

Kinetika raztapljanja primarnih karbidnih zrn in tvorbe mrežastega cementita v jeklu za kroglične ležaje

Eksperimentalno je bila določena kinetika raztapljanja karbidnih zrn pri 1140° C v jeklu za kroglične ležaje. Hitrost raztapljanja je razmeroma velika. Že po 4 urah žarjenja se količina karbidov zmanjša na sprejemljivo mejo. Poprečna velikost preostalih zrn pade linearno s trajanjem žarjenja, kar kaže, da je hitrost procesa odvisna od hitrosti raztapljanja karbida na mejni površini austenit-karbid.

Hitrost nastanka karbidne mreže okoli kristalnih zrn austenita je največja nad temperaturo, ko mreža nastaja v zaznavnem obsegu. Najbolj popolna mreža pa nastaja pri temperaturi 710° C.

1. UVOD

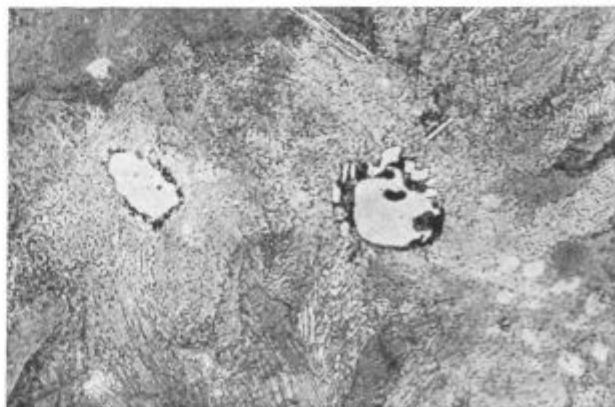
Karbidne izceje so stalna skrb izdelovalcev jekla za kroglične ležaje. Podatki iz strokovnega tiska kažejo, da se je praktično nemogoče izogniti nastanku ledeburitnega eutektika zaradi neravnotežnega strjevanja jekla v kokilah ter da je odprava izcej pravzaprav problem ustrezne predelave jekla (Fellcht in Barz¹, Ekstein²). Več je člankov v katerih avtorji opisujejo kako je mogoče z žarjenjem odpraviti ali pa spraviti na sprejemljivo mejo karbidne izceje, ki pri vročem valjanju nastanejo iz polj ledeburita. Temperature in časi žarjenja, katere navajajo različni avtorji so precej različni in segajo od 2 ur žarjenja pri 1100° C, 8 ali 10 ur žarjenja pri 1200° C, (Huml in Jech³, Okamoto⁴) do večstopenjskega žarjenja pri rastočih temperaturah (Cernjavskaja in sod.⁵). Te razlike so verjetno posledica razlik v velikosti izcej v študiranih jeklih, mogoče pa je njihov vzrok tudi v različnem načinu ohlajanja jekla med predelavo, saj na primer Ekstein navaja, da so karbidne segregacije v jeklu največje, če je temperatura valjanja med 920 in 850° C. Gre torej za dva pojava: raztapljanje karbidov na temperaturi komogenezacije in izločanje novega cementita iz austenita, ki postane zaradi ohlajanja in nepopolne homogenizacije prenasičen z ogljikom v okolici primarnih izcej. Da bi lahko presodili učinek enega in drugega procesa smo eksperimentalno določili kinetiko raztapljanja ledeburitnih karbidov.

Nič manj kot karbidne segregacije je za jeklo za kroglične ležaje neprijetna cementitna mreža,

ki nastane, če jeklo neprimerno ohlajamo skozi temperaturno področje, kjer postane zaradi ohlajanja austenit prenasičen z ogljikom. Različni avtorji (Vojnov in Šalimov⁶, Komissarov in sodelavci⁷, Keis in Komissarov⁸, Rižkov in Sašin⁹, Vondrašek in Kubelka¹⁰) navajajo meje nevarnega temperaturnega področja, nikjer pa nismo zasledili, da bi kdo eksperimentalno izmeril kinetiko nastanka karbidne mreže. V drugem delu našega članka obravnavamo prav ta problem.

2. EKSPERIMENTALNI POGOJI

Kinetiko raztapljanja karbidov smo določili v jeklu za kroglične ležaje tipa OCR z 0,98 % C, 0,33 % Mn in 1,55 % Cr. Vzorci so bili odrezani od ingota industrijske šarže. Na željo železarne Jesenice, ki nam je dala jeklo na voljo, smo poizkuse izvršili na temperaturi 1140° C. Pri predpoizkusih smo izotermno žarili jeklo do 32 ur, vendar se je pokazalo, da za raztapljanje zadostuje že žarjenje do 4 ur. Po žarjenju smo vzorce kalili v vodi, nato pa pripravili toliko metalografskih obruskov, da je bila njihova površina med 22,5 in 24 cm². Na obruskih smo v metalmikroskopu pri povečavi 500-krat prešteli in izmerili velikost vseh karbidnih zrn ali ledeburitnih polj, katerih linearna dimenzija je presegala 0,004 mm ali površina presegala 0,000015 mm².



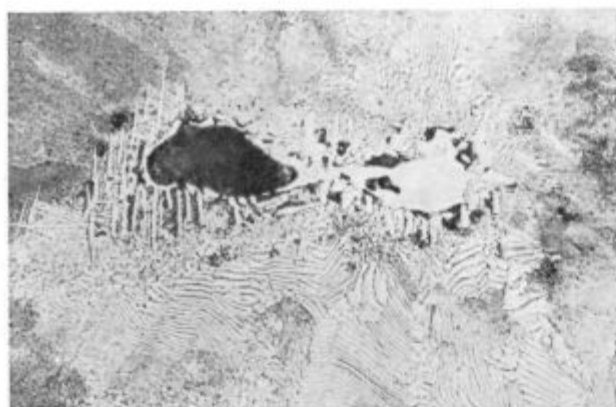
Slika 1
× 500, zaobljena karbidna zrna

V normalno ohlajenem ingotu so bila karbidna zrna večinoma okroglasta, ovalna ali poligonalna z zaobljenimi robovi (sl. 1 in 2) ob njih so bile mnogokrat pore. Redka so bila polja pravega ledeburita, v katerih smo pogosto opazili ravne



Slika 2
× 500, poligonalno karbidno zrno

karbidne lamele (slika 3). Pogosto so bile tudi bolj ali manj ravne lamele na stikih treh austenitnih zrn (sl. 4).



Slika 3
× 500, karbidno zrno, pora in ledeburitni evtektik



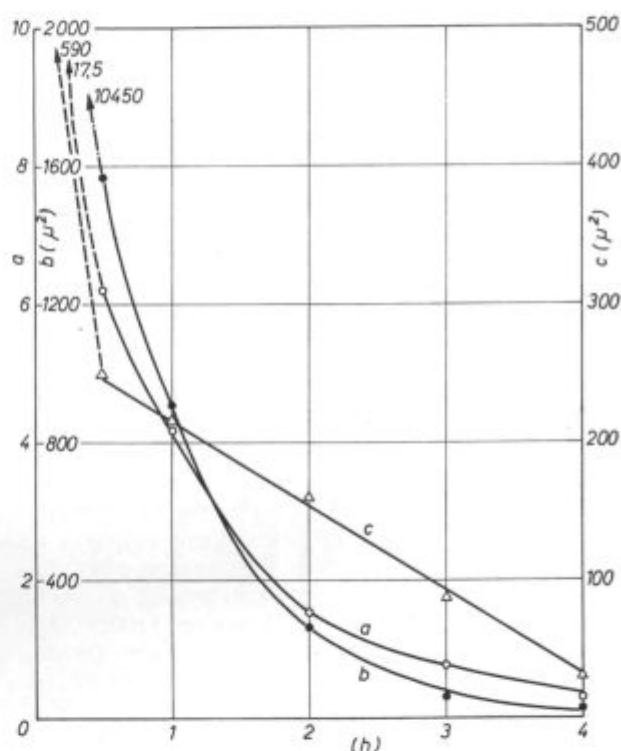
Slika 4
× 200, karbidno zrno na stiku treh grobih kristalnih zrn

Isto jeklo smo uporabili tudi za določanje kinetike nastanka karbidne mreže. Vzorce smo to pot vzeli iz valjanih palic \varnothing 22 mm. Segrevali smo jih v peči na temperaturo 1140 ali 1170°C, zadržali 5 minut, nato pa izotermno žarili v soli pri temperaturah med 650 in 850°C v trajanju od 5 minut do 2 uri. Stopnjo izločanja mreže sekundarnega cementita smo določili tako, da smo na razdalji 45 mm v metal mikroskopu prešteli vse kristalne meje, na katerih je bil izločen sekundarni cementit.

3. REZULTATI

3.1. Raztapljanje karbidov

Rezultate prikazuje tabela 1, zaradi lažje predstave pa še grafikon na sliki 5. Že po polurnem žarjenju je močno padlo število karbidnih zrn in njihova površina v primerjavi z nežarjenim vzorcem.



Slika 5
Vpliv trajanja žarjenja pri 1140°C na število in površino karbidnih zrn na cm^2 površine bruska in na poprečno velikost karbidnih zrn na bruskih

Pri nadaljevanju izotermnega žarjenja se zmanjšuje poprečna velikost preostalih karbidnih zrn premo sorazmerno s časom žarjenja, med tem ko padata število karbidnih zrn in njihova gostota po bolj zapletni odvisnosti od časa žarjenja. V tabeli 2 vidimo, da se s trajanjem žarjenja relativno povečuje število manjših karbidnih zrn.

Oblika krivulj na sliki 5 kaže, da je v začetku žarjenja raztapljanje karbidov mnogo hitrejše kot

v nadaljevanju. Najverjetneje imamo v začetku opraviti z raztapljanjem karbidnih zrn sekundarne narave oziroma z raztapljanjem plašča primarnih zrn, ki je nastal zaradi izločanja cementita pri ohlajanju, ne pa nastal pri strjenju jekla. Sele

v nadaljevanju žarjenja imamo opraviti z raztapljanjem karbidnih zrn, ki so ledeburitnega izvora in rezultat izcejanja ogljika in kroma pri strjevanju jekla.

TABELA 1 — Število in velikost karbidov

Trajanje žarjenja (h)	Površina obruskov (cm ²)	Štev. karbidov (a)	$\frac{a}{\text{cm}^2}$	Površina karbidov μ^2 (b)	$\frac{b}{\text{cm}^2}$	Največji karbid (μ^2)
	22,5	395	17,5	233500	10450	3000
0,5	22,9	143	6,2	36100	1570	2500
1	23,8	100	4,2	21650	910	870
2	24,5	38	1,5	6510	267	1050
3	24,5	19	0,8	1650	67	270
4	24,0	7	0,3	220	30	70

Rezultati kažejo, da je raztapljanje ledeburitnih karbidov precej hiter proces, saj se po 4 urah žarjenja število karbidnih zrn zmanjša za 50-krat glede na začetno stanje ali za 22-krat glede na stanje po polurnem žarjenju. Važnejše pa je, da

se mnogo bolj kot število, zmanjša površina karbidnih zrn, oziroma množina karbidne mase v jeklu. Po 4 urah žarjenja pade ta na eno tisočinko glede na začetno stanje ali na eno stopetdesetinko glede na stanje po polurnem žarjenju.

TABELA 2 — Razdelitev karbidov v velikostne razrede

Žarjenje (h) Razred (μ^2)	0		0,5		1		2		3		4	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
50	—	—	36	1340	22	980	13	370	7	210	7	220
50 do 100	31	2610	23	1790	21	2590	8	590	8	670	—	—
100 do 200	58	6820	47	7390	25	3730	6	1020	3	500	—	—
200 do 400	112	36050	20	9040	21	6010	7	1780	1	270	—	—
400 do 800	119	77150	9	6200	10	7230	3	1700	—	—	—	—
800	75	110700	8	10340	1	1110	1	1050	—	—	—	—
	395	233330	143	36100	100	21650	38	6510	19	1650	7	220
Poprečna velikost karbidov (μ^2), c	590		253		216		170		87		30	

b — površina karbidov
a — število karbidov

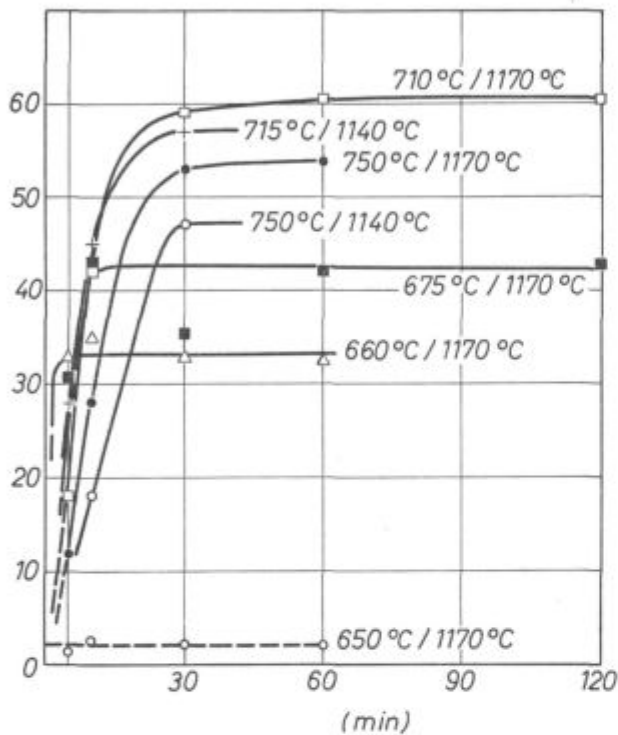
Poskusi kažejo, da je v primarnih karbidnih zrnih mnogo več kroma kot je poprečna vsebnost v jeklu (Vodopivec¹¹). Domnevamo lahko, da še mnogo dlje po tem, ko so karbidna zrna že raztopljena ostanejo v njihovi okolici močnejše koncentracije kroma in ogljika. Ker ta dva elementa drug drugemu zmanjšujeta aktivnost v austenitu je proces izenačevanja njune koncentracije z difuzijo počasen. Zato lahko predpostavljamo, da mnoge od karbidnih izcej, katere najdemo v izvaljanem jeklu, niso ostanki ledeburita, marveč je njihovo poreklo sekundarno, t. j. nastale so pri ohlajanju iz izcej ogljika in kroma v področjih, kjer so se pri homogenizaciji že bolj ali manj popolno raztopila

zrna ledeburitnih karbidov, kot je že pred časom domneval Houdremont¹². Vprašamo se lahko katera reakcija, raztapljanje karbida na mejni površini karbid-austenit ali odvod sestavnih elementov ogljika in kroma od te površine z difuzijo, je merodajna za hitrost raztapljanja. V primeru, da kinetiko procesa regulira raztapljanje, mora biti hitrost reakcije v linearni odvisnosti z velikostjo površine karbidnih zrn, oziroma v isti odvisnosti s kvadratom njihove poprečne velikosti, ali kar je isto v premem sorazmerju z njihovo poprečno velikostjo. Na sliki 5 vidimo, da po preteku približno pol ure, poprečna površina zrn dejansko pada linearno s trajanjem žarjenja. Torej lahko trdimo, da je

merodajna za kinetiko raztapljanja ledeburitnih karbidov v jeklu za kroglične ležaje pri temperaturi naših preizkusov, hitrost reakcije raztapljanja, ki poteka na mejni površini karbidno zrnno-austenit.

3.2. Kinetika tvorbe mreže sekundarnega cementita

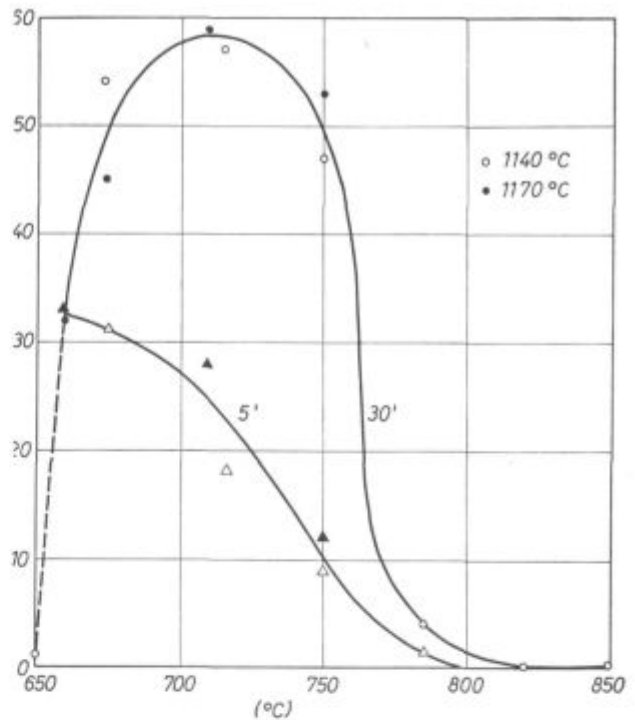
Slika 6 prikazuje kinetiko tvorbe mreže pri nekaterih temperaturah, slika 7 pa stopnjo izoblikovanja karbidne mreže po 5 minutah in 30 minutah izotermnega žarjenja pri različnih temperaturah.



Slika 6

Vpliv časa in temperature žarjenja in delež kristalnih zrn, ki so obdana s cementitno mrežo

V preiskanem jeklu je mreža nastajala pri žarjenju približno v temperaturnem intervalu med 660 in 780°C. Pri temperaturah 650 in 800°C nismo opazili več cementita ob mejah med dvema zrnoma, marveč le še redke izločke na stikih treh kristalnih zrn. V izcejah, kjer je jeklo obogateno s kromom in ogljikom, pa je bila karbidna mreža še jasno izoblikovana tudi po žarjenju pri temperaturi 850°C (sliki 8 in 9). Razlika v temperaturi žarjenja 1150 ali 1170°C nima opaznega vpliva na oblikovanje mreže. Hitrost tvorbe mreže je največja pri temperaturi, pri kateri nastaja v omembe vrednem obsegu. Z naraščanjem temperature se zmanjšuje hitrost nastanka mreže, večja pa se stopnja izoblikovanja. Najbolj popolna mreža nastaja pri temperaturi okoli 710°C, kjer smo po polurnem žarjenju mrežo opazili okoli 80 % vseh austenitnih zrn. Z naraščanjem temperature hitrosti nastanka mreže še nadalje pada, pada pa tudi končna stopnja izoblikovanja. Razlog za to je eno-



Slika 7

Delež avstenitnih zrn, ki so obdana s karbidom po 5 minutnem in 30 min. žarjenju pri različnih temperaturah



Slika 8

× 100, (jedkano z Na-pikratom). Karbidna mreža po mejah austenitnih zrn v izceji. Temperatura žarjenja 850°C

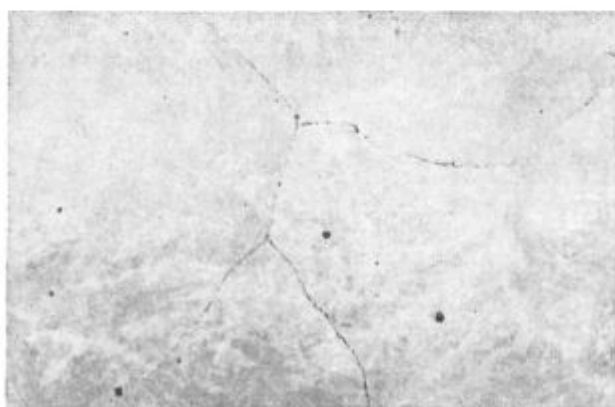


Slika 9

× 500, detalj slike 8

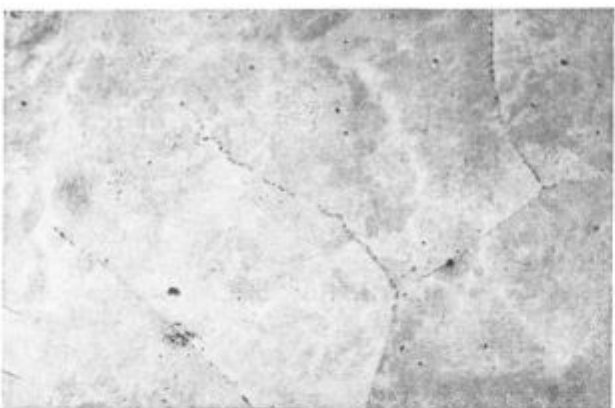
staven, z rastjo temperature je na voljo manj in manj ogljika za tvorbo mreže, dokler nekoliko nad 780°C mreža praktično ne nastaja, ker ostaja ogljik raztopljen v austenitu.

Pri temperaturah pod točko Ac_1 cementitna mreža lahko nastaja samo v času, ko se austenit še ni pretvoril v perlit. Ta je pri 650°C tako kratek, da mreže praktično ni, pri 660°C pa je mreža tanka in se z daljšanjem žarjenja cementit po mejah celo nekoliko sferoidizira (sliki 10 in 11). Posnetki kažejo, da ima že po petih minutah žarjen vzorec popolnoma perlitno strukturo, kar je jasen znak, da se je mreža izoblikovala preje kot v petih minutah. Cementitna mreža nastala pri višji temperaturi je debelejša.



Slika 10

× 500, (jedkano z Na-pikratom). Karbidna mreža po mejah austenitnih zrn po 5 minutah žarjenja pri 660°C



Slika 11

× 500, isto kot sl. 10 po 30 min. žarjenja

Pri 710°C žarjeni vzorci imajo po 5 in 10 minutah žarjenja čisto martenzitno strukturo, po polurnem žarjenju mešano martenzitno perlitno, po eni uri pa čisto perlitno. To se ujema z videzom ustrezne krivulje na sliki 6, in kaže, da je končna izoblikovanost praktično dosežena po polurnem žarjenju.

Jasno je torej, da lahko nastaja cementitna mreža le dokler imamo v jeklu še austenit. Sodeč po krivuljah na slikah 6 in 7 je verjetno hitrost



Slika 12

× 500, (jedkano z Na-pikratom). Karbidna mreža po mejah austenitnih zrn po 10 min. žarjenja pri 710°C



Slika 13

× 500, isto kot na sl. 12 po 60 min. žarjenja

tvorbe odvisna preje od prenasičenosti austenita z ogljikom, ki raste z padajočo temperaturo, kot od hitrosti difuzije ogljika v austenitu, ki razumljivo pada s temperaturo.

4. SKLEP

1. Eksperimentalno smo izmerili kinetiko raztapljanja karbidnih zrn ledeburitnega porekla v jeklu za kroglične ležaje tipa OCR 4 pri temperaturi 1140°C . Ugotovili smo, da je hitrost raztapljanja karbidov razmeroma velika in da se po 4 urah žarjenja množina neraztopljenih karbidov zmanjša na sprejemljivo količino. Poprečna velikost preostalih karbidnih zrn linearno pada s trajanjem žarjenja, kar je znak, da je hitrost procesa odvisna od hitrosti raztapljanja karbida na mejni površini austenit-karbid.

2. Daločili smo kinetiko tvorbe cementitne mreže pri izotermnem žarjenju istega jekla, ohlajenega s temperature 1140 in 1170°C . Preizkusi so pokazali, da je hitrost izločanja največja nad temperaturo, ko mreža nastaja v pomembnem obsegu, medtem ko se najbolj popolna mreža izoblikuje pri temperaturi ca 710°C .

Literatura

1. K. Felcht in R. Barz: Neue Hütte 3, 1958, št. 341—350
2. J. Ekstein: Neue Hütte 4, 1959, št. 4, 304—311
3. J. Jech in P. Hulm: Hutnik 16, 1966, št. 10, 486—488
4. K. Okamoto, S. Shiko in T. Ota: Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 7, 1967, No. 4, 197—204
5. S. G. Cernjavska, T. J. Malinovska, L. D. Močkevič, A. J. Hitrik, V. J. Travinin in J. A. Stečenko: Stalj, 1967, št. 9, 841—843
6. S. G. Vojnov in A. G. Salinov: Šarikopodšipnikovanja Stalj, Metallurgizdat, Moskva, 1962
7. A. J. Komissarov, V. A. Horoš in A. A. Hudenjil: Stalj, 1966, št. 4, 359—360
8. V. J. Keis in A. J. Komissarov: Stalj, 1965, št. 7, 654—657
9. G. M. Riškov in P. J. Sašin: Stalj, 1964, št. 12, 1128—1129
10. V. Vondrašek in A. Kubelka: Hutnicke Listy, 1968, št. 3, 155—161
11. F. Vodopivec: Poročilo Metalurškega Inštituta, Ljubljana, febr. 1969
12. E. Houdremont: Springer Verlag, 1956, str. 431

ZUSAMMENFASSUNG

Versuchsweise ist die Lösungskinetik der Karbidkörner bei 1140°C im Kugellagerstahl bestimmt worden. Die Lösungsgeschwindigkeit ist verhältnismässig gross. Schon nach vierstündiger Glühungsdauer verringert sich die Menge der Karbide auf eine annehmbare Grenze. Die durchschnittliche Grösse der übrigen Körner fällt linear mit der Glühungsdauer, das zeigt, dass die Prozessgeschwindigkeit

von der Lösungsgeschwindigkeit des Karbides an der Austenit-Karbid Grenze abhängig ist.

Die Geschwindigkeit der Bildung des Karbidnetzes ringsum die Austenitkörner ist am grössten über der Temperatur, wo das Netz im wahrnehmbaren Umfang entsteht. Das vollkommendste Netz entsteht bei der Temperatur von 710° C.

SUMMARY

Kinetics of dissolving carbide particles at 1140° C in steels for ball bearings was experimentally determined. The rate of dissolution is comparatively high since the amount of carbides reduces down to the permissible level after 4 hrs of heating already. Average particle size of retained carbide particles decreases linearly with the duration of heating which suggests that the rate of the process de-

pends on the rate of dissolution of carbide on the austenite-carbide interface.

The rate of the formation of carbide network around austenite crystal grains is the highest at a temperature above that at which the formation of carbide network can be observed. The formation of the most complete network occurs at 710° C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опытами определена кинетика плавления карбидных зёрен при темп-ры од 1140° Ц в стали для шарикоподшипников. Быстрота плавления относительно большая, уже после 4 часов отжига количество карбидов уменьшается на отмечанный предел. Средняя величина оставшихся зёрен уменьшается линейно в отно-

шении на дантельность отжига. Это показывает, что быстрота процесса зависит от быстроты плавления карбидов на поверхности аустенит-карбид.

Быстрота появления карбидной сетки зависит од высоты темп-ры а самая полная и выразительная при темп-ры од 710° Ц.