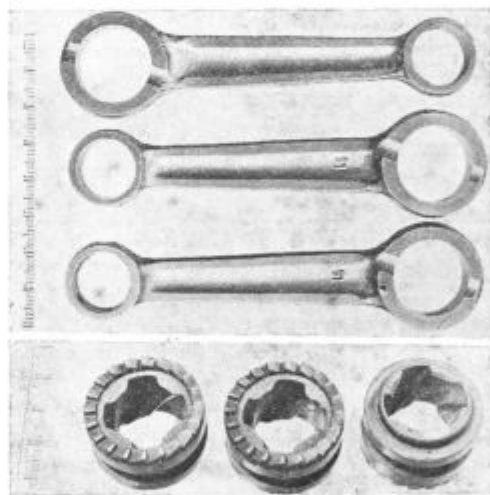
Podoben afinacijski učinek kot aluminij ima niobij, ki pa pri litju ne povzroča nobenih težav. Tudi v kristalizacijski strukturi gredic ni razlik v primerjavi s talinami brez dodatka niobija.

V prvem delu razprave<sup>1,2</sup> smo obravnavali fizikalno metalurške značilnosti cementacijskega jekla Č. 4320 z dodatkom niobija. V tem nadaljevanju obravnavamo njegovo obnašanje pri toplotni obdelavi in cementaciji ter ga primerjamo z jeklom iste vrste, v katerem so kristalna zrna stabilizirana z aluminijem.

## 2. REZULTATI PREISKAV

### 2.1. Izdelava motorskih delov

Da bi ugotovili, kako se to jeklo obnese v praksi, smo v sodelovanju z UNIOR-jem in TOMOS-om izbrali za preiskave dva elementa motorja (sl. 1), ojnico in sojemalec (zagonski zobnik). Tako smo lahko poleg fizikalno metalurških preiskav naredili tudi tehnološke preizkuse na pulzatorju (ojnice) in trajnostne preizkuse sojemalcev.



Slika 1

Makroposnetek ojnice in sojemalcev izdelanih iz konti jekla Č. 4320 legiranega z Nb

Fig. 1

Macropicture of shaft and starter toothed wheel made of continuously cast Č. 4320 steel alloyed with niobium

Kemična sestava primerjalnega konvencionalnega jekla Č. 4320 in konti jekla, kjer smo kot afinator uporabili niobij, je podana v tabeli 1.

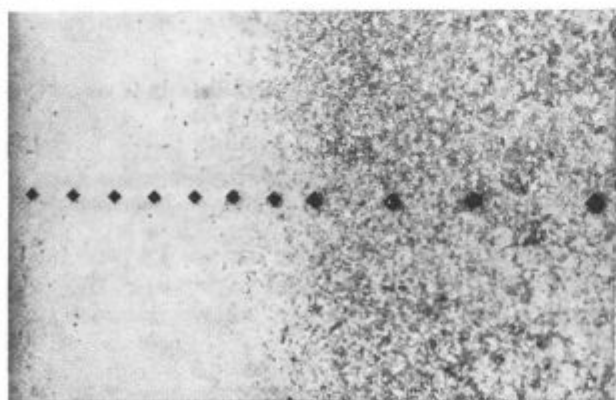
Tabela 1: Kemična sestava jekel v %

Jeklo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Al <sub>topni</sub>
Č. 4320	0,16	0,18	1,05	0,016	0,014	0,88	—	0,01
Č. 4320 Nb	0,14	0,26	1,0	0,015	0,019	0,85	0,02	—

Ojnice smo utopno skovali v UNIOR-ju. V TOMOS-u so jih mehansko obdelali, izdelali sojemalce in vzorce toplotno obdelali v cementacijski peči IPSEN 4 pri enakih pogojih kot teče redna proizvodnja teh elementov. Sojemalci so v celoti cementirani, pri ojnicah pa je cementirano le večje oko, v katerem teče kotalni ležaj, steblo in manjše oko (drsní ležaj) pa sta pri cementaciji zaščitena s pasto No-Carb. Najvažnejši parametri termične obdelave in zahtevane ter izmerjene globine cementacije in trdote so navedene v tabeli 2.

Tabela 2:

	Ojnice	Sojemalci
Temperatura cementacije	920° C	920° C
Čas naogljčevanja	4,5 ure	2 uri
Temperatura kaljenja	820° C	820° C
Temperatura popuščanja	150° C	180° C
Čas popuščanja	60 min.	60 min.
Zahtevana globina cementacije	0,8—1,1 mm	0,2—0,4 mm
Dosežena globina cementacije	0,85 mm	0,4 mm
Zahtevana trdota cementiranih delov	60—64 HRC	56—60 HRC
Dosežena trdota cementiranih delov (Č. 4320)	63,2 HRC	59 HRC
Dosežena trdota cementiranih delov (Č. 4320 Nb)	61,7 HRC	57,9 HRC
Zahtevana trdota stebila ojnice	30—45 HRC	—
Dosežena trdota stebila ojnice (Č. 4320)	39,6 HRC	
Dosežena trdota stebila ojnice (Č. 4320 Nb)	36,1 HRC	

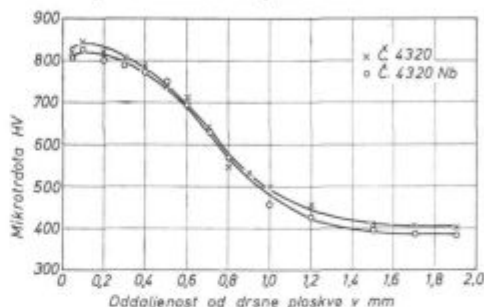


Slika 2

Povečava 50 ×. Mikrostruktura cementirane plasti na ojnici in na zobu sojemalca — jeklo Č. 4320 Nb

## 2.2. Mikrostruktura in trdota

Mikrostruktura ojnic in sojemalcev je podobna pri obeh vrstah jekel. Cementirana plast ima martenzitno mikrostrukturo, ki proti notranjosti prehaja v mešano martenzitno bainitno mikrostrukturo (sl. 2). Tudi na necementiranem delu ojnice je mikrostruktura ob robu martenzitna, v notranjosti pa martenzitno bainitna (sl. 3). Delež martenzita v mikrostrukturi je odvisen od velikosti preseka, saj so manjši preseki bolj prekaljeni. Večja kristalna zrna, ki jih opazimo na nekaterih presekih ojnice, so značilna za področja, ki so bila pri zadnjem udarcu kladiva le malo deformirana (kritična stopnja deformacije). Na teh mestih je prekaljivost boljša zaradi večjih zrn.

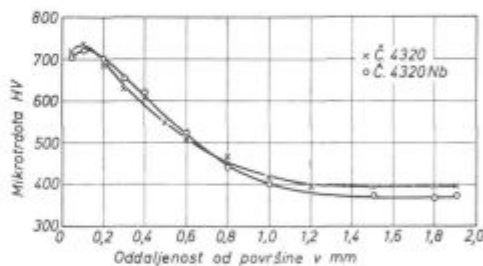


Slika 5

Potek mikrotrdote na cementiranem delu ojnice

Fig. 5

Variation of microhardness in the case of the shaft



Slika 6

Potek mikrotrdote pri sojemalcih

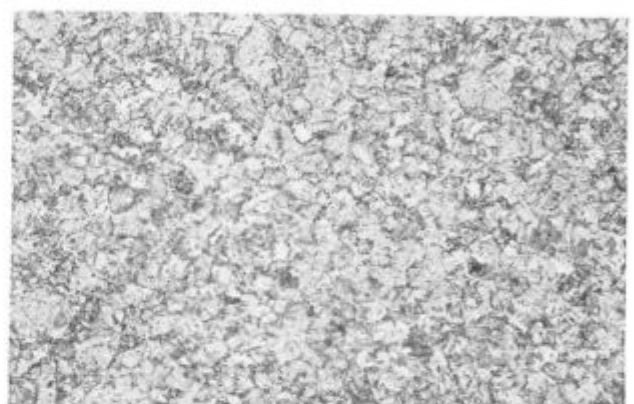
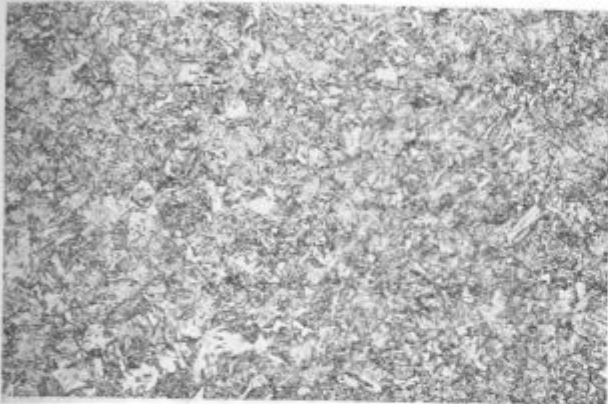
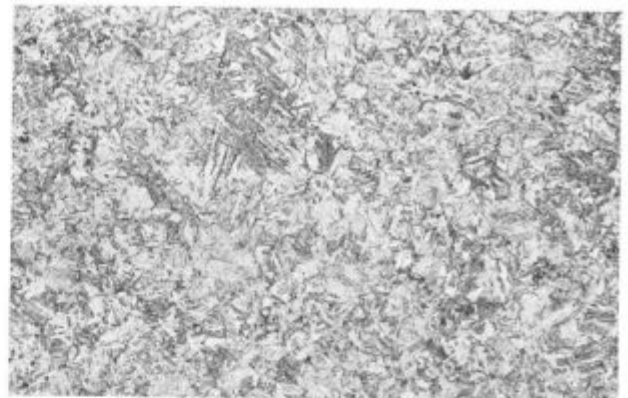
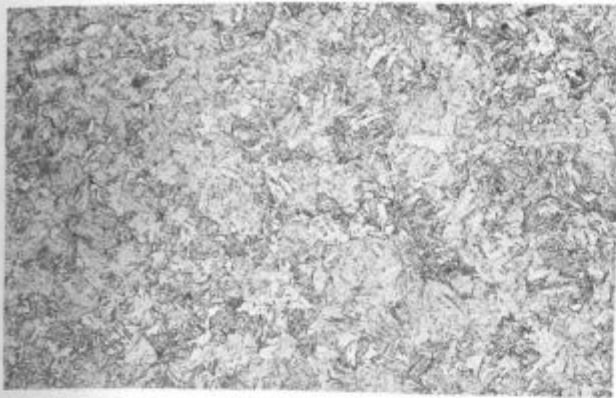
Fig. 6

Variation of hardness in the starter toothed wheel



Fig. 2

Magnification 50 ×. Microstructure of the case on the shaft and the tooth of the starter toothed wheel — Č. 4320 Nb steel

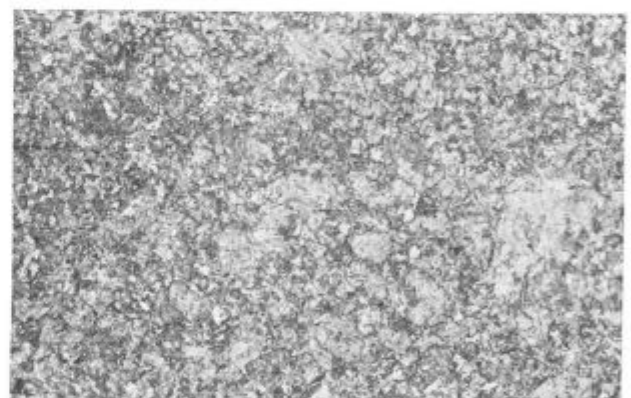
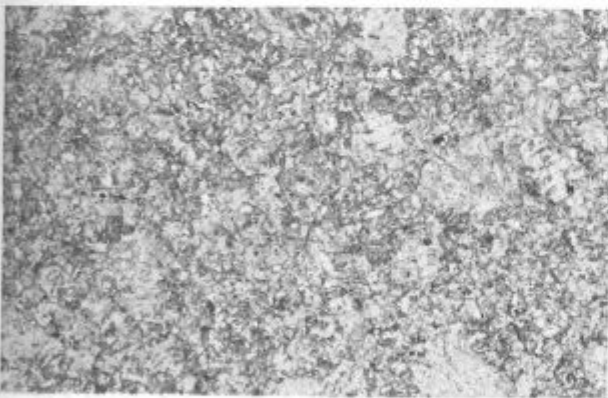


Slika 3

Povečava 200 ×. Martenzitno bainitna mikrostruktura na sredini dveh različnih presekov ojnice — levo konvencionalno jeklo Č. 4320, desno konti jeklo Č. 4320 Nb

Fig. 3

Magnification 200 ×. Martensite bainitic microstructure in the centre of two various sections of the shaft — left: conventional Č. 4320 steel, right: continuously cast Č. 4320 Nb steel



Slika 4

Povečava 100 ×. Martenzitno bainitna mikrostruktura na sredini preseka sojemalca — levo konvencionalno jeklo Č. 4320, desno konti jeklo Č. 4320 Nb

Fig. 4

Magnification 100 ×. Martensite bainitic microstructure in the centre of cross section of the starter toothed wheel — left: conventional Č. 4320 steel, right: continuously cast Č. 4320 Nb steel

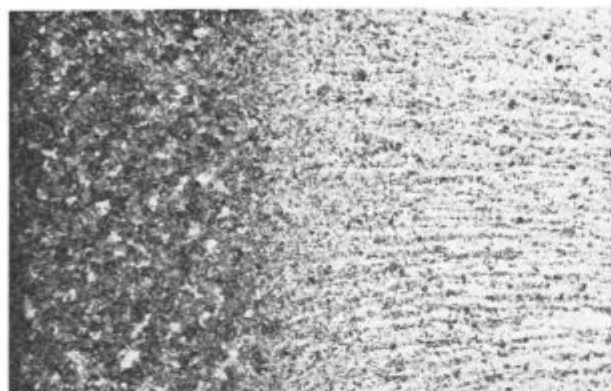
Avstenitna zrna so pri ojnica finejša kot pri sojemalcih (sl. 4) zaradi večje stopnje deformacije jekla in nizke končne temperature kovanja (1020—1050° C). V velikosti avstenitnih zrn med obema jekloma ne opazimo razlike. Vzorci iz konti jekla imajo v strukturi nekaj več bainita in bainitnega ferita.

Makro trdote cementirane plasti in jedra ojnice in sojemalcev ustrezajo predpisanim vrednostim. Globino cementirane plasti smo določili iz profilov mikro trdot (sl. 5 in 6) v odnosu na mejno trdoto, ki smo jo izračunali po enačbi (5):

$$G = 0,6 M + 0,4 J$$

Pri tem pomenijo G mejno trdoto globine cementacije, M maksimalno trdoto cementirane plasti in J trdoto jedra. Povprečna globina cementirane plasti je pri obeh vrstah jekel enaka in znaša pri ojnica 0,85 mm in pri sojemalcih 0,4 mm. Globino cementacije smo določili tudi metalografsko na normaliziranih vzorcih (sl. 7). Izmerjene vrednosti se dobro ujemajo z izračunanimi.

Meritve makro in mikro trdote so pokazale, da so ojnice in zobniki, izdelani iz konti jekla, nekoliko mehkejši.



Slika 7

Povečava 50 ×. Normalizirana mikrostruktura cementirane dela ojnice iz konvencionalnega jekla Č. 4320 (levo) in iz konti jekla Č. 4320 Nb (desno)

cementiranih vzorcih je pri absolutnih vrednostih trajne vrtilno upogibne trdnosti med jekloma določena razlika. Razmerje med trajno vrtilno upogibno in natezno trdnostjo je pri teh vzorcih bistveno višje kot pri kaljenih in popuščenih (0,67 oz. 0,65) in tudi v tem primeru ni odvisno od načina izdelave jekla. Pri nateznem preizkusu se cementirana plast krhko lomi, žilavost jedra ne pride do izraza in preizkušanci imajo nižje vrednosti mehanskih lastnosti kot v kaljenem in popuščenem stanju. Cementirana plast pa zaradi

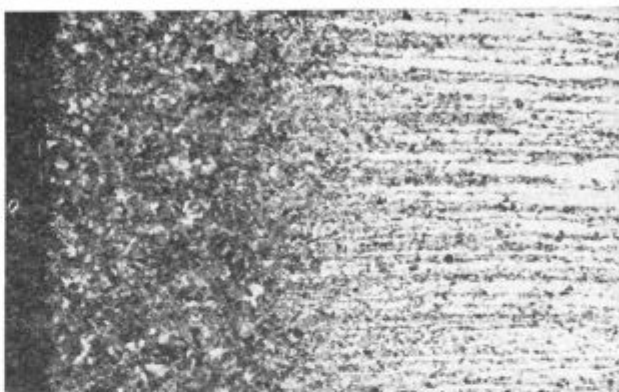


Fig. 7

Magnification 50 ×. Normalized microstructure of the case of the shaft made of conventional Č. 4320 steel (left) and of continuously cast Č. 4320 Nb steel (right)

### 2.3. Mehanske lastnosti

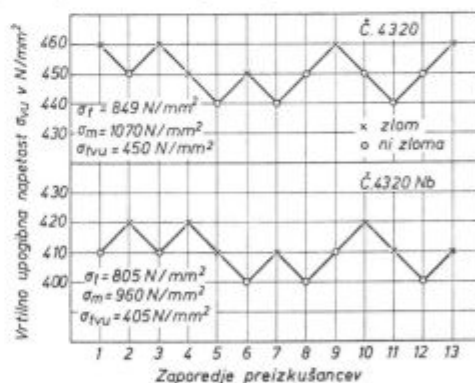
Cementirane vzorce za določitev mehanskih lastnosti smo termično obdelali istočasno z ojnica, kaljene in popuščane pa smo pripravili na Metalurškem inštitutu pri enakih temperaturah, kot so bile obdelane ojnice (tabela 2).

Mehanske lastnosti kaljenih in popuščenih preizkušancev ustrezajo v standardih predpisanim vrednostim. Meja plastičnosti in natezna trdnost sta pri konti jeklu nekaj nižji, pri raztezu (15 %) in kontrakciji (40 %) pa med jekloma ni razlike. V konti jeklu smo opazili večje silikatne vključke, ki izvirajo iz procesa izdelave jekla. V velikosti kristalnih zrn ni razlike. Zato lahko razlike v mehanskih lastnostih in tudi v trdoti pripišemo različni kemični sestavi jekla, saj ima konvencionalno jeklo  $C_{ekv}$  0,524, konti jeklo pa 0,488.

Za vrednotenje uporabnosti konstrukcijskih jekel je pomembna dinamična trajna trdnost, saj so strojni elementi večinoma obremenjeni izmenično. Dinamične lastnosti smo določili enkrat na za to pripravljenih preizkušancih in drugič direktno na ojnica, oz. na zagonskih zobnikih.

Trajno vrtilno upogibno trdnost smo določili po metodi stopnic (7). Pri kaljenih in popuščenih vzorcih imata jekla zaradi odstopanj v kemični sestavi različno trajno dinamično trdnost. Razmerje trajne vrtilno upogibne in natezne trdnosti pa je pri obeh jeklih enako in znaša 0,42. Tudi pri

svoje trdote močno poviša vrtilno upogibno trdnost, ker je pri taki obremenitvi najmočneje obremenjena površinska plast preizkušanca.



Slika 8

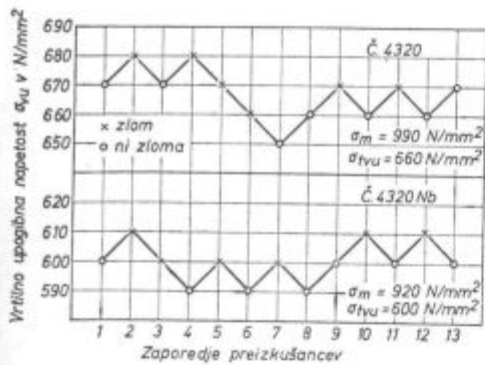
Potek vrtilno upogibnih preizkušanj za obe vrsti jekla v poboljšanim stanju

Fig. 8

Rotation-bending testing of both steel after quenching and tempering

V diagramih na slikah 8 in 9 je prikazan potek vrtilno upogibnih preizkušanj. Navedene so tudi vrednosti meje plastičnosti ( $\sigma$ ), natezne trdnosti ( $\sigma_m$ ) in trajno vrtilno upogibne trdnosti ( $\sigma_{tv}$ ).

Najustreznejše podatke o trajni trdnosti smo dobili z neposrednim preizkušanjem ojnica na statično dinamičnem preizkuševalnem stroju IN-



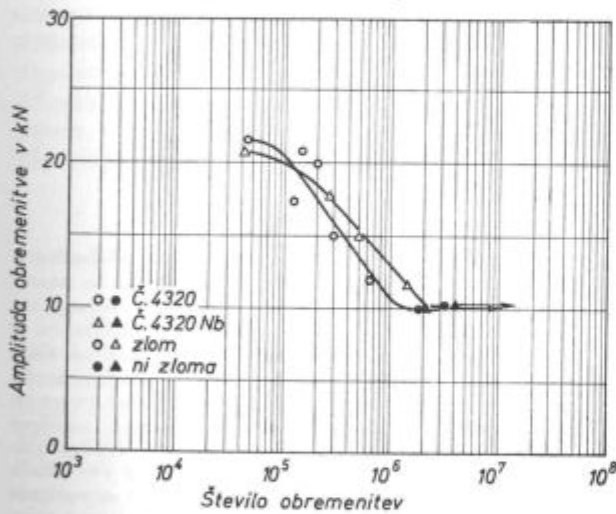
Slika 9

Potek vrtilno upogibnih preizkušanj za obe vrsti jekla v cementiranem stanju

Fig. 9

Rotation-bending testing of both steel being case hardened

STRON (500 KN). Preizkušali smo steblo ojníc, ki je kaljeno in popuščeno. Obe očesi, cementirano in necementirano, sta vpeti v čeljusti. Olnice smo pulzirali pri frekvenci 25 Hz. Na lom ojníc vplivajo številni dejavniki (mehanske lastnosti, mikrostruktura, napake na površini, obdelava površine), zato so se ojnice lomile v širšem področju najožjega preseka stebila. Wöhlerjevi krivulji za obe vrsti ojníc sta prikazani v diagramu na sliki 10.



Slika 10

Wöhlerjevi krivulji za obe vrsti ojníc

Fig. 10

Wöhler curve for both shafts

Trajna dinamična trdnost je pri obeh vrstah ojníc skoraj enaka. V področju, kjer pride do zloma pri končnem številu nihajev (malonihajna utrujenost), ko so amplitude cikličnih napetosti tako visoke, da prihaja do elastično plastičnih deformacij, se krivulji nekoliko razlikujeta.

Sojemalce smo v TOMOS-u preizkušali na napravi, ki ponazarja delovanje v motorju. Obremenitev v motorju je 3 Nm. Preizkušanci iz obeh vrst jekla so vzdržali predpisano število zagonov (23000). Tudi pri povišani obremenitvi ni prišlo do lomov zob, niti nismo opazili nobenih znakov obrabe.

### 3. ZAKLJUČEK

Iz industrijskega jekla Č. 4320 z dodatkom niobija in brez aluminija smo izdelali in toplotno obdelali preizkusne vzorce dveh elementov motorja, ojnice in sojemalce. Fizikalno metalurške lastnosti jekla in rezultate tehnoloških preizkusov smo primerjali z vzorci iz konvencionalnega jekla. Mehanske lastnosti konti jekla ustrezajo vrednostim, ki jih predpisujejo standardi. Zlasti je pomembno, da je razmerje med dinamičnimi in statičnimi lastnostmi pri obeh jeklih enako in da imajo motorski deli ustrezno trajno trdnost. Niobij ne vpliva na cementacijsko sposobnost jekla. Vpliva pa posredno na kaljivost, saj je finejša mikrostruktura slabše prekaljiva.

Na osnovi teh primerjalnih preiskav lahko zaključimo, da ima dobro izdelano konti jeklo Č. 4320, pri katerem smo dosegli afinacijo kristalnih zrn z niobijem, ustrezne mehanske lastnosti in velikost kristalnih zrn. Pri izdelavi elementov, pri katerih je potrebna daljša toplotna obdelava pri temperaturah nad 900 °C, ima to jeklo zaradi večje stabilnosti avstenitne strukture boljše lastnosti kot konvencionalno jeklo.

### Literatura

1. F. Vodopivec, G. Manojlovič, F. Vizjak, O. Kürner, D. Gnidovec: Afinacija avstenitnih in feritnih zrn v kontinuirno ulitih jeklih. Poročilo MI, Ljubljana 1977 (objavljeno v Zelezarskem zborniku)
2. F. Vodopivec, F. Vizjak, G. Manojlovič, D. Kmetič: Afinacija kristalnih zrn v kontinuirno litih jeklih, Poročilo MI, Ljubljana 1979 (objavljeno v Zelezarskem zborniku)
3. D. Kmetič, F. Vodopivec, M. Gabrovšek: Kinetika nastajanja ferita v mikrolegiranem jeklu, Zelezarski zbornik, št. 1/2, 1980 (39-47)
4. F. Vodopivec: Opredelitev parametrov za perlitno kovanje. Poročilo MI, 1978
5. J. Žumer: Globina cementacije pod kritično lupo, Zbornik posvetovanja o toplotni obdelavi, Ravne na Koroškem 1980 (112-122)
6. D. Kmetič, F. Vodopivec, B. Ralič: Uvodjenje korištenja elektronske mikroskopske u rešavanju tehnoloških problema crne metalurgije — IX., Ispitivanje konti livenog i konvencionalno livenih kvalitetnih čelika istih vrsta, Poročilo MI, 1979
7. J. Zvokelj: Preizkušanje vrtilno upogibne trdnosti nekaterih konstrukcijskih in orodnih jekel, Poročilo MI, 1974
8. J. Zvokelj: Ponašanje jekel pri utrujanju z nizkim številom nihajev do loma, Poročilo MI, 1979

## ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grund der vorherigen Untersuchungen haben wir aus einer industriellen Stahlschmelze eines mit Niobium legierten Einsatzstahles, Č. 4320 ohne Aluminiumgehalt zwei Versuchselemente des Otomotors, die Kurbelwelle und das Antriebszahnrad hergestellt und wärmebehandelt. Die physikalischen und metallurgischen Eigenschaften des Stahles und die Ergebnisse der technologischen Versuche sind mit den Ergebnissen, erhalten an Teilen aus konventionell hergestellten Stahles verglichen worden. Die mechanischen Eigenschaften des stranggegossenen Stahles entsprechen den Werten die durch Normen vorgeschrieben sind.

Es ist sehr wichtig, dass das Verhältnis zwischen den dynamischen und statischen Eigenschaften bei beiden Stählen gleich ist, und dass die Motorenteile eine ent-

sprechende Dauerfestigkeit besitzen. Niobium beeinflusst nicht die Einsatzhärtungsfähigkeit des Stahles. Indirekt beeinflusst er die Härtbarkeit, denn das feinere Mikrogefüge ist schlechter durchhärterbar.

Die Ergebnisse zeigten, dass ein gut hergestellter und stranggegossener Einsatzstahl Č. 4320, bei dem die Affination der Kristallkörner durch Niobium erzielt worden ist, entsprechende mechanische Eigenschaften und Kristallkorngröße besitzt.

Bei Erzeugung der Teile bei welchen längere Wärmehandlung bei Temperaturen über 900 °C nötig ist, hat dieser Stahl wegen der höheren Stabilität des Austenitischen Gefüges bessere Eigenschaften wie konventionell erzeugter Stahl.

## SUMMARY

Based on previous investigations the industrially made melt of case-hardenable Č. 4320 steel with added niobium and without aluminium was used for test samples of two motor constituents, i. e. of a shaft and of starter toothed wheel, all being heat treated. Physical metallurgical properties of steel and the results of technological tests were compared with the results obtained with the samples made of conventional steel. Mechanical properties of the continuously cast steel correspond to the values prescribed by the standards. Essential is the fact that ratio between the dynamic and the static properties of both steel is the same and that motor constituents have sufficient fatigue

strength. Niobium does not influence the case-hardenable-ability of steel. It directly influences the hardenability since the finer microstructure has lower through-hardenable-ability.

Results showed that correctly made continuously cast Č. 4320 steel with refined crystal grains with niobium has corresponding mechanical properties and the size of crystal grains. For the parts which demand longer heat treatment above 900 °C this steel has better properties than the conventional steel due to greater stability of austenitic structure.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании предыдущих исследований изготовили из расплава цементуемой стали С. 4320, легированного с ниобием без добавки алюминия, полученного промышленным способом образцы двух элементов мотора, олобан и разгонные шестерни. Эти опытные образцы также термически обработаны.

Физико-металлургические свойства стали и результаты технологических исследований были сравнены с результатами, полученными на образцах изготовленных из стали, выплавленной классическим способом.

Механические свойства стали непрерывного литья соответствуют значениям, которые предписаны действующим стандартам. В особенности надо отметить, что отношения между динамическими и статическими свойствами обеих сталей одинаковы, и что

образцы моторных частей имеют соответствующую прочность. Также установлено, что ниобий не оказывает влияние на способность цементации стали, но косвенно влияет на закалку, так как более мелкая микроструктура уменьшает прокаливаемость. В итоге исследования показали, что хорошо изготовленная сталь для непрерывного литья С. 4320, на которой аффинаж кристаллических зерен выполнен с элементом ниобием обладает соответствующими механическими свойствами и имеет желаемую величину кристаллических зерен. При изготовлении изделий, которые требуют более длительную термическую обработку при  $t$ -ре свыше 900° эта сталь, из-за более высокой стабильности аустенитной структуры, имеет более благоприятные свойства, чем сталь изготовлена классическим способом.