

Mikrostrukturna dogajanja med žarjenjem jekla z 0,035 % C in 1,96 % Si v temperaturnem intervalu 680 do 915 °C

DK: 669-151.63 : 539
ASM/SLA: I 23 s, M 27

F. Vodopivec in B. Ralić

Na vzorcih jekla, ki so bili ogrevani v nevtralni in razogljivevalni atmosferi, smo izvršili mikroskopske preiskave in preiskave na elektronskem mikroanalizatorju. Določili smo vpliv temperature in trajanja ogrevanja na sestavo ferita in avstenita v jeklu ter kinetiko razogljivenja. Eksperimentalni rezultati omogočajo razlago izmenjalnih reakcij, ki vplivajo na stabilnost avstenita v jeklu. Poenostavljeni račun kaže, da avstenitna faza ne vpliva na kinetiko razogljivenja jekla, ki pri nižjih temperaturah raste z rastjo difuzijske konstante za ogljik v feritu, pri višjih temperaturah pa pada s padanjem topnosti ogljika v feritu.

Jeklo smo dobili v obliki toplo valjanega neluženega traku z debelino 2,7 mm. Trak je bil obojestransko razogljiven do globine ca. 0,10 mm. Saržna analiza jekla je naslednja: 0,035 % C; 1,96 % Si; 0,22 % Mn; 0,005 % P; 0,012 % S; 0,15 % Cu; 0,02 % Cr; 0,07 % Ni; 0,04 % Zr in 0,009 % Al. V začetku smo želeli opredeliti hitrost raztapljanja perlita, rezultati dobljeni med delom pa so nas navedli na nekoliko širšo raziskavo, saj se je pokazalo, da je potrebno poizkuse razširiti tudi na razogljivenje, da ne bi dobili preveč statične predstave o dogajanjih med žarjenjem jekla.

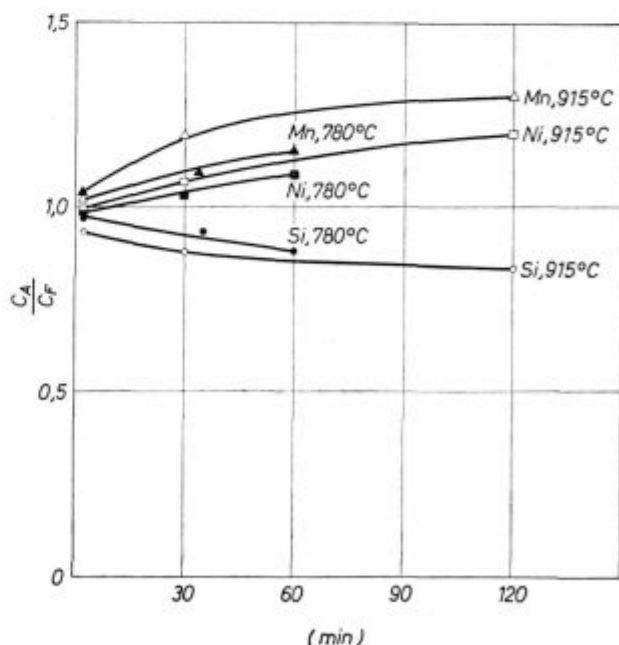
Po toplem valjanju ima jeklo mikrostrukturo iz ferita in zelo malo lamelnega perlita, ki je zbran v zelo drobnih kolonijah ob trikotnih stikih kristalnih zrn. Jeklo ohranja dvofazno mikrostrukturo v vsem temperaturnem intervalu, ki prihaja v poštev za normalna žarjenja, feritno perlitno pod Acl in feritno avstenitno nad to temperaturo.

Pogoji pri ohlajanju jeklenega traku po vročem valjanju so taki, da se ne more izvršiti do kraja razmešanje elementov, predvsem silicija in mangana, med avstenitno in feritno fazo. To se pokaže v tem, da vsebuje ferit več mangana in ogljika ter manj silicija, kot bi ga bilo v ravnotežnem stanju. Med ogrevanjem pri temperaturi obstojnosti avstenita in ferita prihaja zato v jeklu do prerazdelitve elementov, ki ima za posledico bogatenje avstenita z manganom in ogljikom ter

siromašnja avstenita z alfažnim silicijem. To lepo potrjujejo rezultati na sliki 1, na kateri vidimo kako se s trajanjem ogrevanja pri 780 in 915 °C spreminja poprečna vsebnost mangana, silicija in niklja v avstenitu. Analize smo napravili s pomočjo elektronskega mikroanalizatorja. Gonilna sila prerazdelitve je pri isti aktivnosti različna koncentracija alfažnih in gamažnih elementov v feritu in avstenitu. Razlika v ravnotežni koncentraciji je tolikšna, kolikor je široko dvofazno področje v ustreznih binarnih sistemih ali kvazibinarnih presekih ternarnih sistemov. V strokovnem tisku ni eksperimentalnih podatkov o širini teh področij, verjetno zato ker so potrebna ravnotežna žarjenja predolga, zamudna pa so tudi točne analize posameznih faz.

Prerazdelitev elementov ima za posledico tudi spremembo mikrostrukture.

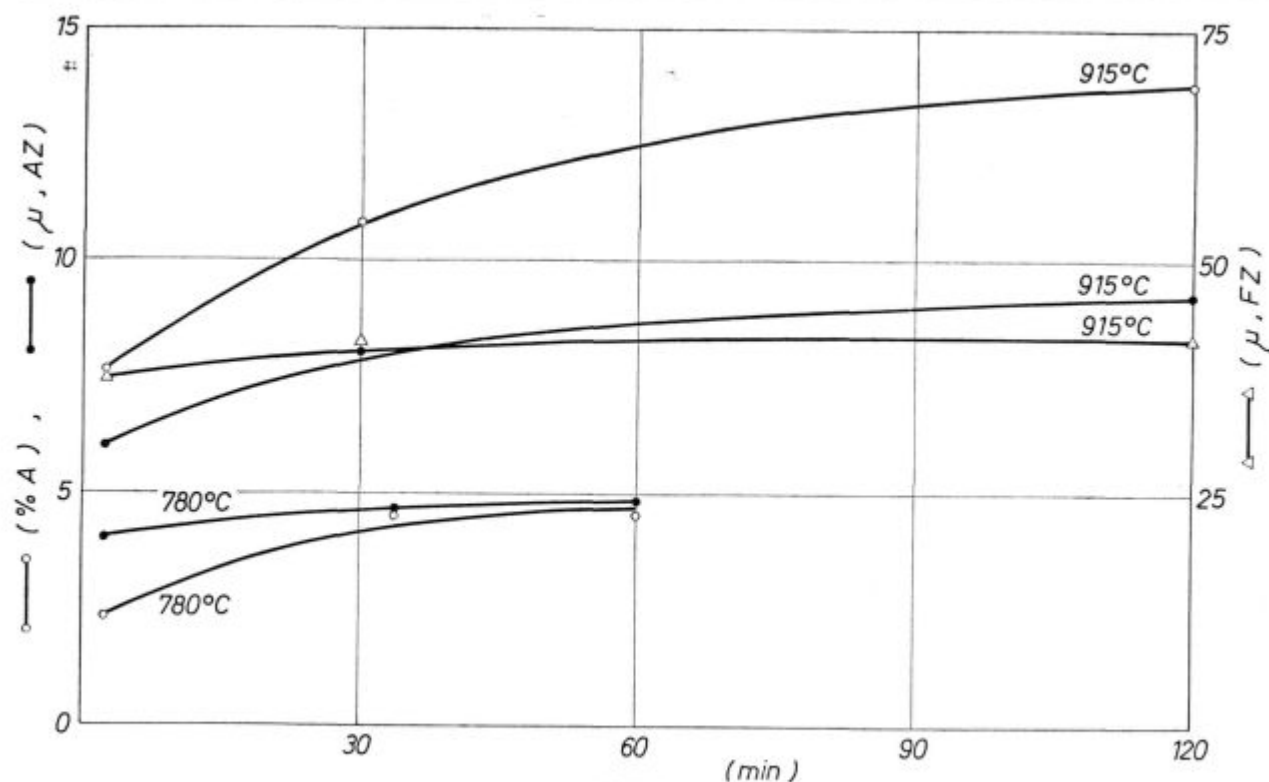
Na sliki 2 vidimo, da s trajanjem izotermnega žarjenja raste količina avstenita v jeklu in velikost avstenitnih zrn, ne spreminja pa se praktično velikost feritnih zrn. To se lepo vidi tudi, če primerjamo mikroposnetke 3 in 4 ter 5 in 6.



Slika 1

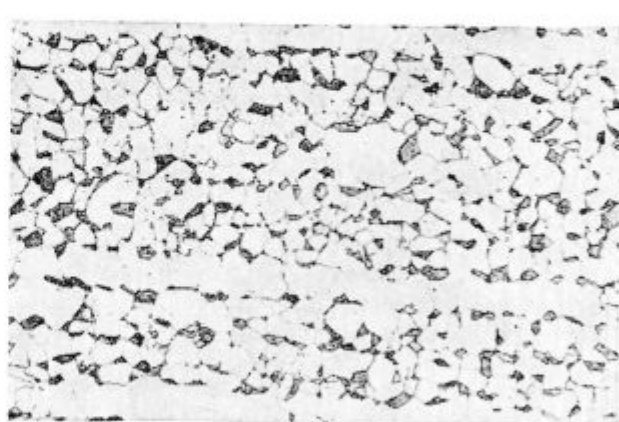
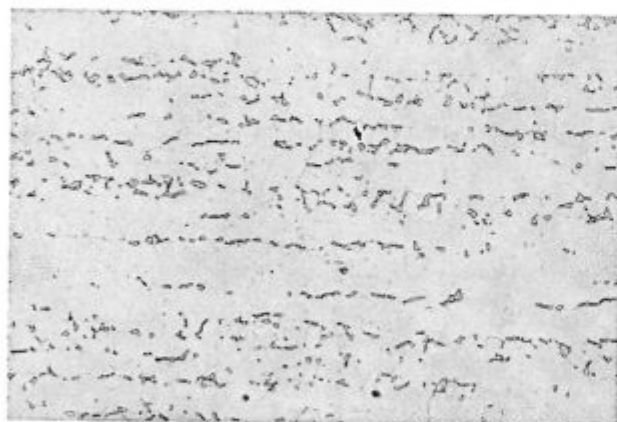
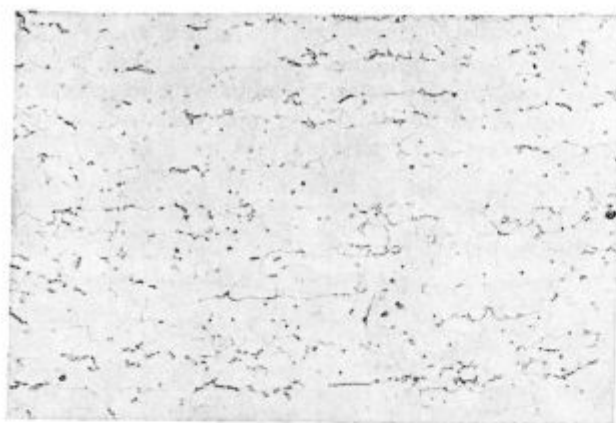
Vpliv trajanja žarjenja pri temperaturah 915 in 780 °C na razmerje koncentracije elementov v avstenitu (C_A) in feritu (C_F)

Franc Vodopivec je doktor tehniških znanosti in samostojni raziskovalec na metalurškem inštitutu v Ljubljani. Boško Radić, višji tehnik na metalurškem inštitutu v Ljubljani.



Slika 2

Vpliv trajanja ogrevanja pri temperaturah 915 in 780° C na delež avstenita (A), velikost avstenitnih zrn (AZ) in velikost feritnih zrn (FZ)



Slika 3 in 4

200×

Vzorca sta bila ogrevana 2 min oz. 60 min pri 780° C

Slika 5 in 6

200×

Vzorca sta bila ogrevana 2 min oz. 120 min pri 915° C

Pri ogrevanju dinamo jekla, ki ima začetno feritno-perlitno mikrostrukturo, pri temperaturi nad A₁ točko, ne prihaja torej do raztapljanja cementita v feritu, ampak se perlitne kolonije pretvorijo v avstenit, ki ga je z nadaljevanjem žarjenja vedno več in je bolj in bolj stabilen.

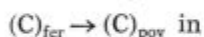
Iz ravnotežnega sistema (Fe, Si)-C vemo, da pri 2 % Si, avstenit pod 780 °C ni več obstojen¹.

Na preiskanem jeklu spodnje temperature obstojnosti avstenita eksperimentalno nismo določali. Isti vir navaja, da ima avstenit v jeklu z 2 % Si pri 800 °C 0,53 % C, pri 900 °C 0,25 % C in pri 1000 °C 0,076 % C.

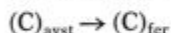
Iz vsega tega lahko sklepamo, da raste količina avstenita pri izotermnem žarjenju zato, ker se v njem zbira ogljik iz ferita, pri povečanju temperature pa zraste količina avstenita predvsem zato, ker za obstojnost potrebuje manjšo količino ogljika, zaradi česar se pri enaki količini ogljika v jeklu poveča volumen avstenitne faze.

Opisane spremembe potekajo, če so mogoče le izmenjave legirnih elementov med feritom in avstenitom, proces pa se spremeni, če je mogoče še oddajanje ogljika v atmosfero, do česar prihaja pri razogljivevalnem žarjenju. Ko se vzpostavi gradient koncentracije ogljika v obrobem delu pločevine, oddaja v notranjosti ferit ogljik istočasno avstenitnim otokom in proti atmosferi. Ko pa se zaradi razogljivenja aktivnost ogljika v feritu zmanjša pod aktivnost v avstenitu, se smer reakcije obrne in avstenit oddaja ogljik feritu, ta pa ga odvaja naprej v atmosfero.

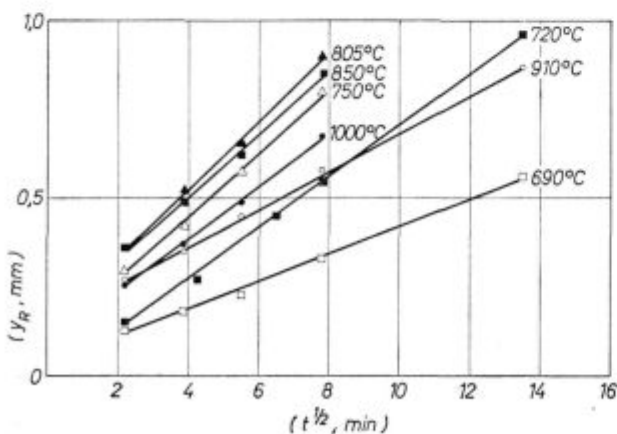
Reakcijam razogljivenja čistega ferita:



$(C)_{\text{pov}} + O \rightarrow CO$, ki ustvarjata gradient ogljika v razogljivenem sloju jekla in odvajata kisik v atmosfero, se pridruži še reakcija

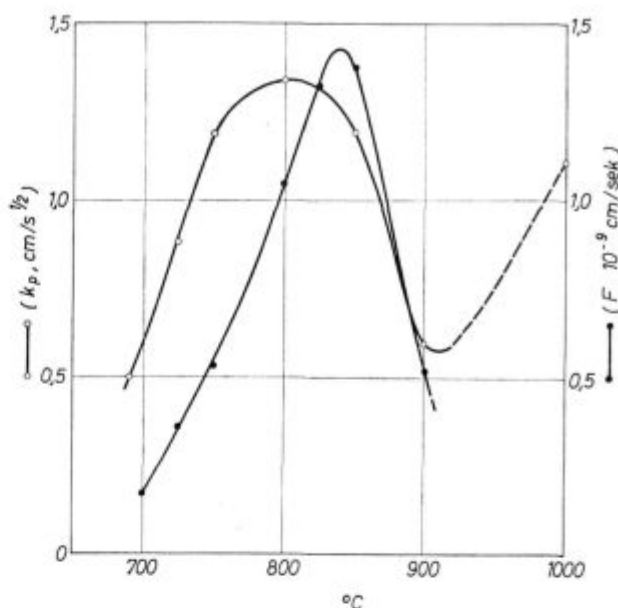


s katero avstenitni otoki oddajajo ogljik feritu, ki jih obdaja, zaradi česar se zmanjšuje količina



Slika 7

Hitrost rasti razogljivenega sloja pri različnih temperaturah. Na ordinati je globina razogljivenja (Y_p) na abscisi pa čas v parabolični koordinati



Slika 8

Vpliv temperature na velikost konstante k_p in velikost difuzijskega toka F

avstenita v jeklu. Izgorevanje ogljika na površini z zračnim kisikom, vodno paro ali ogljikovim dioksidom je hitra reakcija in v standardnih pogojih gotovo ne more biti merodajna za kinetiko razogljivenja.

Iz izkušenj vemo, kažejo pa tudi meritve na našem jeklu, da je kinetika razogljivenja, kot kinetika vseh difuzijskih pojavov, parabolične oblike. Če na absciso nanesemo čas v paraboličnih enotah ($t^{1/2}$) in na ordinato globino razogljivenja (y_p), dobimo ravne črte, katere je mogoče opisati z enostavno enačbo:

$$y_p = K + K_p t^{1/2}$$

V izrazu je K konstanta, K_p pa parabolična konstanta, katere velikost je merilo za hitrost razogljivenja.

Na sl. 7 je prikazana kinetika razogljivenja pri ogrevanju v vlažnem vodiku. Na sl. 8 pa vidimo, kako se spreminja s temperaturo velikost parabolične (kinetične) konstante.

Če bi bil pojav razogljivenja odvisen samo od temperature, bi morala njegova hitrost rasti s temperaturo, saj difuzijski koeficient za ogljik v feritu in v avstenitu s temperaturo raste.

Poizkusi pa kažejo, da to ne drži, ampak da hitrost razogljivenja raste do določene temperature, nato pada, pri nadaljnem povečanju temperature pa znova raste.

Iz nauka o kovinah vemo, da je tok atomov snovi (F), ki difundira, sorazmeren produktu difuzijske konstante (D) in gradienta koncentracije (dc/dx). V poenostavljeni obliki lahko to napišemo kot

$$F = D \frac{dc}{dx}$$

Iz tega izraza lahko izračunamo difuzijski tok, če izberemo globino razogljichenja, poznamo vrednost za difuzijsko konstanto in predpostavimo, da je na meji kovina-atmosfera koncentracija ogljika zanemarljivo majhna v primerjavi s koncentracijo na meji, kjer se v notranjosti kovine začne razogljichen pas, oziroma na kratko povedano, predpostavimo, da je Δc enak topnosti ogljika v feritu pri določeni temperaturi.

V literaturi nismo našli podatkov o topnosti ogljika v silicijevem železu, zato smo pri našem računu uporabili podatke o topnosti ogljika v alfa železu, katere smo posneli po faznem diagramu Fe-Fe₃C, katerega navaja Hansen². Vrednost za difuzijsko konstanto za ogljik v feritu smo povzeli po Lordu in Beshersu³.

S temperaturo se nad A_{c1} topnost ogljika v feritu toliko zmanjša, da se kljub rasti difuzijske konstante, vrednosti difuzijskega toka nad približno 830° C znova zmanjšuje. Praktični poskusi kažejo, da je hitrost razogljichenja največja pri približno 800° C. Razlika med teoretično in praktično temperaturo največje hitrosti razogljichenja je sprejemljivo majhna. Najverjetneje je ta razlika posledica premalo točnega poznavanja vrednosti za difuzijo in za topnost ogljika v silicijevem feritu.

Na kratko torej praktične ugotovitve in teoretično analizo lahko rezumiramo takole:

a) Po prekoračenju A_{c1} temperature nastanejo iz perlitnih kolonij v jeklu z 1,96 % C in 0,035 % C avstenitni otočki. Z nadaljevanjem izotermnega žarjenja raste velikost otočkov avstenita zato, ker

se bogati z ogljikom, ki prihaja iz ferita in se večja njegova obstojnost zato, ker se bogati z gamagenimi elementi, ki prihajajo iz ferita in siromaši z alfa genim silicijem, katerega oddaja feritu. Pri povišani temperaturi se poveča količina avstenita v jeklu zato, ker je pri višji temperaturi avstenit obstojen že pri manjši koncentraciji ogljika. Ogljik, ki je na voljo v jeklu, se zato razdeli na večjo prostornino.

b) Hitrosti razogljichenja v intervalu med 700 in 900° C je odvisna od produkta difuzijske konstante za ogljik v feritu in gradienta koncentracije ogljika v razogljichenem pasu. Pri tem pri nižji temperaturi prevladuje naraščanje difuzijskega koeficienta s temperaturo in zato hitrost razogljichenja raste, pri višji temperaturi pa prevladuje zmanjšanje topnosti ogljika v feritu in se zato hitrost razogljichenja zmanjšuje. Temperaturna odvisnost in oblika izotermne kinetike kažejo, da prisotnost avstenitnih otočkov v feritu in izmenjalne reakcije med feritom in avstenitom ne vplivajo na kinetiko razogljichenja.

Zahvaljujeva se UJZ Beograd, ki je materialno omogočilo, da se je to delo izvršilo in Metalurškemu Institutu Hasan Brkić v Zenici za preiskave na kvantitativnem mikroskopu.

Literatura:

1. Metals Handbook, ASM Cleveland, 1948
2. M. Hansen: Constitution of Binary Alloys: zal. McGraw-Hill, New York, 1958
3. A. E. Lord in D. N. Beshers: Acta Metal. 14, 1966, 1959

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Aufwärmen des Stahles entstehen beim überschreiten der A_{c1} Temperatur aus perlitischen Kolonien austenitische Inseln. Beim fortschreitenden isothermalen glühen werden diese Inseln grösser, weil der Austenit an Kohlenstoff, welcher von Ferrit kommt reicher wird. Die Beständigkeit dieser Inseln wird grösser weil der Austenit an gammagenen Elementen wie Mn und Ni, reicher und an alfa genen wie Si ärmer wird. Beim Temperaturanstieg wird die Austenitmenge grösser weil bei höherer Temperatur der Austenit schon bei einer kleineren Menge von Kohlenstoff beständig ist. Der zur Verfügung stehende Kohlenstoff im Stahl verteilt sich deshalb auf ein grösseres Austenitvolumen.

Die Entkohlungsgeschwindigkeit im Intervall zwischen 700° C und 915° C ist vom Wert des Produktes der Diffusi-

onskonstante und des Kohlenstoffkonzentrationsgradientes in etkohliter Stahlschicht abhängig. Bei niedriger Temperatur ist das Zunehmen des Diffusionskoeffizienten vorwiegend, so, dass die Enthohlungsgeschwindigkeit mit der Temperatur steigt, bei höherer Temperatur ist das abnehmen des Konzentrationskoeffizienten vorwiegend und es wird demnächst die Entkohlungsgeschwindigkeit kleiner. Die Temperaturabhängigkeit und die Form der Isothermen Kinetik zeigen, dass die Anwesenheit der austenitischen Inseln im Ferrit keinen Einfluss auf die Enthohlungsgeschwindigkeit ausübt, was ein Zeichen dafür ist, dass Übergang des Kohlenstoffes aus dem Austenit in den Ferrit schneller ist als die Diffusion des Kohlenstoffes gegen die Stahloberfläche.

SUMMARY

In heating steel austenite islands are formed out of the pearlite colonies after transgressing A_{c1} temperature. During further isothermal annealing the islands grow because the austenite is enriched by carbon diffusing from ferrite, and they are becoming more stable because austenite is enriched also by gammagenous elements, i.e. manganese and nickel, and impoverished by alfaogeneous silicon. The amount of austenite is increased with the

increased temperature because the austenite is stable at higher temperatures already at the lower carbon content. Carbon available in steel is thus distributed over a greater volume of austenite.

Decarburisation rate between 700 and 915° C depends on the product of diffusivity and concentration gradient of carbon in the decarburized steel layer. At lower tem-

peratures the increase of diffusivity prevails and the decarburisation rate increases with the increased temperature while at higher temperatures the reduction of the concentration gradient prevails and the decarburisation rate decreases. Temperature function and the shape of

isothermal kinetics show that presence of austenite islands in ferrite does not influence the decarburisation rate which means that the transition of carbon from austenite into ferrite is faster than the diffusion of carbon towards the steel surface.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При нагреве стали после превышения темп-ры A_{c1} выделяются из колонны перлита скопления аустенита. При продолжении изотермического отжига величина этих скоплений увеличивается, так как аустенит обогащается с углеродом который выделяется из феррита. В этом процессе увеличивается их стойкость, так как аустенит обогащается с гамма-генными элементами марганцем и никелем, а беднее на альфа-генным Si. Необходимо отметить, что аустенит более устойчив при высшей температуре уже при более низком содержании углерода, а при повышенной темп-ре его содержание увеличивается. Поэтому, находящийся на распорядке в стали углерод распределяется в более увеличен объеме аустенита. Быстрота обезуглероживания в интервале

между 700—915° C зависит от величины произведения постоянного числа диффузии и градиента концентрации углерода в обезуглероживанном слое стали преобладает увеличение коэффициента диффузии, поэтому быстрота обезуглероживания стали увеличивается, при более высокой темп-ре градиент концентрации уменьшается и, поэтому, быстрота обезуглероживания уменьшается. Температурная зависимость и форма изотермической кинетики показывает, что присутствие накоплений аустенита в феррите не влияет на быстроту обезуглероживания. Это указывает, что переход углерода из аустенита в феррит происходит быстрее чем диффузионный перенос этого элемента к поверхности стали.