

# Topologija rasti rekristaliziranih zrn v jeklu z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C v razponu temperature 700 do 800 °C

Franc Vodopivec\*1

UDK: 621.785.374:620.186.82:669.15-194.57  
ASM/SLA: J23c

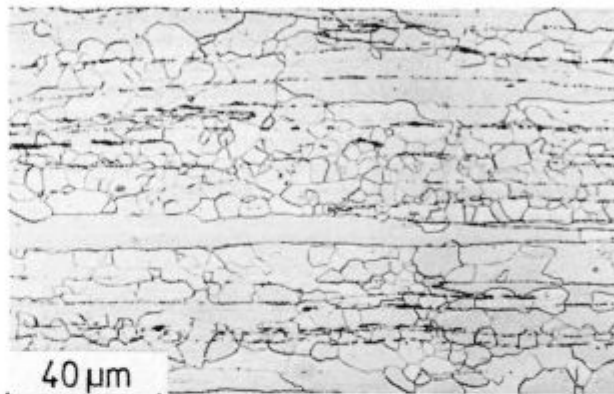
*Izotermna kinetika rasti zrn pri 700 °C, porazdelitev zrn po številu stranic in številom stranic sosedov, ki obkrožajo neko zrno, število stičišč zrn, razmerje med številom stranic in povprečno velikostjo zrn.*

## 1. UVOD IN CILJ DELA

Več razlogov je, zakaj kristalna zrna, ki sestavljajo mikrostrukturo kovin, niso stabilna pri segrevanju pri visokih temperaturah, razen v primerih, ko kovina vsebuje močne inhibitorje, ki v nekem razponu temperature ustavijo ali pa vsaj pomembno zavrejo proces migracije kristalnih mej. Ti razlogi so različna velikost zrn, različno število sosedov in stranic v ravnini opazovanja oz. sosedov v prostoru, sekundarna rekristalizacija s tvorbo teksture, in končno, sprememba sestave kovine med žarjenjem, na primer razogljčenje jekla. V že objavljenih delih sta bila opisana mikromorfologija rekristalizacije z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C jekla in tudi kinetika rasti z rekristaliziranih zrn (1, 2). Kinetika rasti je parabolična s eksponentom  $e = 1/2$ , razogljčenje jekla med žarjenjem pa skokoma pospeši rast zrn, ki pa je tudi sicer hitrejša v jeklu z manj ogljika v trdni raztopini v feritu. To delo je usmerjeno v pojasnitev topologije procesa rasti, torej v spremembo oblike zrn, ki jo opisujeta števili stranic in stičišč ter korelacija teh pojavov s topološkimi značilnostmi prve lupine sosedov, vse v odvisnosti od spremembe velikosti zrn. Pri nizkih temperaturah rast vseh zrn ni enakomerna, ker je odstopanje od ravnotežja različno na različnih mestih. Rast in sprememba oblike zrn sta pri srednjih temperaturah hitrejši tam, kjer je odstopanje od ravnotežja največje; pri visokih temperaturah, ko je mobilnost atomov večja, pa je rast vsesplošna, zato so lahko tudi kinetične zakonitosti drugačne kot pri srednjih temperaturah (Atkinson 3).

## 2. METODIKA DELA

Za laboratorijsko delo smo izbrali jeklo, ki ima mikrostrukturo iz ferita in majhne količine karbidov v temperaturnem razponu med 700 in 800 °C. Količina in velikost karbidnih zrn nista tolikšni, da bi lahko inhibirali proces rasti zrn v uporabljenem razponu temperature. Jeklo vsebuje tudi toliko aluminija in mangana, da nitridni in sulfidni izločki nastanejo že pri strjenju, zato so premalo številni za zaznavno inhibicijo procesa rasti zrn. To temperaturno območje je bilo izbrano iz dveh razlogov. Pri nižjih temperaturah se s procesom primarne rekristalizacije lahko razvijejo velika prizmatična zrna, na obrusku jih vidimo kot do mm dolge enakomerne pasove (slika 1). Ta zrna so relativno stabilna, opazili smo jih deset in



Slika 1.

Nepopolno rekristalizirana mikrostruktura po 10-min. zadržanju jekla pri temperaturi 650 °C

Fig. 1

Uncompletely recrystallized microstructure after 10 minute keeping steel at 650 °C

več minut po tem, ko je bila njihova okolica popolnoma rekristalizirana. Trdota jekla v njih je bila podobna, kot trdota rekristalizirane okolice s poligonalnimi zrni. To je dokaz, da je poprava v silicijevem feritu praktično enako učinkovita kot rekristalizacija pri izločanju deformacijske utrditve. Prizmatično obliko zrn razlagamo namreč z »in situ« rekristalizacijo z rastjo poligonizacijskih zrn, ki je omejena s plastasto porazdelitvijo karbidne faze, nastalo zaradi nizke temperature vročega valjanja. Te oblike odprave deformacijske utrditve pri temperaturi 700 °C nismo več opazili. Razlog zato so hitrejša rekristalizacija ter večja topnost in večji izločki karbidne faze v feritu, zaradi česar plastasta porazdelitev praktično ne omejuje procesa rekristalizacije. Temperaturni razpon preizkusov je bil navzgor omejen pri 800 °C, ker se pri tej temperaturi že pojavlja anormalna rast zrn (slika 2) zaradi anizotropije v energiji kristalnih mej (Rollett, Srolovitz in Anderson, 4), med tem ko anormalne rasti zaradi anizotropije v mobilnosti kristalnih mej nismo opazili.

Tudi čas zadržanja pri temperaturi 700 °C je bil omejen na 10 minut, na višjih temperaturah pa na 5 minut, zato da ni bilo pomembne anormalne rasti zrn.

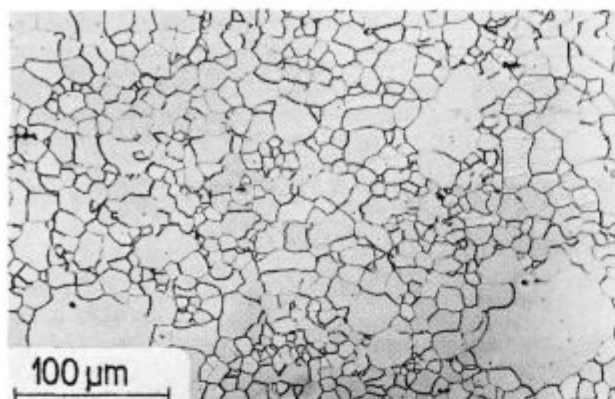
Vse preizkuse smo napravili na pločevini z debelino 0,35 mm, ki je bila hladno izvaljana s stopnjo deformacije okoli 80 %. Žarjenje se je izvršilo v svinčeni kopeli z mešanjem, zato da je bilo segrevanje na delovno temperaturo čim krajše.

Vse meritve velikosti in oblike zrn smo napravili ročno na posnetkih mikrostrukture dvojne standardne velikosti pri povečani 200 do 1000 ×. Na vsakem vzorcu je bilo posneto po več slik, toliko, da je bilo 1500 do 2000 zrn upoštevano pri meritvah linearne velikosti (premera)

\*1 dr. Franc Vodopivec, dipl. ing. met. — SŽ — Metalurški inštitut Ljubljana, Lepi pot 11, 61000 Ljubljana

\*\* Rokopis prejet: nov. 1990

\*\*\* Originalno objavljeno: ŽEZB 25 (1991) 1



**Slika 2.**

Mikrostruktura z anormalno rastjo posamičnih zrn po žarjenju 10 min. pri 800°C

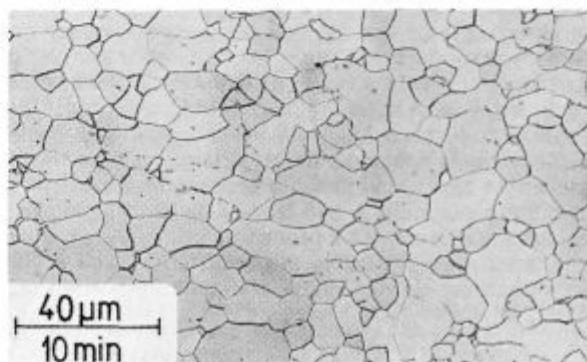
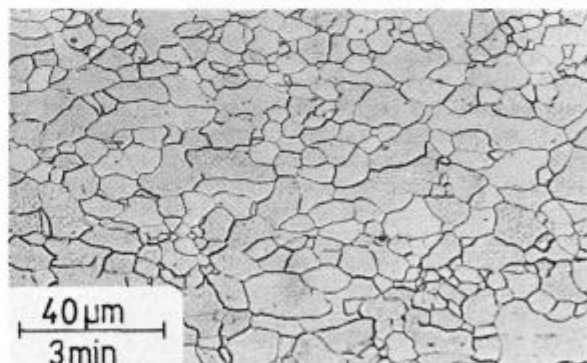
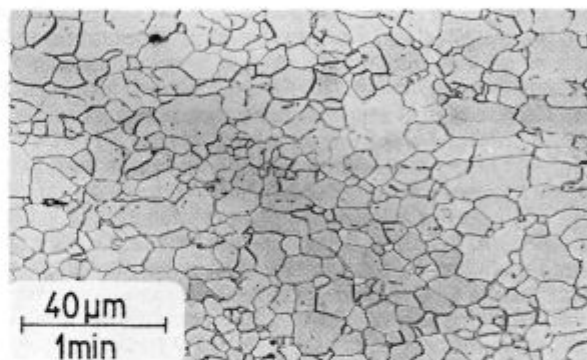
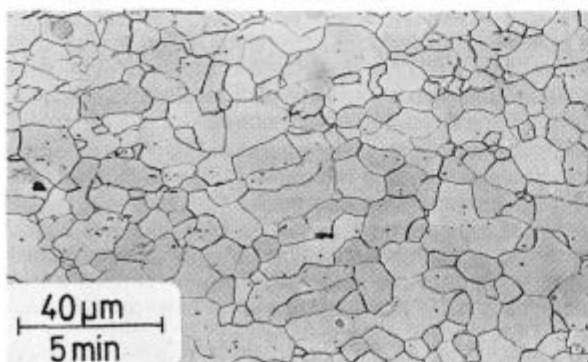
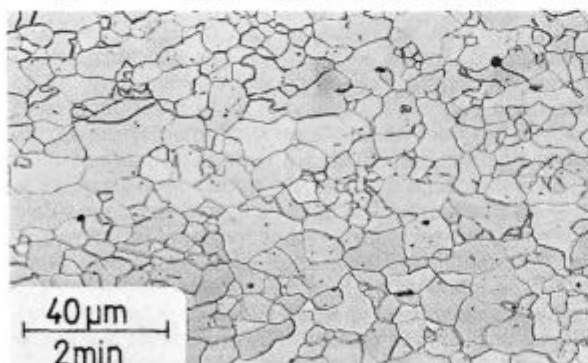
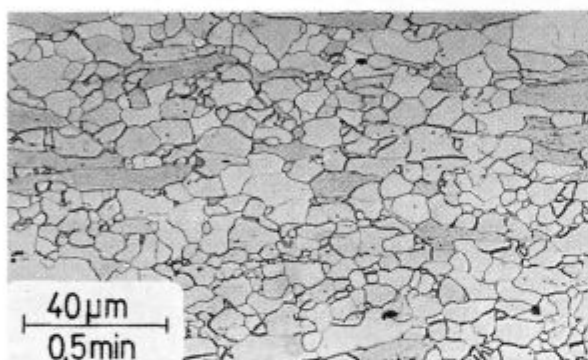
**Fig. 2**

Microstructure with abnormal growth of single grains after 10 minute annealing at 800°C

zrn po metodi linearne intercepcije in po metodi površine ter 500 do 600 zrn pri štetju števila s stranic zrn, torej števila sosedov, stičišč več zrn, stranic sosedov in meritev velikosti posamičnih zrn. Pri stičiščih nismo razločevali med takimi s tremi ali več zrn. V izračunih nismo upoštevali deleža zrn z dvema stranicama, ker je bilo njihovo število pod 0,2%. Opazili pa smo jih v vseh primerih. Rezultate smo obdelali z upoštevanjem sodobnih teorij o kinetiki izotermne rasti rekristaliziranih zrn in teorij o njihovi topologiji.

### 3. KINETIKA IZOTERMNE RASTI ZRN

Na **sliki 3** je prikazana mikrostruktura po 30 sek., 1 min., 2 min., 3 min., 5 min. in 10 min. zadržanja v svinčeni kopeli pri temperaturi 700°C. Na slikah se hitro razločijo nekatere mikromorfološke značilnosti rasti zrn, na primer: zrna so vse večja in bolj poligonalna (torej poliedrična v prostoru), čim daljše je žarjenje; pazljivo opazovanje pa pokaže po 30 sek. žarjenja še precej nerekrystalizirane kovine, pa tudi pri eni minuti zadržanja rekristalizacija še ni popolnoma končana.



**Slika 3.**

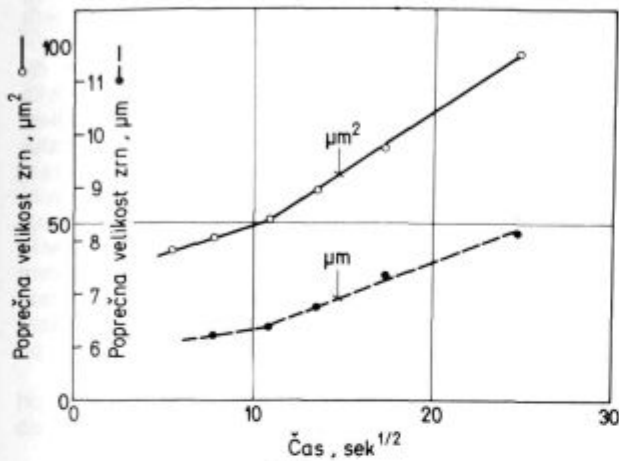
Posnetki mikrostrukture po različno dolgem žarjenju pri 700°C

**Fig. 3**

Photographs of microstructure after varied duration of annealing at 700°C

Na **sliki 4** je prikazana kinetika izotermne rasti za linearno velikost, intercepcijsko dolžino  $R$ , v grafikonu je zapisana kot povprečna velikost zrn v  $\mu\text{m}$  in za povprečno površino zrn v  $\mu\text{m}^2$  (A). Kinetika v obeh primerih sledi isti parabolični zakonitosti

$$R = R_0 + k_1 t^{1/2} \text{ oziroma } A = A_0 + k_2 t^{1/2}$$



**Slika 4.**

Kinetika izotermne rasti zrn pri 700°C. Velikost zrn je izražena s povprečno površino in z intercepcijsko dolžino, ki je sorazmerna premeru zrn

**Fig. 4**

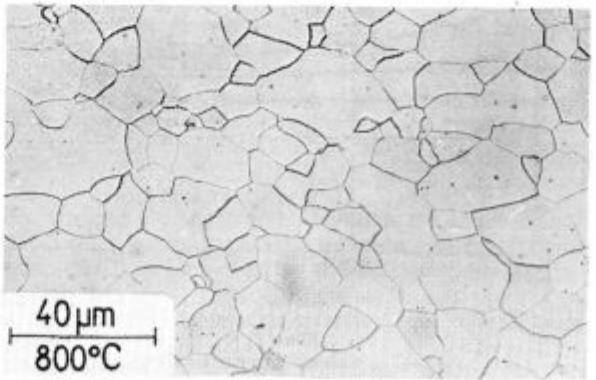
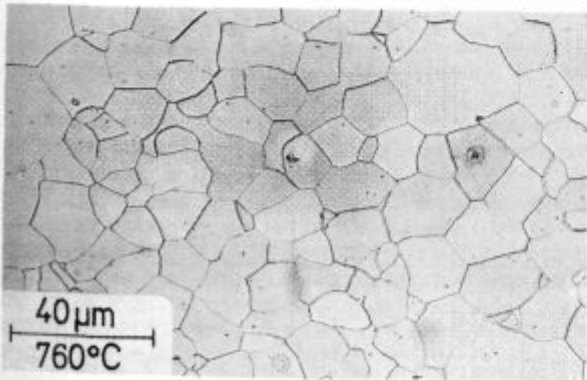
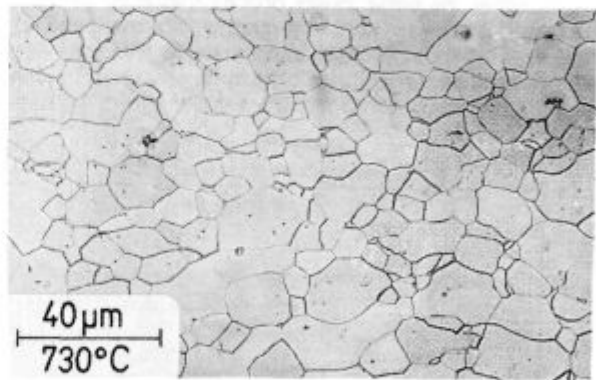
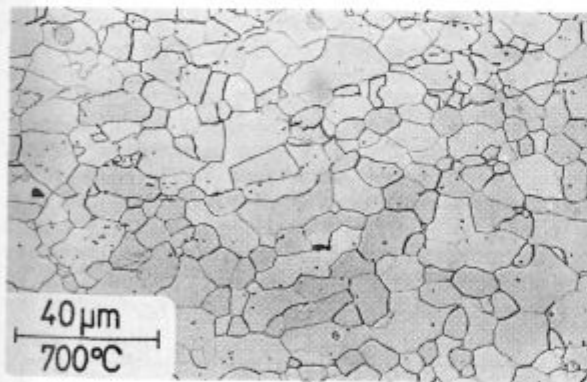
Kinetics of isothermal grain growth at 700°C. The grain size is expressed by the average surface area and with the intercept length being proportional to the grain diameter

v katerih sta  $k_1$  in  $k_2$  različni parabolični konstanti rasti,  $t$  pa je trajanje žarjenja. V obeh prikazih, linearnem in v površinskem je na odvisnosti prelom pri ca. 2 min. izotermnega zadržanja. Pod to časovno mejo je rast počasnejša, nad njo pa hitrejša. Počasnejša rast pri nižji temperaturi je najverjetneje dokaz nedokončane rekristalizacije.

Zaradi nastanka novih majhnih zrn je rast prej nastalih zrn navidezno počasnejša. Po teoriji, ki sta jo postavila Burke in Turnbull (5), je parabolična kinetika dokaz, da je gonilna sila za rast zrn razlika v ukrivljenosti meje zrna. Po tej teoriji transport atomov preko meje poteka v smeri središča ukrivljenosti, torej konkavna meja napreduje na račun konveksne.

V obsežnem pregledu o procesih rasti zrn navaja Atkinson (3) številne primere odstopanja od parabolične kinetike z eksponentom  $e = 1/2$ . Večino teh odstopanj pripisujejo parcialni inhibiciji migracije, najbolj pogosto vplivu nečistoč, ki so na mejah obogatene v trdni raztopini (solute drag). Raziskave serije jekel s podobno sestavo so tudi v preteklosti pokazale parabolično kinetiko rasti zrn z eksponentom  $e = 1/2$  (1, 2) ter skokovito povečanje rasti zaradi razogljčenja pri časih, daljših od 10 min. ali pri temperaturah nad 800°C.

Na **sliki 5** je prikazana mikrostruktura po 5 min. zadržanju pri temperaturah 700, 730, 760 in 800°C, na **sliki 6** pa je prikazana odvisnost med premerom zrn in povprečno površino zrn ter absolutno temperaturo. Odvisnost je eksponencialna Arheniusova s prelomom pri okoli 760°C. Nad to mejo so zrna večja. To ne pomeni, da je pri višji temperaturi rast rekristaliziranih zrn hitrejša, nasprotno zaradi povečanja količine ogljika v trdni raztopini v feritu je celo počasnejša, kot bi pričakovali na osnovi

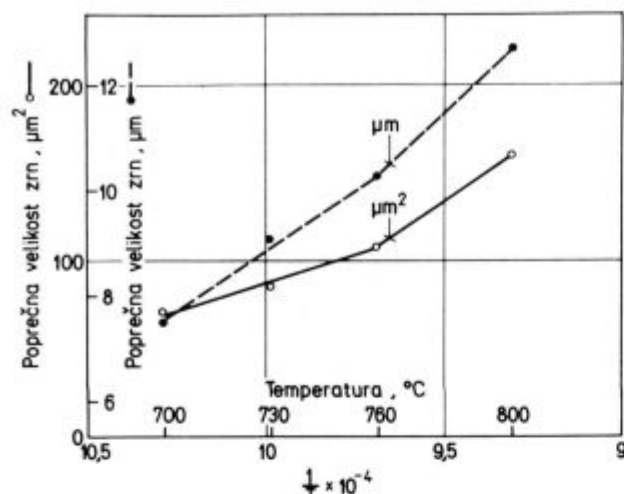


**Slika 5.**

Posnetki mikrostrukture po petminutnem žarjenju pri označenih temperaturah

**Fig. 5**

Photographs of the microstructure after 5 minute annealing at mentioned temperatures



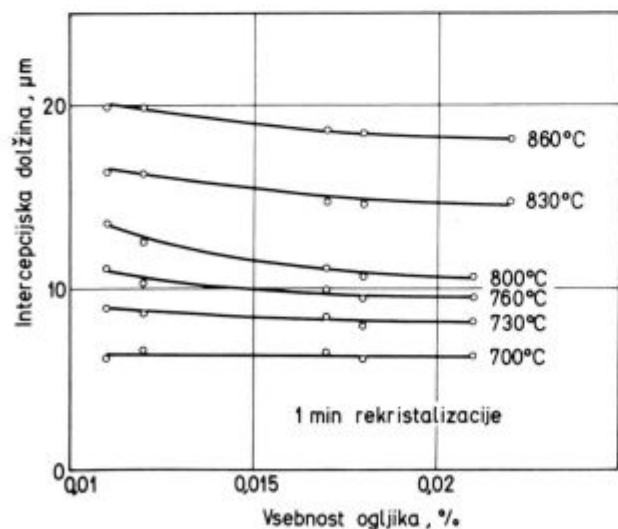
Slika 6.

Vpliv temperature na povprečno velikost zrn po petminutnem žarjenju

Fig. 6

Influence of temperature on the average grain size after 5 minute annealing

ekstrapolacije z nižjih temperatur. Večja zrna pri 800° so rezultat večje začetne velikosti rekristaliziranih zrn. Dokaz za to trditev je **slika 7** (6), ki kaže velikost rekristaliziranih zrn v jeklih iste vrste, vendar z različno vsebnostjo ogljika po 1 min. zadržanja pri različnih temperaturah. Očitno je, da ogljik vpliva na proces rasti zrn in da so pri enakih pogojih zrna tem večja oziroma rast je tem hitrejša, čim manj je ogljika v trdni raztopini v ogljiku. To kaže na možnost, da ogljik zavira proces migracije zaradi segregacije po mejah, ki je tem manjša, čim manj ima jeklo ogljika. Mobilnost atomov ogljika pa je tolikšna, da se zavorna sila segregacije ne odraža na eksponentu kinetike rasti, ki ostaja parabolična z eksponentom 1/2.



Slika 7.

Vpliv količine ogljika na velikost zrn po 1-min. žarjenju pri različnih temperaturah

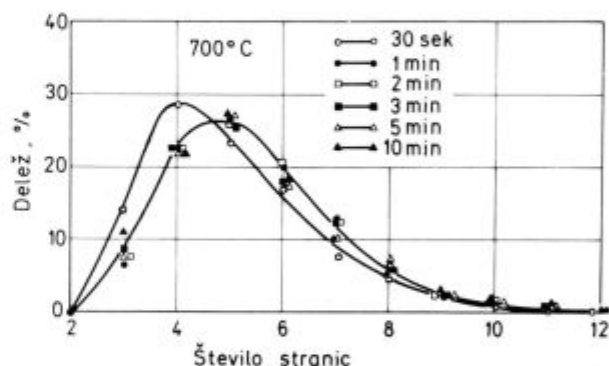
Fig. 7

Influence of carbon content on the grain size after 1 minute annealing at various temperatures

#### 4. ŠTEVILO STRANIC KRISTALNIH ZRN

V procesu normalne rasti zrn ostaja porazdelitev zrn po številu stranic (sosednih zrn) konstantna (3). Razlog je, da se proces rasti zrn odvija brez prekinitve in bi se ustavil le, če bi imela vsa zrna šesterokotno obliko in enako velikost s kotom 120° v stičišču. Tega pa v realnih mikrostrukturah ni, zato zrna z manj kot 6 stranicami nprestanost nastajajo, ker se z zmanjševanjem velikosti zmanjšuje tudi število stranic (Hillert 7), čeprav pri tem raste povprečna velikost vseh zrn. V vseh primerih porazdelitev ni log normalna, torej ne dobimo premice, če narišemo kumulativno pogostost v odvisnosti od števila stranic. Po najkrajšem, 30 sek. segrevanju, ima največ zrn 4 stranice, po 1 do 10 minut zadržanja pri temperaturi pa je porazdelitev zrn po številu stranic identična v razponu standardne deviacije (**slika 8**). Največje je število zrn s 5 stranicami, v vseh časovnem razponu segrevanja pa je delež zrn s 4 stranicami večji od deleža zrn s šestimi stranicami. Na **sliki 9** vidimo, da ostaja pri enakem času zadrževanja pri temperaturah 700 in 730°C porazdelitev enaka, pri temperaturah 760 in 800°C pa naraste delež zrn s 6 stranicami, ki jih je največ po žarjenju pri 800°C.

Na **sliki 10** sta prikazana vpliv trajanja zadržanja pri 700°C in 5 min. zadržanja v razponu temperature 700 do

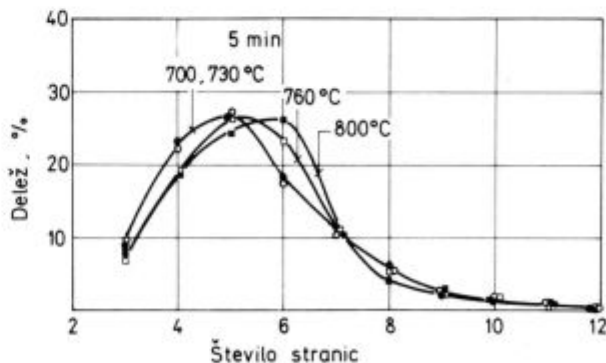


Slika 8.

Delež zrn z naraščajočim številom stranic po različno dolgem žarjenju pri 700°C

Fig. 8

Part of grains with the increasing number of sides after varied durations of annealing at 700°C

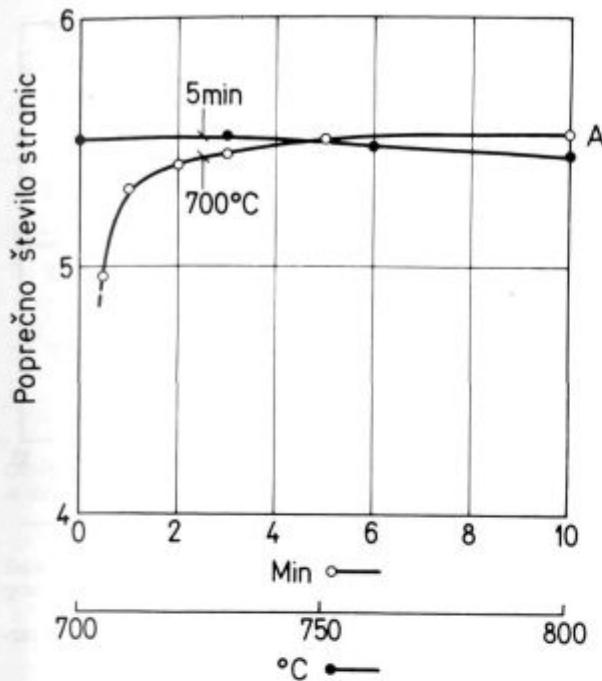


Slika 9.

Delež zrn z različnim številom stranic po 5-min. žarjenju med 700 in 800°C

Fig. 9

Part of grains with varied number of sides after 5 minute annealing between 700 and 800°C



Slika 10.

Povprečno število stranic sosedov v odvisnosti od trajanja izotermnega žarjenja pri 700°C in po 5-min. žarjenju v razponu med 700 in 800°C

Fig. 10

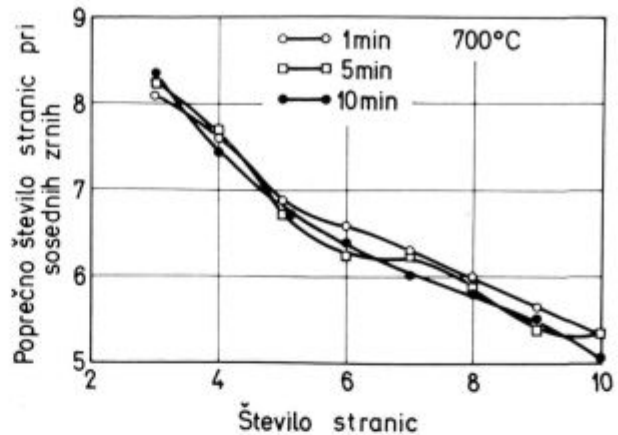
Average number of sides of neighbouring grains depending on the duration of isothermal annealing at 700°C, and after 5 minute annealing between 700 and 800°C

800°C na povprečno število stranic zrn. To število s časom raste, vendar se že po 5 min. zadržanju asimptotično približa vrednosti 5,55. Iz tega sklepamo, da idealne in ravnokotne šesterkotne oblike zrn v tem materialu ni mogoče doseči pri tehničnih časih zadržanja pri temperaturah razogljčenja in rekristalizaciji neorientirane elektropločevine. Povprečno število stranic se nekoliko zmanjšuje z naraščanjem temperature, vendar so razlike znotraj standardne deviacije štetja, ki je pri zrnih z največ stranicami sicer pod 5 %, pri zrnih z mnogo stranicami pa dosega do 10 %, če se med seboj primerjajo rezultati štetja na več mikroposnetkih istega vzorca.

5. ŠTEVILO STRANIC SOSEDNIH ZRN

Proces migracije kristalnih mej, torej proces rasti zrn, se odvija z napredovanjem in nazadovanjem meje dveh zrn. Zato nam podatek o tem, kolikšno je število stranic sosednega zrna da tudi predstavo o povprečni stabilnosti vsakega zrna. Rezultate za tri čase zadržanja pri 700°C prikazuje slika 11. Število stranic sosednih zrn se zmanjšuje, ko raste število stranic zrna, ki leži med njimi. Odvisnost bi lahko približali dvema premicama z različnim naklonom, ki se sekata približno pri povprečnem številu stranic 5,55. Torej, čim več stranic ima neko zrno, tem manj stranic imajo povprečno njegovi sosedji. To je logično. Kasneje bomo namreč videli, da so zrna z več stranicami večja, zato bolj stabilna in požirajo svoje sosedje, ki se zmanjšujejo in se jim zmanjšuje tudi število stranic.

Temperatura zadržanja vpliva na število stranic pri sosedih, močneje pri zrnih z malo stranicami, ki se zmanjšuje, ko temperatura raste do 760°C, nato pa je



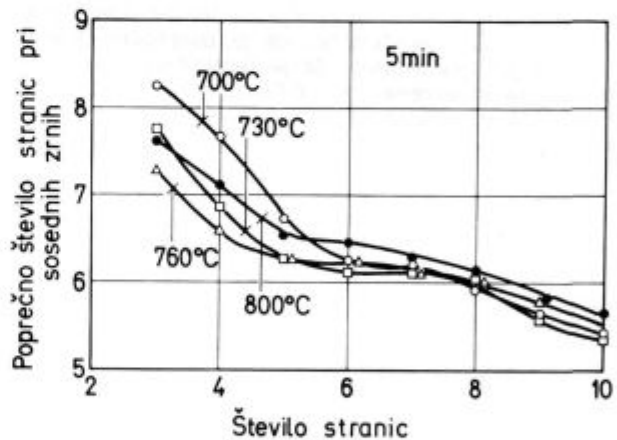
Slika 11.

Razmerje med številom stranic nekega zrna in povprečnim številom stranic sosedov, ki ga obkrožajo, za tri čase žarjenja pri 700°C

Fig. 11

Ratio between the number of sides of a grain and the average number of sides of the neighbouring grains, for three various times of annealing at 700°C

znova večje po žarjenju pri 800°C (slika 12). Sprememba je verjetno v zvezi s količino ogljika v raztopini v feritu, ki pa je v tem trenutku ne znamo razložiti, lahko pa kaže tudi na vpliv kakega drugega dejavnika.



Slika 12.

Razmerje med številom stranic nekega zrna in povprečnim številom zrn sosedov, ki ga obkrožajo po 5-minutnem žarjenju v razponu 700 do 800°C

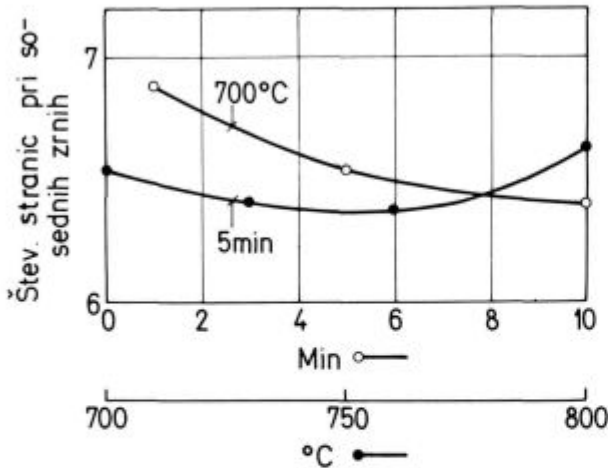
Fig. 12

Ratio between the number of sides of a grain and the average number of sides of neighbouring grains after 5 minute annealing between 700 and 800°C

Povprečno število stranic sosednih zrn je pri 700°C odvisno od trajanja žarjenja v temperaturnem razponu 700 do 800°C, spreminja pa se tudi pri izohromem žarjenju (slika 13). Po Weaireu (8) je število stranic nekega zrna (n) povezano s številom stranic njegovih sosedov z izrazom

$$m_n = 5 + \frac{6 + \mu}{n}$$

V izrazu je  $\mu$  varianca števila stranic, ki se izračuna iz izraza



Slika 13.

Povprečno število stranic sosednih zrn v odvisnosti od časa žarjenja pri 700°C in temperature v razponu med 700 in 800°C

Fig. 13

Average number of sides of neighbouring grains depending on the annealing time at 700°C and on the temperature in the range between 700 and 800°C

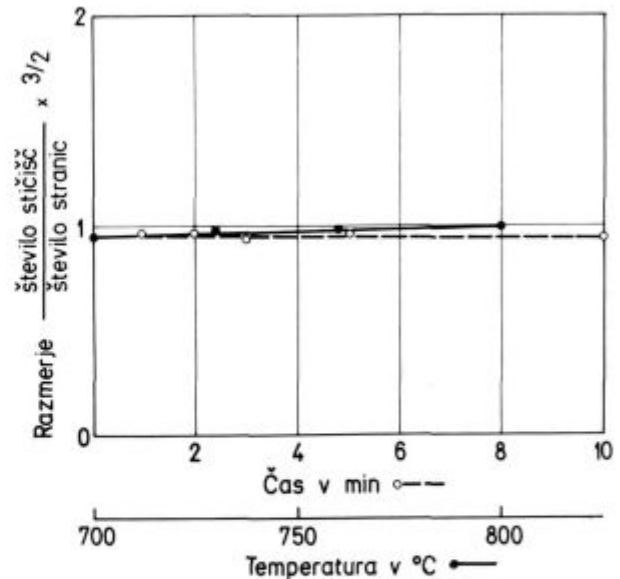
$$\mu = \sum_{n=3}^{\infty} (n-6)^2 f_n$$

s  $f_n$  deležem zrn z  $n$  stranicami.

Poglejmo, kako se empirični rezultati ujema s to odvisnostjo. Za 5 min. zadržanje pri temperaturi 700°C je  $\mu = 3,27$ . Če upoštevamo, da je povprečno število stranic sosedov  $m_n = 6,68$ . Empirično je za iste pogoje žarjenja določeno  $m_n = 6,54$ , kar je zadovoljivo ujemanje. Ujemanje je še boljše v primeru 5 min. žarjenja pri 800°C, kjer je izračunano  $m_n = 6,69$ , empirično pa določeno  $m_n = 6,62$ . V drugih primerih so razlike večje. Odstopanja niso velika, pa tudi ne sistematična in njihovo poreklo je verjetno tudi statistično odstopanje meritev. Varianca  $\mu$  je namreč v razponu od 3,23 do 2,83. Če upoštevamo povprečno varianco vseh meritev, razen za 1 min. zadržanje pri 700°C, izračunamo po Weairu, da je povprečno  $m_n = 6,64$ , povprečno empirično pa je določeno  $m_n = 6,55$ , kar je zadovoljivo ujemanje in potrjuje teoretično predvidevanje. Odstopanje je večje v primeru, ko zrna rastejo v nepopolnoma rekristaliziranem okolju, ali pa, če kak nov efekt vpliva na mobilnost kristalnih mej, na primer že omenjene segregacija ogljika po mejah zrn.

## 6. STIČIŠČA TREH ALI VEČ ZRN

Vsako zrno ima toliko stranic, kolikor ima v dvodimenzionalni ravnini mest, kjer se dotika svojih sosedov, ponavadi treh, redko štirih. Vendar pa v realni mikrostrukturi število stranic ni enako številom stičišč, ker stranice ( $n$ ) pripadajo samo dvema zrnoma, stičišča ( $s$ ) pa trem ali več zrnoma. Na sliki 14 je prikazano razmerje  $3s/2n$  v odvisnosti od izotermnega zadržanja pri 700 in od izohronega zadržanja v razponu temperature 700 do 800°C. Razmerje je konstantno pri 700°C in rahlo raste, ko raste temperatura, vendar ostaja vedno pod 1. Torej je stičišč 4 zrn tem manj, čim višja je temperatura žarjenja, vendar pa je razlika majhna in neodvisna od časa zadržanja 1 do 10 minut pri 700°C, pri katerem zrna zrastejo več kot dvakrat. Pri 700°C je ca. 5% stičišč s 4 zrn, pri 800 pa okoli 1%. V obeh primerih je to število majhno



Slika 14.

Vpliv trajanja žarjenja pri 700°C in med 700 do 800°C na razmerje števila stičišč in števila stranic

Fig. 14

Influence of annealing time at 700°C, and in the range 700 to 800°C on the number of contact points/number of sides ratio

in je zato vprašljivo, koliko stičišča s 4 zrn v 2-dimenzionalni ravnini, ki so manj stabilna od stičišč s tremi zrn (9), pomembno vplivajo na kinetiko rasti zrn.

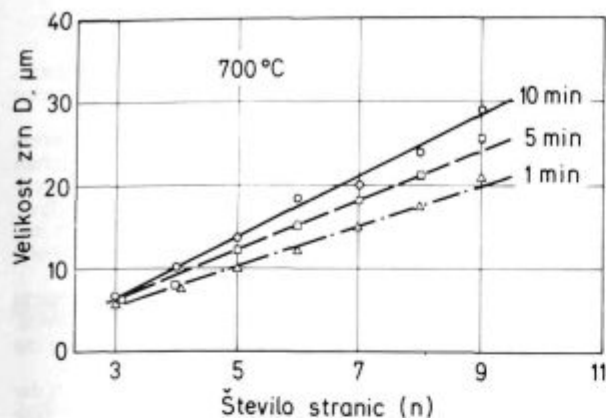
## 7. VELIKOST ZRN Z RAZLIČNIM ŠTEVILOM STRANIC

Teorija predvideva, da so zrna z več stranicami večja iz dveh razlogov. Eden je, da je pri njih zaradi poliedrične oblike z več ploskvami, ki se bolj približujejo krogli, delež površinske energije proti celotni energiji manjši, zato je tudi manjša skupna energija zrna, drugi pa je, da se zrna z več kot 6 stranicami lahko uredijo v prostorski sklad le, če so njihove meje konkavne, med tem imajo zrna z manj kot 6 stranicami konveksne meje (3). Opazovanje realnih mikrostruktur na obrusku včasih pokaže, da raste zrno z manj stranicami v 2-dimenzionalni ravnini na račun zrna z več stranicami. Razlaga za tak primer je v preseku poliedrov, ki imata v prostoru različno število ploskev, pri čemer je lahko presek čez tistega, ki ima več ploskev prostoru, v 2-dimenzionalni ravnini poligon z manj stranicami. V povprečju pa zrna z več stranicami rastejo na račun zrn z manj stranicami. Na sliki 15 je prikazana odvisnost med številom stranic in linearno velikostjo zrn za tri čase žarjenja pri 700°C. V vseh primerih povprečna velikost zrn ( $R$ ) raste proporcionalno s številom stranic. Odvisnost opisuje enačba:

$$R = k_3 (n - n_0)$$

z  $n_0 = 1$ . To odvisnost je empirično ugotovilo že več avtorjev (8, 9, 10), z računalniško simulacijo so jo potrdili Rollovitz in sodelavci (11), ki so tudi našli, da je  $n_0 = 2$ , teoretično pa jo je utemeljil Rivier (12). Je logična, zato ker proces rasti poteka na mejah.

Izohromno zadržanje v temperaturnem razponu 700 do 800°C (slika 16) kaže tudi enako odvisnost med številom stranic in povprečno velikostjo, z  $n_0$  nekoliko pod 1. Velja ponovno opozoriti, da sta odvisnosti za temperaturi 700 in 730°C zelo blizu in znatno nižji kot odvisnosti za 760 in 800°C.

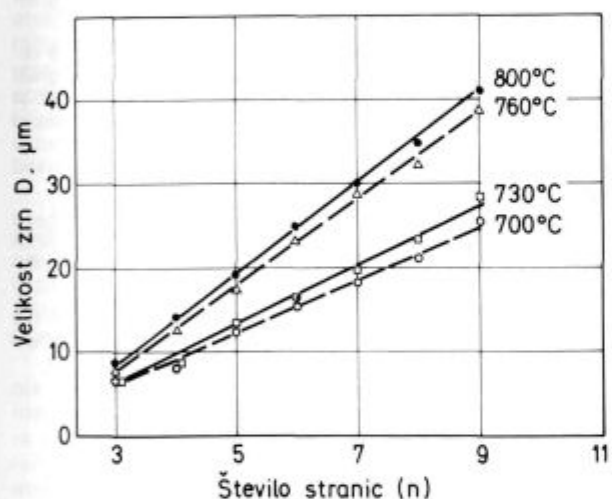


Slika 15.

Odvisnost med številom stranic in povprečno velikostjo zrn, ki je izražena s povprečnim premerom D za tri različne čase žarjenja pri 700 °C

Fig. 15

Relationship between the number of sides and the average grain size, expressed by the average diameter D for three various times of annealing at 700 °C



Slika 16.

Odvisnost med številom stranic zrn in povprečno velikostjo zrn, ki je izražena s povprečnim premerom D za 5-minutno žarjenje v razponu temperature 700 do 800 °C

Fig. 16

Relationship between the number of grain sides and the average grain size, expressed by the average diameter D for 5-minute annealing between 700 and 800 °C

## SKLEPI

Izvršena je topološka analiza procesa rasti feritnih zrn v jeklu z 1,8 % Si, 0,3 % Al in 0,02 % C v temperaturnem intervalu 700 do 800 °C in v trajanju do 10 min. žarjenja. Za poskuse je bila uporabljena 0,35 mm debela pločevina, hladno deformirana nad 80 %. Žarjenje se je izvršilo v svinčeni kopeli. Velikost zrn in podatki za ovrednotenje njihove oblike so dobljeni z ročnim merjenjem in štetjem na posnetkih s povečavo 200 in 1000 × z dvojno standardno velikostjo.

Raziskava je pokazala naslednje:

— kinetika izotermne rasti rekristaliziranih zrn pri 700 °C sledi parabolični odvisnosti z koeficientom  $e = 1/2$ , ne glede na to, ali se meri površina zrna ali pa njihov premer;

— v procesu rasti zrn ostaja porazdelitev zrn po številu stranic konstantna in anormalna. Največ zrn ima 5 stranic, povprečje pa pri trajanju žarjenja nad 5 min. pri 700 °C limitira k 5,55 stranicam. S povišanjem temperature se porazdelitev pomika k večjemu deležu zrn s 6 stranicami;

— število stranic sosedov ( $n_s$ ) nekega zrna se zmanjšuje, ko raste število stranic zrna med njimi ( $n_p$ ). V grobem približno velja, da je povprečno število stranic sosednih zrn  $n_s \approx n_p + 1$ . Sicer pa  $n_s$  rahlo pada pri žarjenju 1 do 10 min. pri 700 °C, po pet minutnem žarjenju pa je nižje pri 730 in 760 °C, kot pri 700 in 800 °C;

— število stičišč štirih zrn dosega največ 4 % celotnega števila stičišč zrn. Iz tega sklepamo, da stičišča ne vplivajo pomembno na kinetiko rasti zrn;

— linearna velikost zrn je sorazmerna številu njihovih stranic v vsem časovnem in temperaturnem razponu žarjenja jekla.

## LITERATURA

1. F. Vodopivec, F. Marinšek: Steel Research 57, 1986, 10, 531
2. F. Vodopivec, F. Marinšek, F. Grešovnik, O. Kürner: Želzarski Zbornik 21, 1987, 1, 29
3. H. V. Atkinson: Acta Metallurgica 36, 1988, št. 3469
4. A. D. Rollett, D. J. Srolovitz, M. P. Anderson: Acta Metallurgica 37, 1989, 4, 1227
5. J. E. Burke, D. Turnbull: Progr. Met. Phys. 1952, 220
6. F. Vodopivec, F. Marinšek: Poročilo MI Ljubljana, 88.034, 1988
7. M. Hillert: Acta Metallurgica 13, 1965, 227
8. C. H. Desch: J. Inst. Metals 22, 1919, 241, Loc. cit. ref. 12
9. P. A. Beck: Adv. Phys. 3, 1954, 245. Loc. cit. ref. 12
10. D. A. Aboav, T. G. Langdon: Metall. 1, 1969, 333 in 2, 1969, 171. Loc. cit. ref. 12
11. D. J. Srolovitz, M. P. Anderson, P. S. Dahni in G. S. Grest: Acta Metallurgica 32, 1984, 793
12. N. Rivier: Philosophical Magazine B, 52, No. 3, 1985, 795

## ZUSAMMENFASSUNG

Topologische Analyse des Ferritkornwachstumsprozesses im Stahl mit 1,8 % Si, 0,3 % Al und 0,02 % C im Temperaturintervall 700 bis 800 °C und einer Glühzeit bis 10 Min. ist durchgeführt worden. Für die Untersuchungen ist 0,35 mm starkes kaltgewaltes Blech mit einem Verformungsgrad über 80 % angewendet worden. Das Glühen ist im Bleibad durchgeführt worden. Korngrösse und Angaben für die Bewertung deren Form sind durch Handmessungen und Zählung auf Aufnahmen 200× und 1000× mit zweifacher Standardgrösse, erreicht worden.

Untersuchungen haben folgendes gezeigt:

— Die Kinetik von isothermen Wachstum der rekristallisierten Körner bei 700 °C folgt der parabolischen Abhängigkeit mit dem Koeffizienten  $e = 1/2$  unabhängig davon ob die Kornfläche oder deren Durchmesser gemessen wird;

— Im Kornwachstumsprozess bleibt die Kornverteilung nach der Seitenzahl konstant und abnormal. Die grösste Zahl der Körner hat 5 Seiten. Der Durchschnitt limitiert bei einer

Glühzeit über 5 Min bei 700 °C zu 5,55 Seiten. Mit der Temperaturerhöhung verschiebt sich die Verteilung zu grösserem Anteil der Körner mit 6 Seiten.

— Die Seitenzahl von benachbarten Körnern ( $n_s$ ) eines Kornes wird kleiner von der Zahl der Seiten des Kornes zwischen denen ( $n_c$ ) er wächst. In grober Annäherung gilt, dass die durchschnittliche Zahl der Seiten von Nachbarkörnern  $n_s \approx n_c + 1$  ist. Anderfalls fällt  $n_s$  nur sanft beim Glühen von 1 bis 10 Min. bei 700 °C. Nach fünfminütiger Glühung ist es niedriger bei 730 und 760 °C als bei 700 und 800 °C;

— Die Zahl der Kontaktpunkte von vier Körnern erreicht höchstens 4 % von der Gesamtzahl der Kornkontaktpunkte. Daraus kann entnommen werden, dass die Kontaktpunkte die Kornwachstumskinetik nicht bemerkenswert beeinflussen;

— Die lineare Korngrösse ist verhältnismässig gleich der Seitenzahl im gesamten Zeit und Temperaturintervall der Glühung von Stahl.

## SUMMARY

The topology analysis of the ferrite grain growth process in steel with 1.8 % Si, 0.3 % Al, and 0.02 % C was made in the temperature range 700 to 800 °C, and for up to 10 minutes annealing. Tests were made with a 0.35 mm thick sheet, being cold deformed for over 80 %. The annealing was done in the lead bath. The grain sizes and the data for the evaluation of their shapes were determined by manual measuring and counting on photographs at magnifications of 200 and 1000 times with double standard size.

The investigation gave the following conclusions:

— kinetics of isothermal recrystallized grain growth at 700 °C follows the parabolic law with the coefficient  $e = 1/2$  regardless to the measured surface area or diameter of grains;

— in the grain growth process the distribution of grains according to the number of their sides remains constant and abnormal. The majority of grains has 5 sides while the average number for a 5 minute annealing at 700 °C approaches to the

value of 5.5 sides. The increased temperature shifts the grain distribution towards those with 6 sides.

— the number of sides of neighbouring grains ( $n_s$ ) is reduced with the increased number of sides of a central grain ( $n_c$ ). In rough approximation the average number of sides of neighbouring grains is  $n_s \approx n_c + 1$ . Further, a slight reduction of  $n_s$  was observed in progressive annealing from 1 to 10 minutes at 700 °C, after 5 minute annealing it was lower at 730 and 760 °C than at 700 and 800 °C;

— number of four-grain contact points does not exceed 4 % of total number of grain contact points. Thus the conclusion can be made that contact points do not essentially influence the kinetics of grain growth;

— linear grain size is proportional to the number of the grain sides in the overall time and temperature intervals of annealing steel.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведен был топологический анализ процесса роста ферритных зерн в стали с 1,8 % Si, 0,3 % Al и 0,02 % C в температурном интервале 700 до 800 °C и с продолжительностью 10 мин. отжига. Для испытания использовали холоднодеформированный (свыше 80 %) лист толщиной 0,35 мм. Отжиг произведен в свинцовой ванне. Величина зерн и данные, необходимые для оценки их формы, получены ручным измерением и вычислением на съёмках, увеличенных на 200 и 1000 раз с двойным стандартным размером.

Испытание показало следующее:

— кинетика изотермического роста рекристаллизованных зерн следит за параболической зависимости с коэффициентом  $e = 1/2$ , независимо от того измеряем ли поверхность зерн или их диаметр;

— в процессе роста зерн остается разделение зерн по числу сторон константно и аномально. Большинство зерн имеет 5 сторон, при отжиге продолжительностью свыше

5 мин при 700 °C число сторон в среднем лимитирует к 5,55 сторон. Повышением температуры разделение зерн по числу сторон имеет тенденцию повышения доли зерн с 6 сторонами;

— число сторон соседей ( $n_c$ ) одного зерн уменьшается с ростом число сторон зерн между ними ( $n_n$ ). В основном можем сказать, что среднее число сторон соседних зерн составляет  $n_c \approx n_n + 1$ . Ну,  $n_c$  несколько уменьшается при отжиге 1 до 10 мин и при 700 °C, а после 5 мин отжига является меньшим при 730° и 760 °C чем при 700° и 800 °C;

— число точек соприкосновения 4 зерн достигает макс. 4 % общего числа точек соприкосновения зерн, из чего можно заключить, что точки соприкосновения не имеют большего значения за кинетику роста зерн;

— линейная величина зерн является соразмерной числу их сторон во всем временном и температурном интервале отжига стали.