

TARTALOMJEGYZÉK

	Oldal
1. Rövid összefoglalás	1.
2. Előszó	3.
3. Saját kísérletek	9.
3.1. Modellezések	9.
3.2. Kísérleti mérések	9.
A KÜLÖNBÖZŐ KARBONTARTALMU ACÉLOK	
BEOLVADÁSA KÖZBEN LEJÁTSZÓDÓ	9.
NÉHÁNY FOLYAMAT VIZSGÁLATA	15.
3.2.3. A hőkezelés során előforduló szilárd oldat- töltési problémák vizsgálata a hálószerkezetek tekintetében	27.
3.3. A hőkezelés kinetika	31.
3.3.1. Az oldódási sebesség és az oldódási mérték határolásai	33.
3.3.2. A hőkezelés során előforduló kinetika határolásai	51.
3.3.3. A hőkezelés során előforduló kinetika határolásai és a hőkezelés hatásainak Kandidátusi értekezés	57.
3.3.4. A hőkezelés során előforduló kinetika és az anyagok tulajdonságai	64.
3.3.5. Az új hőkezelési eljárások rövid összefoglalója (táblák)	70.
4. FELHASZNÁLT IRODALOM	73.
1. Függelék	75.
2. Függelék	77.

TARTALOMJEGYZÉK

	Oldal
1. RÖVID ÖSSZEFOGLALÁS	1.
2. ELŐZMÉNYEK	3.
3. SAJÁT KISÉRLETEK	9.
3.1 Modellkísérletek	9.
3.2 Olvasztási kísérletek	9.
3.2.1 A Tammann-kemencében és indukciós kemencében végzett beolvasztások	9.
3.2.2 A ráfagyási periódus vizsgálata	15.
3.2.3 A folyékony fürdőben olvadás alatt befagyasztott próbák vizsgálata a határrétegre	27.
3.3 A kísérletek kiértékelése	39.
3.3.1 Az olvadási görbék és az azokból levonható következtetések	39.
3.3.2 A ráfagyás számítása előmelegítés nélkül és előmelegítéssel	51.
3.3.3 A laboratóriumi vizsgálati eredmények összehasonlítása az ivkemence beolvadási körülményeivel	57.
3.3.4 A határréteg megközelítő értéke és az anyagátadás számítása	64.
3.3.5 Az új tudományos eredmények rövid összefoglalója (tézisek)	76.
4. FELHASZNÁLT IRODALOM	78.
1. Függelék	80.
2. Függelék	81.

1. RÖVID ÖSSZEFOGLALÁS

Az acélgyártás termelékenységének javítása a XX. század második felében a metallurgusok egyik főfeladatává vált. A beolvasztást követő metallurgiai folyamatok mélyreható elemzése és értelmezése segítségével új technológiai eljárásokat dolgoztak ki, melyekkel nagymértékben csökkentették az adagidőt, növelték az acélgyártás termelékenységét.

A vázolt fejlődés során a betétként szilárd acélhulladékot felhasználó acélgyártó eljárások egyes technológiai fázisainak időigénye úgy módosul, hogy a beolvadás periódusa egyre nagyobb hányada a teljes adagidőnek. Ez arra ösztönzi az acélgyártókat és a kutatókat, hogy az olvadásnak korábban kevésbé vizsgált törvényelt részleteiben felderítsék és ezúton rövidítsék az acélgyártásnak ezt az el nem kerülhető periódusát, a teljesítmény növelése céljából.

Az acél olvadásának eddig többnyire azt a változatát vizsgálták, amelyet lágy acélhulladéknak nagy karbontartalmú olvadékban való beolvadása valósít meg.

Ilyen beolvadási folyamat zajlik le az SM-kemencében a nyersvasbeöntést követően vagy az oxigénes konverterben a fúvatás első szakaszában, illetve a folyékony nyersvasat is alkalmazó ivkemence-gyakorlatban.

Az acélgyártás körülményei azonban sokkal változatosabbak.

Kisebb-nagyobb C-tartalmú szilárd hulladék különböző összetételű, a nyersvasénál kisebb C-tartalmú olvadékba merülhet és abban olvad meg.

Ilyen folyamat az ivkemencés technológiában a kétkosaras adagolási módszer esetében a már legalább részben, vagy egészben megolvadt fürdőbe bevitt második kosár tartalmának beolvadása, az ivkemence acélfürdőjébe folyamatosan bevitt apró (shredder, vagy - 2" -) hulladék vagy fémesített ércpellet, illetve brikett olvadása, továbbá a hagyományos ivkemence-technológia beolvasztási folyamata során az elektródák alatt keletkezett acélfürdőbe bebukó acélhulladék beolvadása is.

A gyakorlatban az acél olvadásának folyamata nem egyszerűsíthető le a lágy acélnek nyersvasban való beolvadására, amint azt a folyamat legtöbb kutatója tette. Ezért a kísérleteim céljából annak vizsgálatát tűztem ki, hogy milyen jelenségek előzik meg és kísérik különböző C-tartalmú szilárd acéldarabnak ugyancsak különböző összetételű olvadékban való megolvadását.

A vizsgált körülmények között az $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékletű, különböző karbontartalmú acélfürdőkben a 20°C kezdőhőmérsékletű, különböző karbontartalmú acélpróbák beolvadása során tapasztalt ráfagyási periódus és az olvadás összes időtartama annál nagyobb, minél kisebb az olvadék és az abba bemerülő acélpróba karbontartalma.

A tényleges olvadást megelőző ráfagyási periódus alatt ráfagyással párhuzamos olvadást is észleltem akkor, ha az olvadék anyagának likvidusz hőmérséklete jelentősen, például 85°C -szal nagyobb a bemerített acélpróbák anyagáénál.

Az üzemi méretű ivkemencék adatainak statisztikai értékelése azt mutatta, hogy a beolvadási karbontartalom $0,5 - 1,0\%$ -ig való növekedésével nő a beolvasztási teljesítmény. A kis beolvadási karbontartalmak ($< 0,25\%$) esetén észlelt legrosszabb beolvadási teljesítmény az olvadás mikrofolyamatainak tanulmányozása során, kis C-tartalmú fürdőben olvadó kis C-tartalmú acélpróbák esetében tapasztalt hosszú ráfagyási periódussal és hosszú teljes beolvadási idővel is magyarázható. Ennek ismeretében a metallurgiai szempontból egyébként is kerülendő és az acélgyártás termelékenységét is kedvezőtlenül befolyásoló kis - $0,25\%$ -nál kisebb - karbonbeolvadások megfelelő szervezési intézkedéssel megelőzhetők. Ezzel az elektroacélgyártás termelékenységé javítható.

A vizsgált metallurgiai körülmények között $70 - 170\ \mu\text{m}$ határrétegvastagságot mértem. A tényleges beolvadás folyamatában az anyagátadás lényegesen kisebb szerepet játszik vizsgálataim szerint, mint a hőátadás.

2. E L Ő Z M É N Y E K

Az acélgyártás termelékenységeinek javítása a XX. század második felében a metallurgusok egyik főfeladatává vált. A beolvasztást követő metallurgiai folyamatok mélyreható elemzése és értelmezése segítségével új technológiai eljárásokat dolgoztak ki, melyekkel nagymértékben csökkentették az adagidőt, javították a termelékenységet. A vázolt fejlődés során a szilárd acélhulladékot alkalmazó acélgyártó eljárások egyes technológiai fázisainak időigénye úgy módosult, hogy a teljes adagidő egyre nagyobb hányadát képezi a beolvasztás periódusa. Ez viszont a beolvasztás körülményeinek eddig kevésbé vizsgált törvényszerűségeinek kutatására ösztökéli az acélgyártókat annak érdekében, hogy ezen a területen is további teljesítménynövelést lehessen biztosítani.

Ezért célszerűnek tűnik, hogy a hideg acél folyékony acélfürdőben való beolvadásának körülményeit mikrométerekben megfigyeljük és kísérletet tegyünk ezen megfigyelések és a gyakorlati adatok közti összefüggés megfogalmazására.

Az acél beolvadásának problémáival foglalkozó irodalmat két csoportba oszthatjuk.

Az egyik csoport a beolvadás mikrofolyamatait kutatja. Ide sorolhatjuk azokat a munkákat is, melyek nem acél beolvadását vizsgálják ugyan, de a beolvadás általános érvényű jelenségeinek megfigyelése révén bizonyos útmutatást adhatnak jelen munka célkitűzéseinek eléréséhez.

A másik csoport az acél beolvadásának matematikai törvényszerűségeit kutatja és főleg az ipari méretű kemencékben lefolyó beolvadás problémakörét vizsgálja.

Az acél beolvadásának mikrofolyamatait fenomenológiailag közönséges hőmérsékleten végzett modellkísérletek segítségével is lehet tanulmányozni. A vízben attól eltérő sűrűségű anyagok oldódása során sűrűségkülönbségből létrejövő áramlás keletkezik. A jelenséget Brückner, R. [1]

[2] vizsgálta viznél nagyobb és kisebb sűrűségű anyagok oldódásának megfigyelése során.

Az acél beolvadásának problémakörét olyan kutatások során vizsgálták legelőször, amelyek célja a karbonnak a folyékony vasban oldódásának tanulmányozása volt. Ennek a folyamatnak megismerése azért is célszerű, mivel a gyakorlati acélgyártásban, így az ivkemencében gyártott nagy karbontartalmú adagok készítésekor, vagy acélfürdők szükségszerű felkarbonizálásakor a karbon oldódása végbemegy.

Dahlke, O. és Knacke, O. [3] vizsgálódásának célja annak beigazolása volt, hogy Nernst, W. szilárd anyagoknak, folyadékokban oldódására kidolgozott általános elmélete szilárd karbon folyékony vasban oldódására is vonatkozik.

Vertman, A. A. és Samarin, A. M. [4] 1570, 1650, 1750 és 1850 °C hőmérsékletű vasfürdőben vizsgálták a karbon oldódásának kinetikáját. Armco-vasat használtak kiinduló anyagként, melyet ellenállás-fűtő kemencében, zárt grafittégelyben, hélium-atmoszférában olvasztottak meg, majd grafitrudat vezettek a fürdőbe. A különböző ideig tartó oldás után a fürdőt a kemencéből kiemelve hélium-áramban hűtötték le, majd a C-tartalmat vizsgálták. A nyert adatok alapján rögzítették a fenti hőmérsékleteken végbemenő karbonoldódás időbeni lefolyását és a telítési C-koncentrációt. A karbonoldódás kezdeti szakaszát a gyors oldódás miatt megfelelő pontossággal nehéz volt a kiválasztott módszerrel nyomon követni. Ezért célszerűen módosított kemencében végrehajtott oldás után az 1700 °C-ról a kristályosodásig 0,5 min-t nem meghaladó hűtési időt realizálva a megmevedett fém súlyának változásából határozták meg az oldott karbon mennyiségét. A vizsgált hőmérsékletek ennél a kísérletsorozathoz 1570, 1670 és 1710 °C voltak.

Abból az oldódás-kinetikai elképzelésből indultak ki, hogy az oldódási folyamat két szakaszból áll. Az első szakaszban karbon-atomok kerülnek az olvadék határrétegébe, a második szakaszban pedig az oldott anyag a fürdő térfogatába diffundál.

Pehlke, R. D., Goodell, P. D. és Dunlap, R. W. [5] 1260, 1370 és 1455 °C hőmérsékletű, 4,2 % C, 0,5 % Mn és 0,8 % Si-összetételű nyersvas fürdőben vizsgálta 0,20 % C-tartalmú acél beolvadásának kinetikáját.

A 12,7, 19,1, 25,4, 38,1 és 50,8 mm átmérőjű, 305 mm hosszú acélrudakat 90 kg indukciós kemencében megolvasztott fürdőben 180-200 mm bemerülési hosszal olvasztottak be különböző ideig és különböző mértékű fürdőmozgás mellett. A fürdőből kivett próbákat vízben hűtötték le és mikrométerrel átmérőt mértek. Ellenőrzésül vizkiszorításos módszert alkalmaztak.

A fürdők állapotát a következő négy körülménnyel lehet jellemezni:

1. Indukciós keverés a hőntartáshoz szükséges hevítés révén,
2. Indukciós keverés és a fürdőbe merített acélpróba forgatása (mechanikus keverés),
3. Mechanikus keverés
4. Mind az indukciós, mind a mechanikus keverés mellőzése, a fürdőben csak természetes áramlás uralkodik.

A próbák beolvadásának dr/dt sebessége az időben állandó volt, de minden vizsgált fürdőhőmérsékletre, fürdőösszetételre, próbaátmérőre és fürdőmozgatási módra vonatkozóan más és más értéket adott. A beolvadás sebessége nő a fürdő hőmérsékletével, a fürdő összetétele és az egyensúlyi likvidusz összetétel közti különbség növekedésével és a fürdő mozgatásának intenzívebbé tételével.

Különösen a nagyobb átmérőjű rudakon a beolvadás kezdeti periódusában és főleg a kisebb hőmérsékleteken ráfagyást figyeltek meg. Ez a jelenség a nagyobb átmérőjű próbák beolvadási sebességének csökkenéséhez vezetett.

A beolvadás mechanizmusának értelmezésére Brunner-nek forgó henger és egy folyékony fázis közti anyagátadásra vonatkozó összefüggését használták fel. A beolvadás törvényszerűségeinek matematikai megfogalmazásakor elhanyagolták a szilárd fázisban végbemenő diffúziót.

A fürdőbe merített acélrudat kiemelés után vízben hűtve metallográfiai vizsgálat alapján 0,25 mm nagyságrendű határréteg-vastagságot figyeltek meg a rúd alapszövege és a rátapadt nyersvasréteg közti szövetváltás figyelembevételével. A kidolgozott összefüggés és a kísérleti adatok felhasználásával $D = 3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ értéket kaptak.

A karbon vasban mérhető diffúziós együtthatójának és a diffúziós határréteg vastagságának aránya $[D_c/\delta]$, azaz az anyagátadási tényező a fenti vizsgálatok szerint a fürdő mozgatásának mértékének növelésével nő, de a vizsgált különböző hőmérsékletekre és összetételekre közel azonos értékű.

A kialakított és a beolvadás folyamatára jól alkalmazható kinetikai modell a határréteg diffúziós mechanizmusán alapul, amelynek sebességét a karbon folyékony fázisban történő szállítása határozza meg.

Glinkov, M. A., Filimonov, Ju. P. és Jurevics, V. V. [6] ugyancsak vizsgálták az acél folyékony nyersvasban való beolvadását.

0,16 - 0,22 % C-tartalmú, 30 mm átmérőjű acélrudakat olvasztottak be 2,7, 3,5 és 4,1 % C-tartalmú 50 kg-os vasfürdőben. Az alkalmazott hőmérséklet 1300, 1350, 1400 és 1500 °C volt. A fürdő mozgatását időben különböző mennyiségben befuvott nitrogénnel végezték. A fürdőben különböző ideig tartott próbákön átmérő-méréseket végeztek és megállapították a rúd relatív sugarát, x_b/R -t.

Az $x_b/R = f/t$ összefüggést lineárisnak találták ennek a kísérletnek során is, azaz a beolvadás átlagos sebessége ez időben állandó.

A $\frac{dx_b}{dt}$ értéke gyorsan nő a fürdő hőmérsékletével, a fürdő karbontartalmával és az átbuborékoltatott gáz mennyiségével.

Glinkov és munkatársai acéllemez nyersvasfürdőben való beolvadásának anyagátadási folyamatára dolgoztak ki modellt.

A kísérletek adatai alapján kiértékelte anyagátadási tényezők 0,018 - 0,252 m/h között vannak. Értékük a hőmérséklet növekedésével kissé, a fürdőmozgatás intenzitásának emelésével pedig lényegesen nagyobb mértékben nő.

Glinkov, G. M., Bakszt, V. Ja., Medzsibozsszkij, M. Ja. és Szelszkij, V. I. [7] az acél beolvadási kinetikáját a hulladék olvadáspontjánál nagyobb hőmérsékletű fürdőben tanulmányozták. Ilyen viszonyok uralkodnak például az oxigénes konverter eljárás esetében, amikor az acélhulladékot 1500°C -nál nagyobb hőmérsékletű fürdőbe adagolják.

20 mm átmérőjű, 30 mm hosszú hideg acélhengereket vittek be különböző - 0,7 % és 3,9 % közötti - C-tartalmú, különböző hőmérsékletű fürdőkbe.

Az olvadás első periódusában a próba felületén ráfagyást figyeltek meg, majd a próbára ráfagyott réteg megolvad. A tényleges beolvadási szakaszban az olvadási sebesség gyakorlatilag független a fürdő karbontartalmától. A mért olvadási sebesség alapján megkísérelték az α konvektív hőátadási tényező nagyságának kiértékelését. Feltételezték, hogy a tényleges beolvadás szakaszában a próba teljes szelvényében elérte az olvadási hőmérsékletet.

Kapusztyin, E. A. vizsgálata folyékony nyersvas-acélhulladék eljárásra, a nyersvasbeöntés után lefolyó hulladékolvadás körülményeire vonatkozik [8].

Bungardt, K. és munkatársai [2] molibdén és wolfram vasfürdőben való beolvadását vizsgálták.

A mikroszkópos vizsgálat számára 1590°C hőmérsékletű fürdőbe merítettek molibdén, illetve wolfram rudakat, majd befagyasztották azokat. A határréteg szerkezetét mikroszonda segítségével is tanulmányozták.

Friedrichs, H. A., Jauer, H. és Knacke, O. [9] kristály saját olvadékában végbemenő olvadásának folyamatát vizsgálták. Különböző mértékben túlűtött jég hengereket és gömböket olvasztottak meg különböző hőmérsékletű vízben.

Matematikai megfontolások alapján megállapították az egyszerű geometriájú testek közelítő beolvadási idejét.

Tylhonov, A. N. és Szamarszkij, A. A. [10] a fagyás frontjának mozgási sebességére dolgoztak ki matematikai összefüggéseket. A számi-

tások során abból indultak ki, hogy a féltérben vizsgált folyékony fázist olyan sík határolja, melynek hőmérséklete a vizsgálat során állandó és kisebb, mint az olvadáspont hőmérséklete. A folyékony acélfürdőbe merülő hideg acélpróba esetére fentiek miatt ez a matematikai megfogalmazás csak megközelítő, de a beolvadási folyamat megindulásakor alkalmazható.

Chuang, Y. K. és Szekely, J. [11] a kis C-tartalmú acélhulladék Fe-C fürdőkben olvadására állított fel számítógép programot. A program alkalmas az oxigénes konverterbe adagolt hulladék beolvasztási körülményeinek optimalizálására is.

Asai, S. és Muchi, I. [12] szintén a hulladék oxigénes konverterben való beolvadási viszonyaira dolgozott ki matematikai modellt.

Az acélhulladék különböző C-tartalmú fürdőben való beolvadásának folyamatában a határréteg kialakulása fontos szerepet játszik. Ennek értelmezése kétféle lehet. Az egyik értelmezés szerint [13][14][15] szilárd fázis határán a folyékony fázisban kialakult film koncentráció görbéjének az érintkezési felületből kiinduló érintője által a folyékony fázis koncentrációjának extrapolált profiljából kimetszett szakasza a határréteg vastagsága. A másik értelmezés viszont a két fázis érintkezési felületének mindkét oldalán kialakuló koncentráció görbéhez simuló érintőkkel, illetve az általuk meghatározott határréteg vastagságokkal dolgozik [16][17]. Az előbbit Elliott-, az utóbbit Bodsworth-megfogalmazásnak nevezhetjük.

Minden fémes anyagnak, így az acélnak a beolvadása során is három fajta áramlás játszik fontos szerepet: a hőáramlás, az anyagátadás (diffúzió) és a folyadék, a fürdő áramlása. Az első két kézenfekvő áramlás fajta mellett a fürdő áramlását azért kell számításba venni, mivel akár nyugodt fürdőben, akár valamilyen módon áramoltatott, mozgó fürdőben megy is végbe a beolvadás, az áramlás valamilyen formája mindig létrejön [18][19][20]. A folyadék-dinamika, a hőátadás és az anyagátadás folyamataira jellemző dimenzió nélküli kifejezéseket alakítottak ki. Ezeket az 1. Függelék foglalja össze.

3. SAJÁT KISÉRLETEK

3.1 Modellkísérletek

Az oldódás jelenségének megfigyelése céljából először modellkísérleteket végeztünk. Tájékozódó vizsgálatainkat 80 % parafin + 20 % montánviasz keverékéből, illetve kék zsírkkrétával színezett parafinból öntött, 7,7 - 13,5 mm ϕ , 40 - 50 mm hosszú próbák benzinbe merítésével kezdtük el. A kísérletek elsősorban a határfelület-feszültségek hatására létrejövő jelenségek [21] megfigyelésére bizonyultak célszerűnek. Mivel pedig ezt a jelenség-csoportot további vizsgálódásaink során nem kívántuk részletesebben elemezni, a továbbiakban a fajsúly-különbség hatására létrejövő áramlás nyomonkövetésére alkalmas kísérletet végeztünk el.

Kristályos KMnO_4 -ból 1000 kg nyomással 5 mm ϕ hengereket sajtoltunk. A henger alap- és fedőlapját lakkal vontuk be, majd 1000 cm³, 20°C hőmérsékletű desztillált vízbe süllyesztettük. Az oldódás során színes felvételeket készítettünk. A felvétel-sorozatot a vízbe merülés időtartamának megjelölésével az I. táblázat mutatja be. A vízben oldódó KMnO_4 réteg fajsúlya nagyobb, mint a vize. Ez a fajsúly-különbség a felvétel-sorozaton jól látható módon az oldódó henger képzeletbeli tengelyének irányában lefelé menő áramlást indít el, majd az áramlás a desztillált vizet tartalmazó főzőpohár geometriájának megfelelően visszafordul.

3.2 Olvasztási kísérletek

3.2.1 Tammann-kemencében és indukciós kemencében végzett beolvasztások

Az acél beolvadásának körülményeit eddig túlnyomóan olyan viszonyokra vizsgálták, amikor nagy C-tartalmú Fe-C fürdőben folyik le a kis C-tartalmú acél hulladék beolvadása. Ilyen beolvadási folyamat zajlik le az SM-kemencében a nyersvasbeöntést követően, vagy az oxigénes konverterben a fúvatás első szakaszában.

Sajított, 5 mm ϕ , KMnO_4 - henger 20°C vízben oldódásának lefolyása

I. táblázat

Felvétel sorszáma: 1	2	3	4	5	6
Bemerítési idő: 1 s	3 s	5 s	7 s	9 s	11 s



I. táblázat folytatása

Felvétel sorszáma: 7	8	9	10	11
Bemerítési idő: 13 s	15 s	20 s	25 s	30 s



Az acélgyártás gyakorlatában vannak azonban olyan viszonyok is, mikor a különböző C-tartalmú acélhulladék olvad be, ugyancsak különböző, de a nyersvasénál lényegesen kisebb C-tartalmú fürdőben. Ilyen folyamat az ivkemence-gyakorlatban a kétkosaras technológia keretében a már leg-alább részben megolvadt fürdőbe bevitt második kosár tartalmának beolvadása, az oxigénes konverterek fuvatási periódusának vége felé adagolt hulladék beolvadása, az ivkemence acélfürdőjébe folyamatosan bevitt fém-sített érc, vagy apró hulladék beolvadása, de a hagyományos ivkemence technológia beolvasztási folyamata során az elektródák alatt keletkezett acél-fürdőbe bebukó acélhulladék beolvadása is.

Mivel az acélhulladék acélfürdőben való beolvadása általános gyakorlati jelenség, körülményeinek vizsgálata indokoltnak látszik.

Vizsgálatainkhoz négy különböző, 0,10 - 1,60 % közötti C-tartalmú ötvözetlen acéladagot használtunk fel abból a célból, hogy ezen C-inter-vallumban mind a négy C-tartalmú acélfürdőben megfigyelhessük lehetőleg mind a négy különböző C-tartalmú acél beolvadási folyamatát. Az indukciós kemencében azonos ötvözetlen alapanyagból gyártott és 50 kg-os kockákba leöntött, szilíciummal, 2 kg/t alumíniummal dezoxidált adagok összetételét a II. táblázat tartalmazza.

Az olvasztási vizsgálatokhoz használt ötvözetlen adagok összetétele

II. táblázat

Az adag száma	jele	ö s s z e t é t é l e , %				
		C	Si	Mn	S	P
57	1	0,10	0,24	0,24	0,010	0,014
58	2	0,48	0,26	0,43	0,018	0,014
59	3	1,05	0,26	0,45	0,015	0,014
60	4	1,60	0,29	0,44	0,006	0,020

Az adagok Si, Mn, S és P-tartalma a II. táblázat szerint lényegesen nem különbözik egymástól. A leöntött tuskókat kovácsolással alakítottuk. 22 x 8 mm $\varnothing$, illetve 8 mm $\varnothing$ -re, majd lágyítás után a körszelvényü

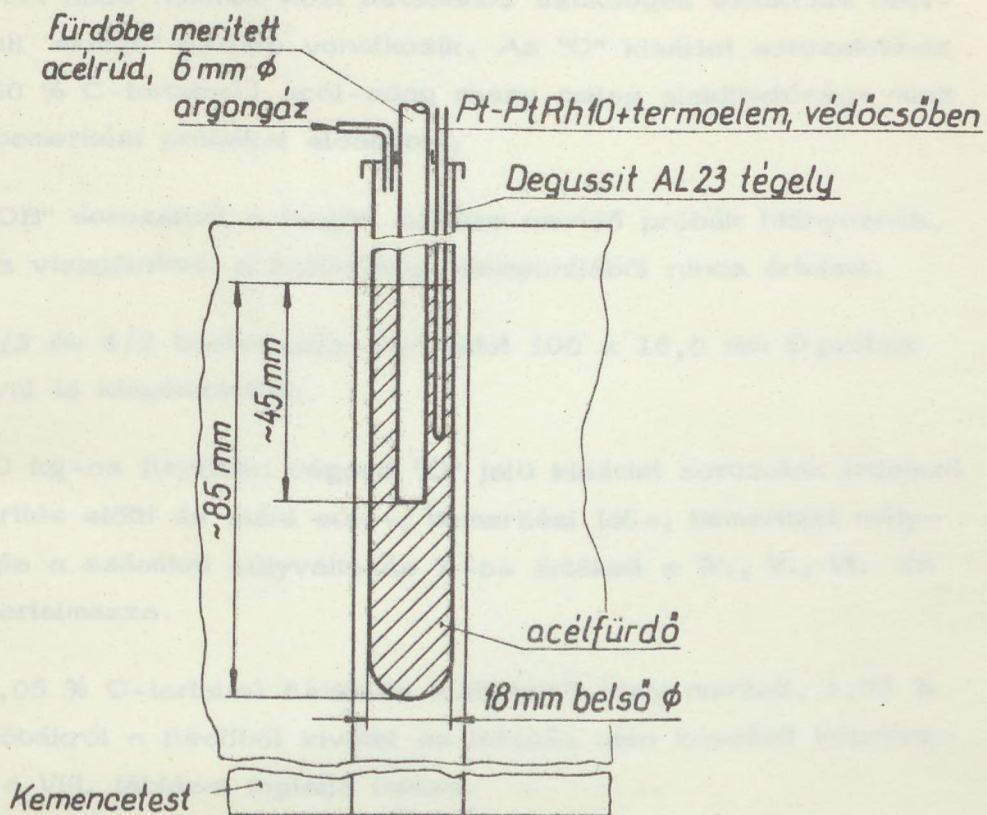
próbákat 6,3 mm ϕ -re esztergáltuk, a 100 x 20 x 7 mm és 6,00 + 0,02 mm ϕ méretű próbákat pedig gyalulással, illetve köszörüléssel alakítottuk ki.

Az olvadási folyamatok megfigyelésére kétfajta kísérlet sorozatot végeztünk. Az egyik sorozatban 50 kg-os középfrekvenciás indukciós kemencében megfelelő zárófedél alá argont áramoltatva olvasztottuk be az adagokat, majd $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ -on tartva a fürdőt külön erre a célra szerkesztett, a szabatos bemerítést és kiemelést biztosító berendezéssel merítettük be függőlegesen 3 mm ϕ acélrúdra menettel rögzített 100 x 20 x 7 mm méretű próbákat, majd különböző bemerítési idők után kiemeltük azokat. Először argon-atmoszférában, majd levegőn hűtöttük, végül a súlyváltozást mértük.

A másik kísérlet sorozatban 7,5 kW-os, folyamatos hőmérséklet szabályozóval ellátott Tammann-kemencében 18 mm belső átmérőjű, 190 mm magas, Degussit AL 23 tégelyben olvasztottuk meg az egyes acélfajtákat és a megolvasztás és $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékleten hőntartás után a függőleges és közel centrikus, egyenletes mozgató berendezéssel besüllyesztettük a 6 mm ϕ , 200 mm hosszú rudakat olymódon, hogy a bemerítési mélység 45 mm legyen az eredetileg 80 mm magasságú fürdőben.

A kísérlet elvi vázlatát az 1. ábra mutatja be. Az acél beolvasztás és a rúd fürdőbe merítése után még 10 s ideig tartottuk a tégelyt a kemencében, majd a tégelyt a fürdőbe merített acélruddal együtt - annak tégelyhez viszonyított helyzetének rögzítésével - kiemeltük a kemencéből és szabad levegőn hűtöttük le a rendszert. Az egész kísérlet ideje alatt 15 l/h argonnal öblítettük a lezárt tégelyt. A 10 s időtartamot több előkísérlettel állapítottuk meg: ez az az időtartam, ami alatt a próbák olvadása megkezdődik ugyan, de még nem fejeződik be teljesen. Erre azért van szükségünk, hogy az olvadás során kialakuló határréteget a C-profil valamilyen módon meghatározása segítségével hozzávetőlegesen meg tudjuk állapítani. Az 50 kg-os fürdőbe merítés és különböző ideig fürdőben tartás után ugyanis a kiemelt próba felszínén nagyon nehéz megőrizni biztonságosan a kialakult határréteget.

A Tammann-kemencében végrehajtott kísérletek gyengéje az, hogy a kemencéből kiemelés után a fürdő nem azonnal hűl le és így bizonyos C-diffúzió elképzelhető még a lehűlés időszakában. A lehűlés sebességét ezért külön megvizsgáltuk. A fürdőbe merített Pt-PtRh10 termoelem se-



1. ábra

A Tammann-kemencében végzett részleges beolvasztási
és befagyasztási kísérlet elvi vázlata

gítségével a vázolt viszonyokra felvett lehülési görbe a 2. ábrán látható. A lehülési sebesség $190-250^{\circ}\text{C}/\text{min}$, tehát a lehülés során a határréteg lényeges módosulása nem következhet be.

Az eddig vázolt kísérlet sorozatok áttekintését a III. táblázat adja. A III. táblázatban a fürdőbe merített próbák száma előtt szereplő "Ny" jelzés arra utal, hogy a fürdő állapota "nyugodt" volt, míg az "M" jelzés a fürdőhőmérséklet adott határok közt tartásához szükséges indukciós hevítéssel kialakult "mozgó" fürdőre vonatkozik. Az "O" kísérlet sorozatokhoz a 4 jelű (1,60 % C-tartalmú) acél-adag rossz meleg alakíthatósága miatt nem tudunk bemerítési próbákat előállítani.

Az "OB" sorozatból a "saját" fürdőbe merülő próbák hiányoznak, mivel ennek a vizsgálatnak a határréteg szempontjából nincs értelme.

Az 1/3 és 4/2 beolvasztás-sorozatot $100 \times 16,0 \text{ mm } \phi$ próbák beolvasztásával is kiegészítettük.

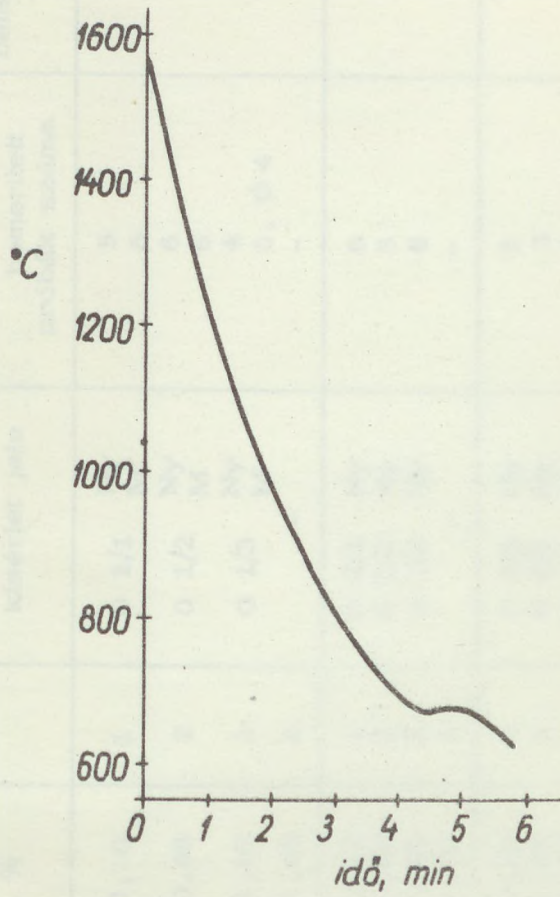
Az 50 kg-os fürdőben végzett "O" jelű kísérlet sorozatok jellemző méret-, bemerítés előtti és utáni súly-, bemerítési idő-, bemerítési mélység-adatait és a számított súlyváltozás %-os értékeit a IV., V., VI., és VII. táblázat tartalmazza.

Az 1,05 % C-tartalmú fürdőkbe különböző ideig merített, 1,05 % C-tartalmú próbákról a fürdőből kivétel és lehülés után készített képsorozatot például a VIII. táblázat foglalja össze.

3.2.2 A ráfagyási periódus vizsgálata

A tényleges beolvadást megelőző ráfagyás jelenségének közelebbi vizsgálatára az 1/3 és a 4/2 $\square$ sorozat vonatkozó próbáit használtuk fel. A próbák keresztmetszetét a szekunder marószerral maratott állapotban a 3. és a 4. ábra mutatja.

A keresztmetszetnek a próba-hajdani fürdő átmeneti övezetében a bemerülési szinttől kiindulva 20 mm-enként metallográfiai szövetvizsgálatot végeztünk. Ezek közül például a J50 (jobboldali átmeneti övezet, fürdőszinttől 50 mm távolság) pozíciókban látható szövetképeket az 5. és a 6. ábrákon állítottuk össze. Mivel ezeken a szövetképeken a hajdani



2. ábra

A Tammann-kemencéből kiemelt próba
lehülési görbéje

Az olvadáskinetikai kísérlet - sorozatok áttekintése

III. táblázat

A fűrdő C-tartalma, jele %	A fűrdőbe merülő próba		Az olvadáskinetikai vizsgálat jellege, jele, próbák száma		Tammann-kemencében, olvadt acélban végzett részleges olvasztás és befagyasztás jele
	C-tartalma, %	jele	kísérlet jele	bemerített próbák száma	
0,10	1	1	0 1/1 Ny M	5	-
		2	0 1/2 Ny M	6	OB 1/2
		3	0 1/3 Ny M	6	OB 1/3
		4	-	4 6, ϕ 4 -	OB 1/4
0,48	2	1	0 2/1 Ny	6	OB 2/1
		2	0 2/2 Ny	5	-
		3	0 2/3 Ny	6	-
		4	-	-	OB 2/4
1,05	3	1	0 3/1 Ny	5	OB 3/1
		2	0 3/2 Ny	5	OB 3/2
		3	0 3/3 Ny	5	-
		4	-	-	-
1,60	4	1	0 4/1 Ny	5	OB 4/1
		2	0 4/2 Ny	5, ϕ 10	OB 4/2
		3	0 4/3 Ny	5	-
		4	-	-	-

1. sz. adagból /0,10 % C/ készült, 100 x 20 x 7 mm méretű rudak beolvasztási kísérlete 50 kg-os, 1555 ± 5°C hőmérsékletű fürdőkben

IV. táblázat

Sor-szám	Hosszúság mm	Szélesség mm	Vastagság mm	Súly g	Súly visszamérve g	Bemerítési idő, s	Tényleges bemerítési mélység, mm	Bemerült próba- hányad eredeti súlya, g	Fürdőből kiálló próbaanyag súlya, g	Bemerült próba- hányad súlya bemerítés után, g	Súlyváltozás a bemerült próba- hányadra, %	A fürdő száma és C-tartalma	Megjegyzés
1	100,10	19,40	6,55	99,65	140,20	2	65,0	64,80	34,85	105,35	+ 62,6	1 /0,10 % C/	kemence bekapcsolva
2	100,30	19,55	6,55	99,22	164,86	4	87,0	86,00	13,22	151,58	+ 73,5	"	"
3	100,50	19,45	6,55	99,54	138,74	8	83,0	82,30	17,24	121,50	+ 47,5	"	"
4	100,10	19,55	6,55	99,15	133,20	10	80,0	79,00	20,15	113,05	+ 43,0	"	a próba előmelegedett
5	100,25	19,55	6,55	99,17	25,00	12	86,0	85,20	13,97	12,03	- 85,9	"	bemerítés előtt
6	100,00	19,55	6,55	98,92	148,52	14	84,0	83,00	15,92	132,60	+ 60,0	"	kemence bekapcsolva
7	100,10	19,55	6,55	99,22	222,00	5	70,0	69,20	30,02	191,98	+ 177,0	1 /0,10 % C/	
8	100,00	19,45	6,55	99,35	271,14	10	69,0	68,30	31,05	240,09	+ 251,0	"	
9	100,10	19,55	6,55	98,88	322,24	20	67,0	66,00	32,88	289,36	+ 339,0	"	
10	100,50	19,55	6,55	99,70	401,56	40	74,0	73,60	26,10	375,46	+ 406,0	"	
11	99,90	19,55	6,55	98,84	139,26	80	74,0	73,00	25,84	113,42	+ 54,8	"	
12	100,15	19,55	6,55	99,55	101,14	5	80,6	80,00	19,55	81,59	+ 1,0	4 /1,60 % C/	
13	100,00	19,55	6,60	99,15	95,66	7	77,6	74,30	24,85	70,81	- 5,0	"	
14	100,15	19,55	6,55	99,38	90,48	9	80,5	79,90	19,48	71,00	- 11,0	"	
15	100,20	19,55	6,55	99,15	25,56	11	82,2	81,50	17,65	7,91	- 90,3	"	
16	100,25	20,00	7,10	109,58	94,08	10	82,8	90,00	19,58	74,50	- 17,2	"	
17	100,30	19,90	7,10	108,86	163,20	5	80,6	87,50	21,36	141,84	+ 62,0	2 /0,48 % C/	
18	99,75	20,00	7,00	109,22	137,08	10	76,1	83,00	26,22	110,86	+ 33,0	"	
19	100,00	20,00	7,10	109,54	112,30	12	75,5	82,30	27,24	91,06	+ 11,1	"	
20	100,20	20,00	7,10	109,40	93,42	16	77,3	84,80	24,60	68,82	- 18,8	"	
21	100,70	20,00	7,00	110,34	27,10	20	83,0	91,50	18,84	8,26	- 91,0	"	
22	99,65	20,00	7,10	108,86	78,72	18	78,0	84,80	24,06	54,66	- 35,6	"	
23	100,00	20,00	7,10	109,10	118,56	5	70,0	76,20	32,90	85,66	+ 11,2	3 /1,05 % C/	
24	100,20	20,00	7,10	109,30	96,44	10	72,2	78,80	30,50	65,94	- 16,7	"	
25	100,70	20,00	7,10	110,20	71,20	12	72,6	80,10	30,10	41,10	- 48,8	"	
26	100,10	20,00	7,10	109,42	77,50	14	78,2	85,20	24,22	53,28	- 37,3	"	
27	100,30	20,00	7,10	109,94	36,12	16	73,1	80,20	29,74	6,38	- 92,0	"	

2. sz. adagból /C = 0,48 %/ készült, 100 x 20 x 7 mm méretű rudak beolvasztási kísérlete 50 kg-os, 1555 ± 50°C hőmérsékletű fürdőben

V. táblázat

Sor- szám	Hosszúság mm	Szélesség mm	Vastagság mm	Súly g	Súly visszamérve g	Bemerítési idő, s	Tényleges bemerítési mélység, mm	Bemerült próba- hányad eredeti súlya, g	Fürdőből kiálló próbahányad súlya, g	Bemerült próba- hányad súlya bemerítés után, g	Súlyváltozás a bemerült próba- hányadra, %	A fürdő száma és C-tartalma	M e g j e g y z é s
1	100,8	19,0	6,5	95,96	180,30	3	80,5	76,70	19,26	161,04	+ 109,5	1 /0,10 % C/	kemence bekapcsolva
2	100,0	19,0	6,5	95,65	202,30	6	94,7	90,00	5,65	196,65	+ 119,0	"	"
3	100,65	19,0	6,5	95,92	161,34	10	77,5	73,80	22,12	139,22	+ 88,5	"	"
4	100,0	19,0	6,55	95,64	42,88	14	76,5	73,60	22,36	20,52	- 72,0	"	"
5	100,3	19,0	6,5	95,96	105,76	12	80,5	77,00	18,64	87,12	+ 13,5	"	"
6	100,45	19,0	6,5	96,32	24,44	16	79,0	75,30	21,02	3,42	- 96,4	"	"
7	100,2	19,0	6,55	95,95	212,18	5	74,0	70,70	25,25	186,93	+ 164,5	1 /0,10 % C/	próba kiemeléskor leszakadt
8	100,5	19,0	6,55	96,00	347,30	20	78,0	74,80	21,20	326,10	+ 335,0	"	
9	100,0	19,0	6,55	95,54	18,72	60	80,0	76,20	19,34	- 0,62	- 100,8	"	
10	100,2	20,0	7,6	116,48	352,60	30	81,8	95,20	21,28	331,32	+ 246,0	"	"
11	100,1	20,0	7,55	115,90	472,36	50	73,0	84,70	31,20	441,16	+ 421,0	"	
12	100,3	20,0	7,6	116,48	150,60	70	76,0	88,50	27,98	122,62	+ 38,0	"	
13	100,3	20,0	7,55	115,94	148,72	5	80,0	92,60	23,34	125,38	+ 36,0	4 /1,60 % C/	"
14	100,55	20,0	7,1	108,24	131,30	7	78,0	84,30	23,94	107,36	+ 27,2	"	
15	100,25	20,0	7,0	108,24	79,60	9	79,0	84,00	24,24	55,36	- 34,4	"	
16	100,35	20,0	7,0	108,40	79,88	11	83,0	90,00	18,40	61,48	- 31,8	"	
17	100,1	20,0	7,0	108,26	22,56	13	84,0	91,20	17,06	5,50	- 93,9	"	
18	100,25	20,0	7,0	108,40	177,46	5	75,9	82,20	26,20	151,26	+ 84,3	2 /0,48 % C/	"
19	100,5	20,0	7,0	108,42	111,40	10	80,0	86,60	21,82	89,58	+ 3,3	"	
20	100,35	20,0	7,55	116,22	137,82	12	75,3	87,60	28,62	109,20	+ 25,0	"	
21	100,0	20,0	7,55	116,10	85,50	15	75,8	87,80	28,30	57,20	- 50,7	"	
22	100,2	20,0	7,55	116,20	27,70	20	80,0	93,00	23,20	4,50	- 95,2	"	
23	99,8	20,0	7,55	115,64	156,24	5	70,0	81,00	34,64	121,60	+ 52,0	3 /1,05 % C/	"
24	100,25	20,0	7,55	116,50	113,84	8	74,6	87,00	29,50	84,34	- 2,5	"	
25	100,25	20,0	7,55	116,60	98,00	10	75,5	88,00	28,60	69,40	- 21,2	"	
26	100,2	20,0	7,55	116,50	70,86	12	77,2	90,00	26,50	44,36	- 50,7	"	
27	100,35	20,0	7,55	116,34	35,00	14	79,0	92,00	24,34	10,66	- 88,4	"	

3. sz. adagból /C = 1,05 %/ készült, 100 x 20 x 7 mm méretű rudak beolvasztási kísérlete 50 kg-os, 1555 ± 5°C hőmérsékletű fürdőkben

VI. táblázat

Sor- szám	Hosszúság mm	Szélesség mm	Vastagság mm	Súly g	Súly visszamérve g	Bemerítési idő, s	Tényleges bemerítési mélység, mm	Bemerült próba- hányad eredeti súlya, g	Fürdéből kiálló próbahányad súlya, g	Bemerült próba- hányad súlya bemerítés után, g	Súlyváltozás a bemerült próba- hányadra, %	A fürdő száma és C-tartalma	Megjegyzés
1	100,25	19,00	6,5	95,54	128,68	3	75,0	71,5	24,04	104,64	+ 46,5	1 /0,1 % C/	kemence bekapcsolva
2	100,35	19,00	6,5	95,32	129,80	5	81,2	77,4	17,92	111,88	+ 44,0	"	
3	100,55	19,00	6,5	95,70	132,10	7	79,7	76,0	19,70	112,40	+ 48,5	"	
4	100,20	19,00	6,55	94,82	127,42	9	81,2	76,7	18,12	109,30	+ 42,0	"	
5	100,15	19,00	6,55	95,62	76,68	12	83,5	79,3	16,32	60,36	- 24,0	"	
6	100,35	19,00	6,55	95,52	25,82	15	84,0	80,0	15,52	10,30	- 87,1	"	
7	100,30	19,00	6,5	95,7	210,80	5	72,1	68,7	27,00	183,80	+ 166,0	1 /0,1 % C/	
8	100,30	19,00	6,5	95,52	297,58	20	76,6	72,7	22,82	274,76	+ 277,0	"	
9	100,10	19,00	6,55	94,92	24,64	40	75,0	71,0	23,92	0,72	- 98,9	"	
10	100,25	19,85	7,05	107,85	354,68	30	73,0	78,3	29,55	325,13	+ 316,0	"	
11	100,50	19,85	7,05	108,18	154,10	5	84,8	91,7	16,48	137,62	+ 50,0	4 /1,60 % C/	
12	100,55	19,85	7,05	108,75	18,70	10	85,2	92,8	15,95	2,75	- 97,0	"	
13	100,50	19,80	7,05	108,42	125,42	6	85,3	92,3	16,12	109,30	+ 18,0	"	
14	100,60	19,85	7,05	108,37	115,00	7	82,1	88,8	19,57	95,43	+ 5,5	"	
15	101,10	19,85	7,05	108,32	66,32	8	81,6	88,3	20,02	46,30	- 47,5	"	
16	100,00	19,80	7,0	107,78	185,60	5	82,0	87,9	19,88	165,72	+ 87,5	2 /0,48 % C/	
17	100,50	19,85	7,1	107,80	142,40	10	80,0	86,0	21,80	120,60	+ 40,1	"	
18	100,50	19,80	7,1	107,92	29,38	15	81,0	87,0	20,92	8,46	- 90,3	"	
19	100,55	19,80	7,1	108,15	110,30	12	81,7	88,2	19,95	90,35	+ 2,5	"	
20	101,60	19,85	7,05	108,65	117,36	13	81,1	88,0	20,65	96,71	+ 9,5	"	
21	100,50	19,85	7,05	107,64	75,00	14	82,2	87,8	19,84	55,16	- 37,2	"	
22	100,50	19,85	7,05	107,80	140,00	5	70,0	75,2	32,60	107,40	+ 43,0	3 /1,05 % C/	
23	100,30	19,90	7,05	106,94	76,40	10	73,6	78,8	28,10	48,30	- 38,8	"	
24	100,25	19,90	7,05	107,46	28,24	12	76,2	82,3	25,16	3,08	- 96,3	"	
25	100,30	19,85	7,05	106,82	109,36	8	73,6	78,3	28,52	80,84	+ 3,0	"	
26	100,70	19,90	7,05	108,22	74,92	11	73,6	79,3	28,92	46,00	- 42,1	"	

2. sz. adagból /0,48 % C/ és 3. sz. adagból /1,05 % C/ készült 100,00 x 16,00 mm ϕ rudak beolvasztási kísérlete
4. sz. /1,60 % C/, illetve 1. sz. /0,10 % C/, 50 kg-os, 1555 $\pm$ 5°C hőmérsékletű fürdőkben

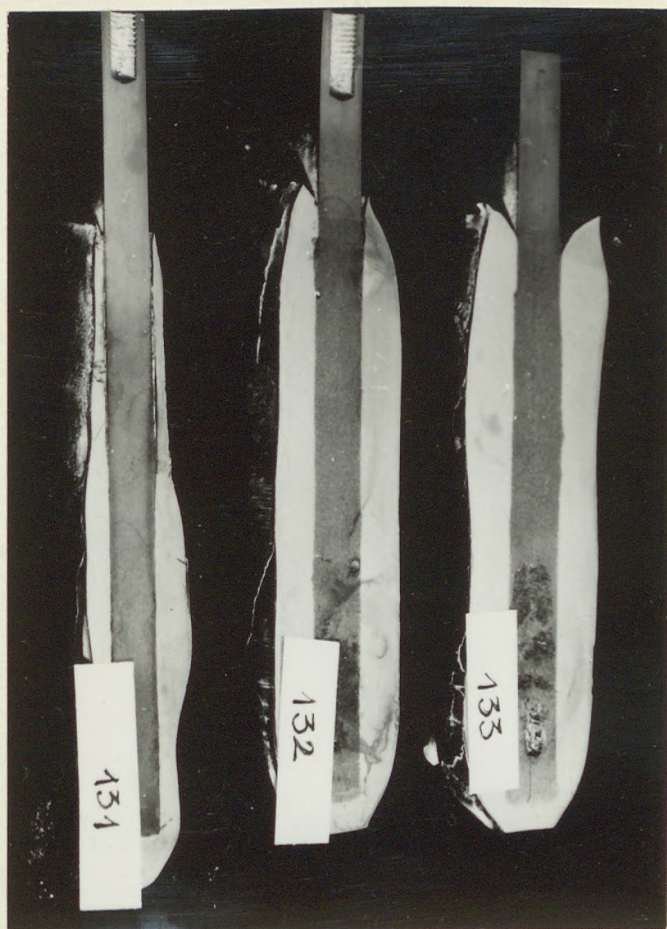
VII. táblázat

Sor- szám	Súly g	Súly visszamérve g	Bemerítési idő, s	Tényleges bemerítési mélység, mm	Bemerült próba- hányad eredeti súlya, g	Fürdőből kiálló próbahányad súlya, g	Bemerült próba- hányad súlya bemerítés után, g	Súlyváltozás a bemerült próbahányadra, %	A fürdő száma és C-tartalma	Megjegyzés
7	152,31	201,00	3	83,0	126,20	26,11	174,89	+ 38,3	1 /0,10 % C/	kemence bekapcsolva
8	158,21	204,70	5	83,0	131,20	27,01	177,69	+ 34,8	"	"
9	155,51	195,14	10	84,0	130,30	25,21	169,93	+ 30,5	"	"
10	154,85	128,22	15	86,0	133,00	21,85	106,37	- 20,1	"	"
1	156,36	213,50	5	84,5	132,00	24,36	189,14	+ 43,0	4 /1,60 % C/	
2	155,81	198,34	7	90,9	141,60	14,21	184,13	+ 30,0	"	
3	155,76	193,54	9	84,7	131,80	23,96	169,58	+ 28,7	"	
4	155,86	115,12	15	84,0	130,80	25,06	90,06	- 30,5	"	
5	155,25	25,42	20	93,6	145,20	10,05	15,37	- 89,4	"	
6	155,66	106,90	17	91,0	141,30	14,36	92,54	- 34,5	"	
7	154,46	15,90	20	95,0	146,50	7,96	7,94	- 94,6	"	
8	155,75	118,48	18	83,4	129,7	26,05	92,43	- 28,8	"	
9	155,22	31,32	19	87,2	135,20	20,02	11,30	- 91,6	"	
10	156,10	75,32	19	86,0	134,20	21,90	53,42	- 60,2	"	

1,05 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe különböző ideig merített 1,05 % C-tartalmú próbák / 0 3/3 Ny kísérlet - sorozat /

Sor- szám	Beméríté- si idő, s
22	5
25	8
23	10
26	11
24	12



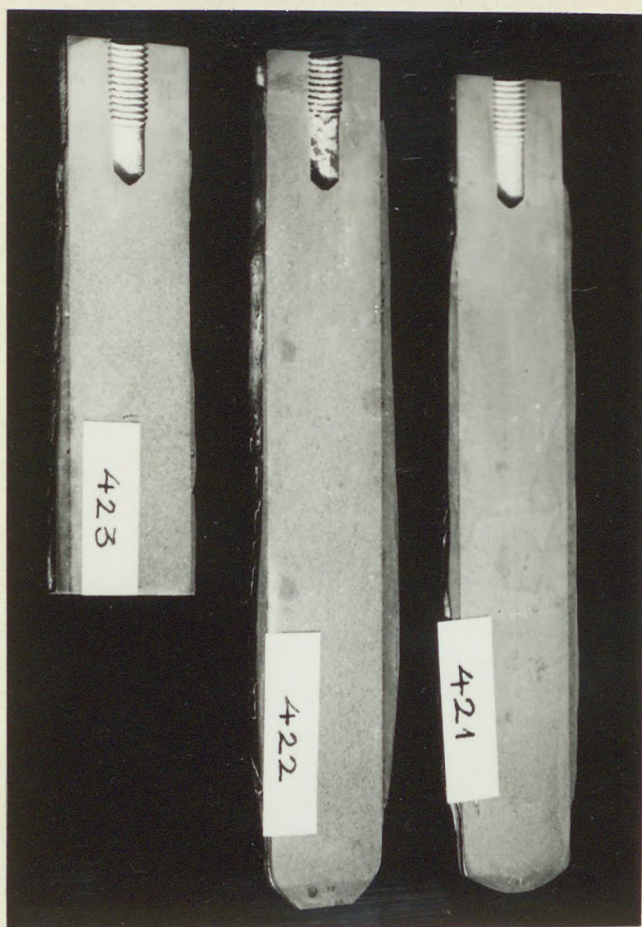


3. ábra

Az 1/3 (0,10 % C-tartalmú fürdőbe merített, 1,05 % C-tartalmú rudakkal végzett) kísérlet sorozat ráfagyási periódusból származó próbáinak metszetei.

N = 1

Maratás: Nital

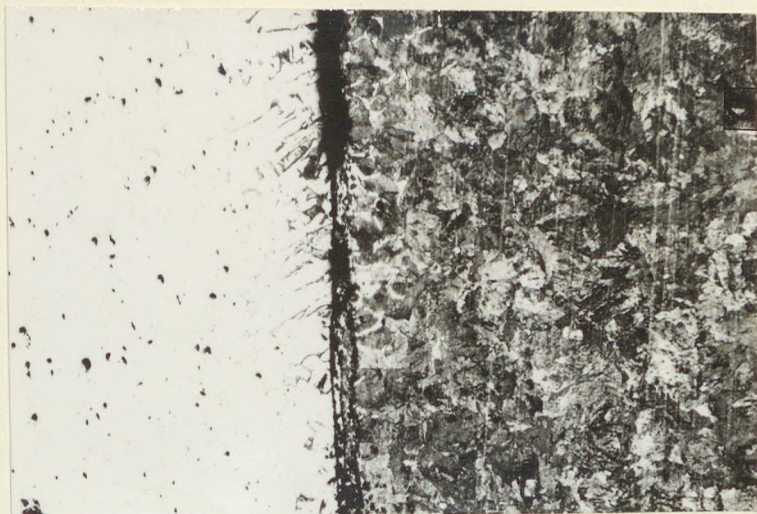


4. ábra

A 4/2 (1,60 % C-tartalmú fürdőbe merített, 0,48 % C-tartalmú rudakkal végzett) kísérlet sorozat ráfagyási periódusból származó próbáinak metszetei.

N = 1

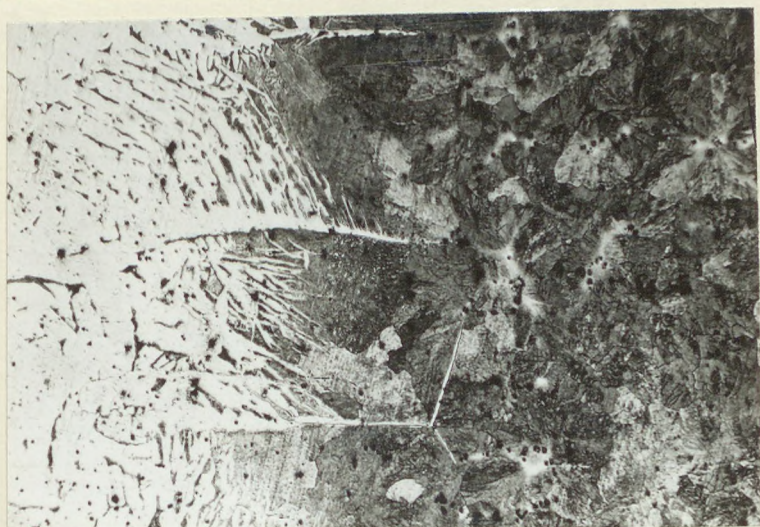
Maratás: Nital



Próbaszám Bemerítési
idő,
s

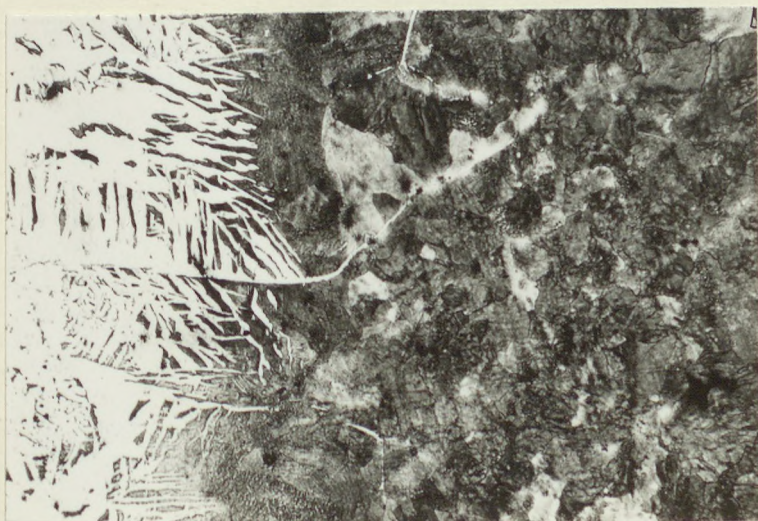
131

5



132

20



133

30

5. ábra

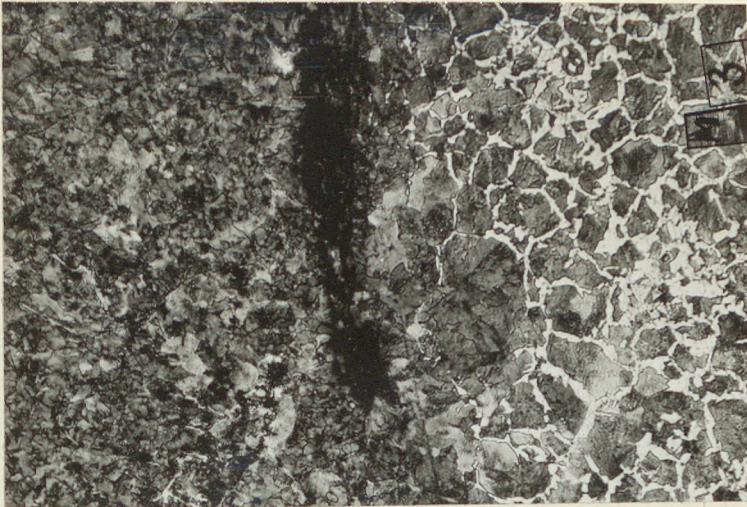
0,10 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe különböző ideig bemerített 1,05 % C-tartalmú próbák fürdőszinttől 50 mm-re levő helyzetében kialakult átmeneti övezetének szekunder szövete.

Ráfagyási periódus.

N = 100

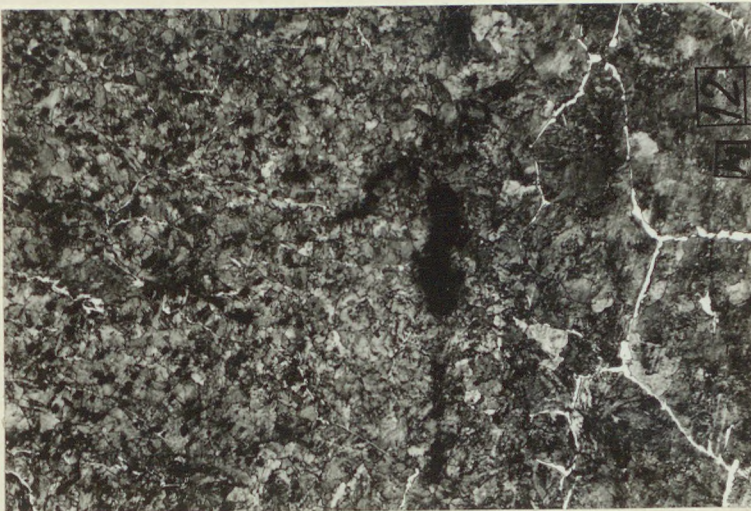
Maratás: Nital

Próbaszám Bemerítési
 idő,
 s



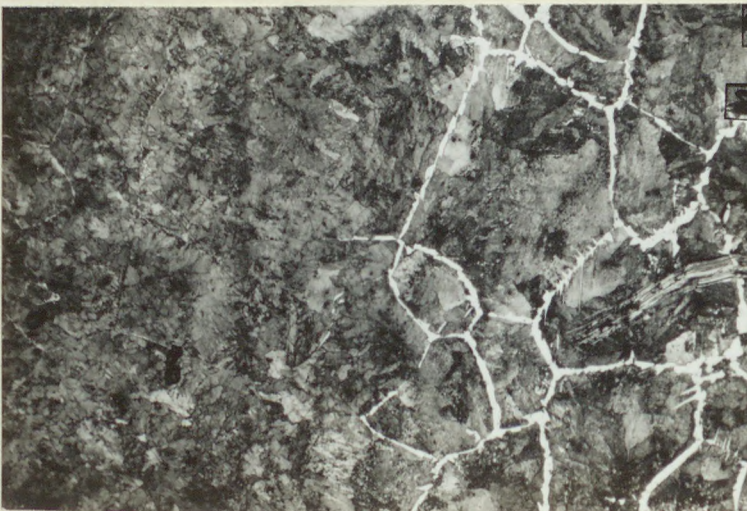
421

5



422

7



423

9

6. ábra

1,60 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ \text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe különböző
ideig bemerített 0,48 % C-tartalmú, 16 mm ϕ próbák fürdőszinttől
50 mm-re levő helyzetében kialakult átmeneti övezet szekunder szövele.

Ráfagyási periódus.

N = 100

Maratás: Nital

próba felszín helyzete nem minden esetben rögzíthető, primer marószerszeggel is kezeltük a próbákat. Ez a maratás igen jól láthatóvá teszi a hajdani határfelszínt (7. ábra).

A vizsgálatok során az egyes próbák jelének rögzítéséhez azt a rendet választottuk, hogy az első számjegy a fürdő, a második a fürdőbe bemelegített próba összetételére jellemző, míg a harmadik számjegy a legkisebb bemelegítési időtől kezdődően a sorszámot jelöli a próbasorozatban. Így például a 421 jelű próba a 4-es számú (1,60 % C-tartalmú) fürdőbe bemelegített 2-es számú (0,48 % C-tartalmú) próbasorozat első - a fürdőbe legkisebb ideig bemelegített - tagját jelenti.

A 13 sorozat (0,10 % C-tartalmú fürdőbe bemelegített 1,05 % C-tartalmú próbák) ráfagyási periódusból származó próbáinak alsó része a tengelymenti lunker jelenség miatt további vizsgálatot igényelt. A primer maratás eredményét a 8. ábra szemlélteti.

3.2.3 A folyékony fürdőben olvadás alatt befagyasztott próbák vizsgálata a határrétegre

A Tammann-kemencében végzett kísérletek "OB" sorozatainak megmerevedett próbáit a 9. ábrán rögzített vázlat alapján készítettük elő a további megfigyelésekhez.

A határréteg vizsgálatára a következő módszerek alkalmazását vettük fontolóra:

- a/ Metallográfiai megfigyelés,
- b/ Tömegspektrométerrel karbonprofil felvétel,
- c/ Karbonprofil vizsgálata mikroszondával,
- d/ Karbonprofil vizsgálata oxigénáramban, mikroszinkron-kisülés segítségével

A metallográfiai vizsgálatok során a szekunder szövet előhívását követően 10-szeres és 100-szoros nagyításban készítettünk képeket a próba középső részéről és az átmeneti zónáról.

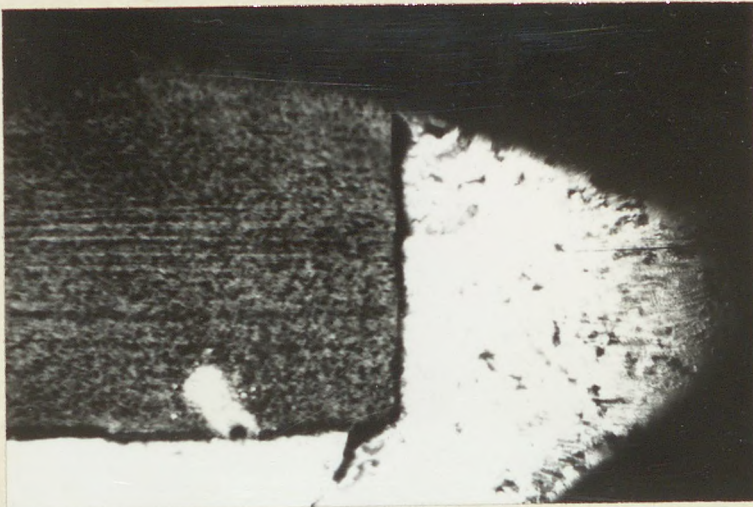


7. ábra

0,10 % C-tartalmú fürdőbe merített 1,05 % C-tartalmú
próba átmeneti övezetének primer szövete.

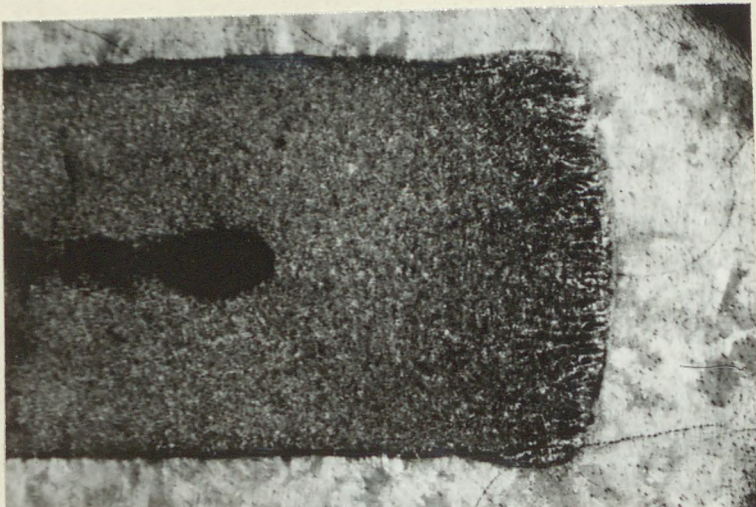
N = 100

Maratás: Oberhoffer



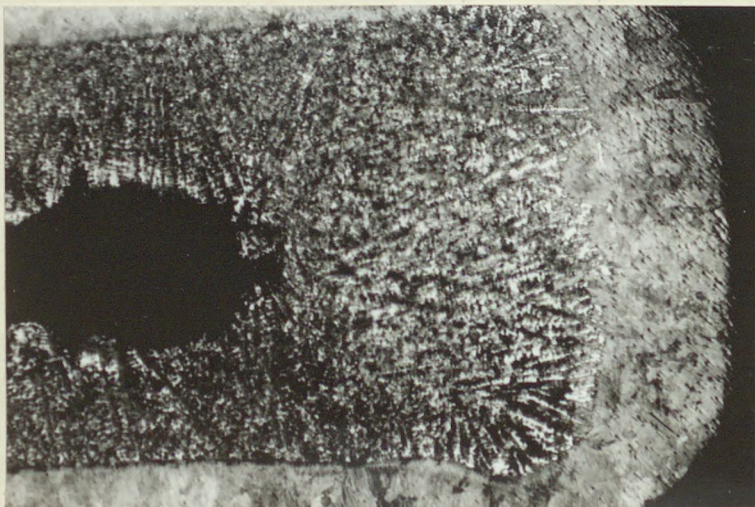
131

5



132

20



133

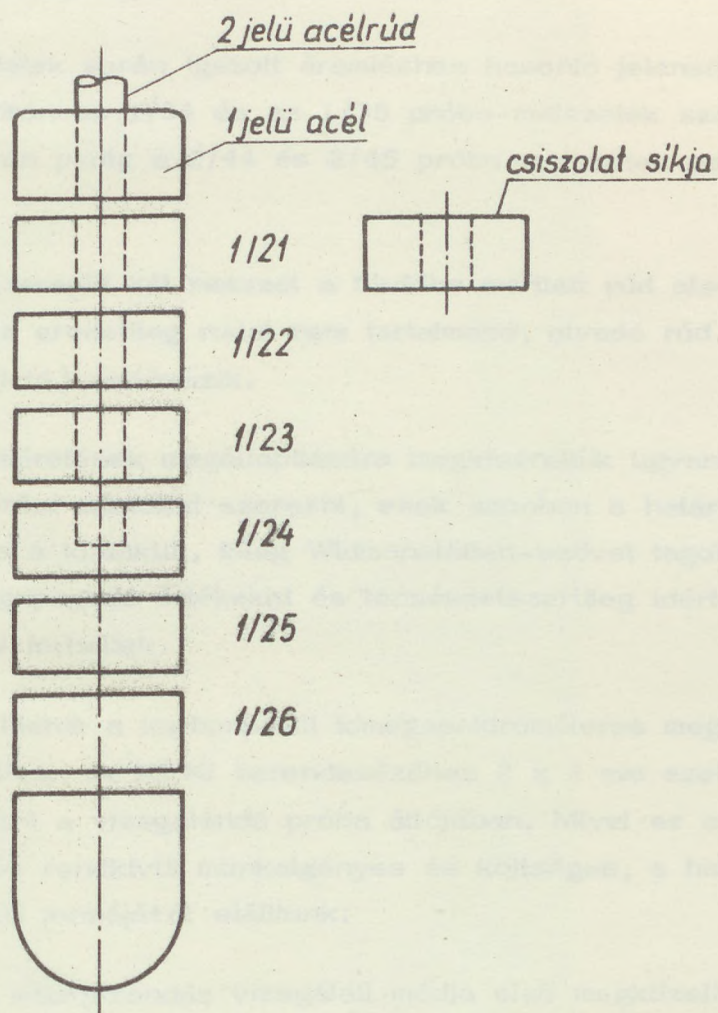
30

8. ábra

0,10 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített
1,05 % C-tartalmú próbák primér szövetének alakulása a ráfagyási
periódusban.

N = 7

Maratás: Oberhoffer



9. ábra

A Tammann-kemencében végzett kísérletsorozat megszilárdult próbáinak előkészítése további vizsgálatokhoz. A 0,10 % C-tartalmú, 1-jelű olvadékba merített 0,48 % C-tartalmú, 2-jelű rúd esete.

A 10. ábra például az 1,60 % C-tartalmú fürdőbe merített 0,10 % C-tartalmú rúd lehűlés során kialakult szövetét mutatja 10-szeres, a 11. ábra pedig 100-szoros nagyításban, a 4/11, 4/12, 4/13 és 4/14 pozícióknak megfelelő metszetben.

A modellkísérletek során igazolt áramláshoz hasonló jelenség tanulmányozására a 12. ábrán az 1/34 és az 1/35 próba-metszetek szövet-szerkezete, a 13. ábrán pedig a 2/44 és 2/45 próba-metszetek szövet-szerkezete látható.

Az ábrákon szereplő két metszet a fürdőbe merített rúd alsó részéből (4 pozíció) és az eredetileg rudat nem tartalmazó, olvadó rúd alatti első tárcsából (5 pozíció) származik.

A határréteg méretének megállapítására megkíséreltük ugyan a szövétváltozás alapján mérési adatokat szerezni, ezek azonban a határréteg tényleges vastagságára a kialakult, főleg Widmanstätten-szövet tagoltsága miatt sem adhattak megnyugtató értékeket és természetesen kiértékelhetetlen pozitív hibával terheltek.

A határréteg, illetve a karbonprofil tömegspektrométeres megfigyelésére is kísérletet tettünk. A KFKI berendezéséhez 2 x 2 mm szelvényű hasábot kellett kialakítani a vizsgálandó próba átlójában. Mivel ez a vizsgálati anyag-előkészítés rendkívül munkaigényes és költséges, a határréteg ilyen tanulmányozási formájától elálltunk.

A karbonprofil mikroszondás vizsgálati módja első megközelítésben kézenfekvőnek látszott. Mivel a vizsgálat lefolytatásakor még nem volt hazai lehetőség, a Freital-i Nemesacélmű berendezésén vetettünk fel néhány görbét. Az 1,60 % C-tartalmú fürdőbe merített 0,10 % C-tartalmú rúd megszilárdult próbájának 4 pozíciójú tárcsájának (4/14 jel) karbonprofilja a 14. ábrán látható. Az erősen tagolt Widmanstätten strukturából adódó C heterogenitás azonban egy karbonprofil felvétel görbéjének akár planimetriálással történő viszonylagos egyenletesebbé alakítása segítségével sem teszi lehetővé a határréteg vastagságának megnyugtató mérését. Ehhez egy-egy próbára sok - akár 50-50 - profil meghatározása és ezekből átlagok képzése volna szükséges. Ezért a határrétegnek az adott szövettulajdonságú próbákon a nagy felbontású mikroszondával mérését

Próbaszám



4/11

4/12

4/13

4/14

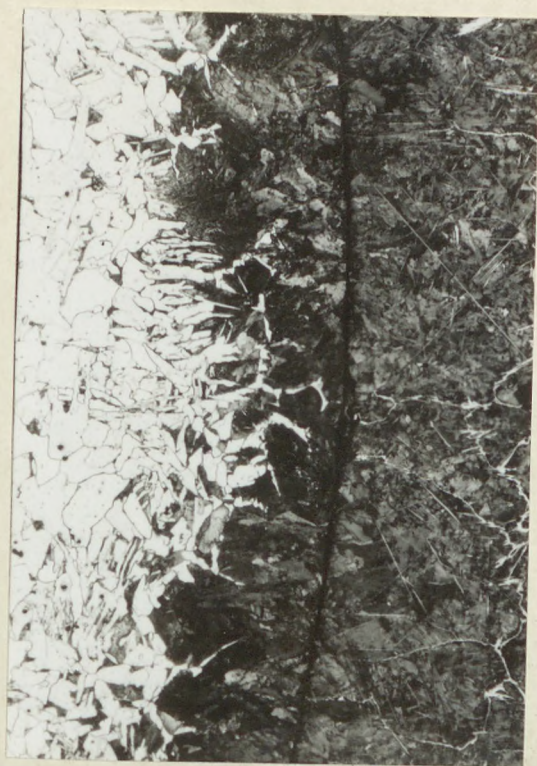
10. ábra

Az 1,60 % C-tartalmú, 1555°C hőmérsékletű olvadékban olvadó
0,10 % C-tartalmú rúd befagyasztás során kialakult szövete az
1, 2, 3 és 4 helyzetekben.

N = 10

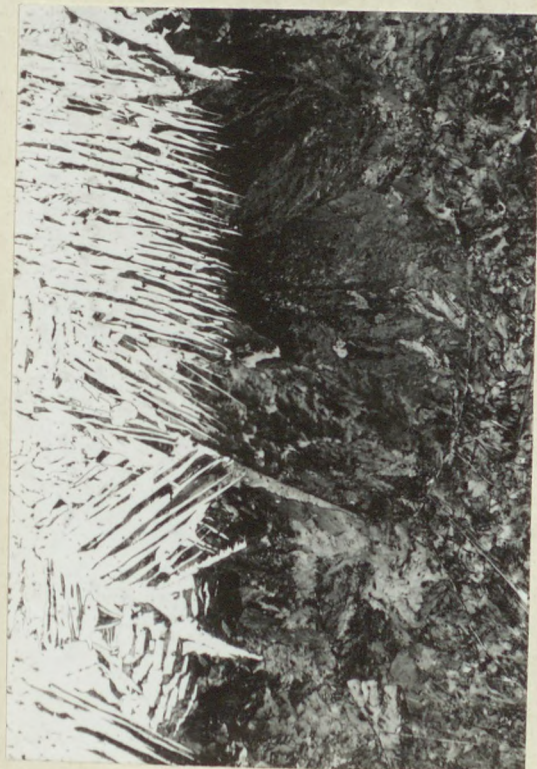
Maratás: Nital

Próbaszám



4/11

4/12



4/13

4/14



11. ábra

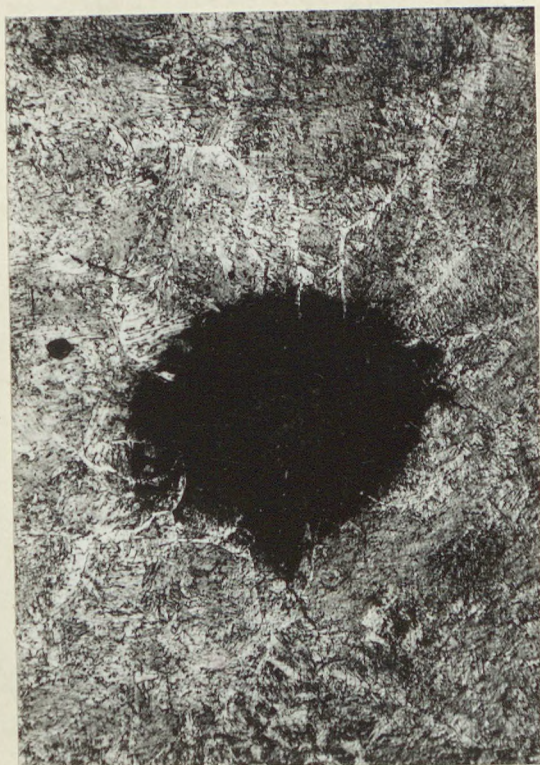
Az 1,60 % C-tartalmú, 1550°C hőmérsékletű olvadékban
olvadó 0,10 % C-tartalmú rúd befagyasztás során kialakult szövete
az 1, 2, 3 és 4 helyzetekben.

N = 100

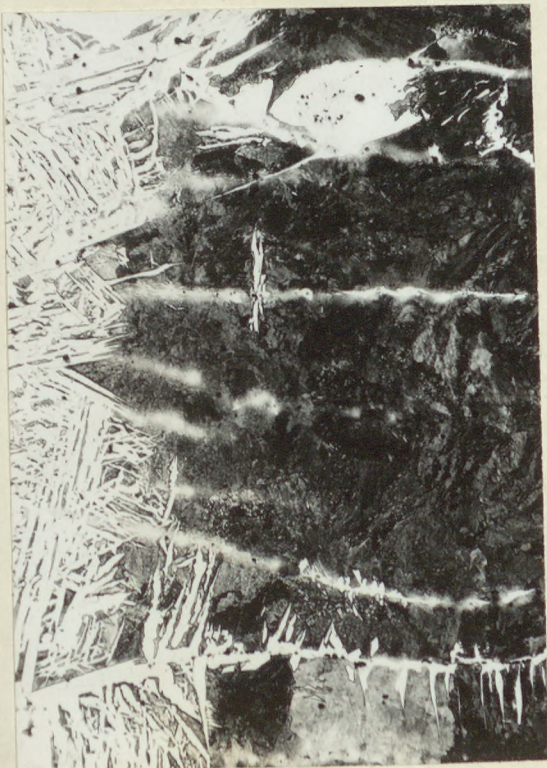
Maratás: Nital

Próbaszám: 1/34

1/35



N = 10



N = 100



12. ábra

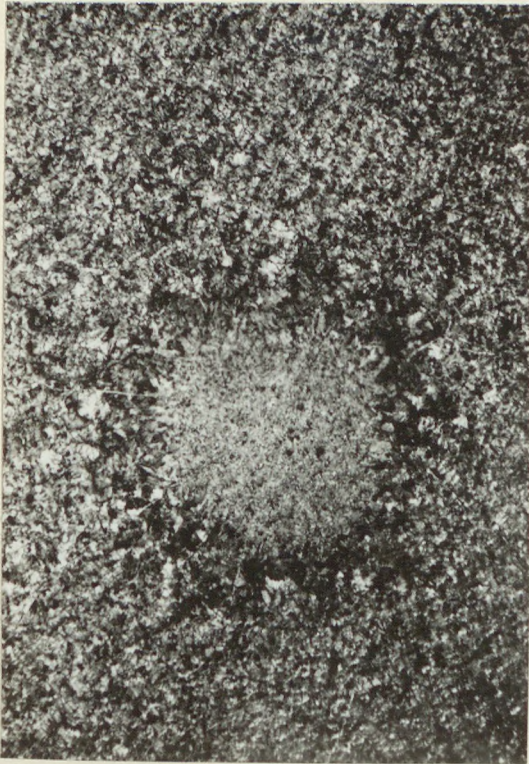
A 0,10 % C-tartalmú, 1550°C hőmérsékletű olvadékban olvadó
1,05 % C-tartalmú rúd befagyasztás során kialakult szövete a
4 és 5 helyzetekben, a metszet közepén.

N = 10 és 100

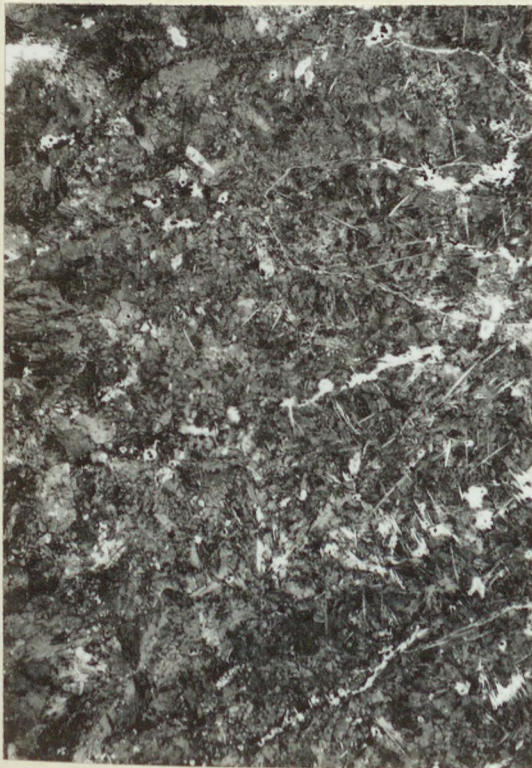
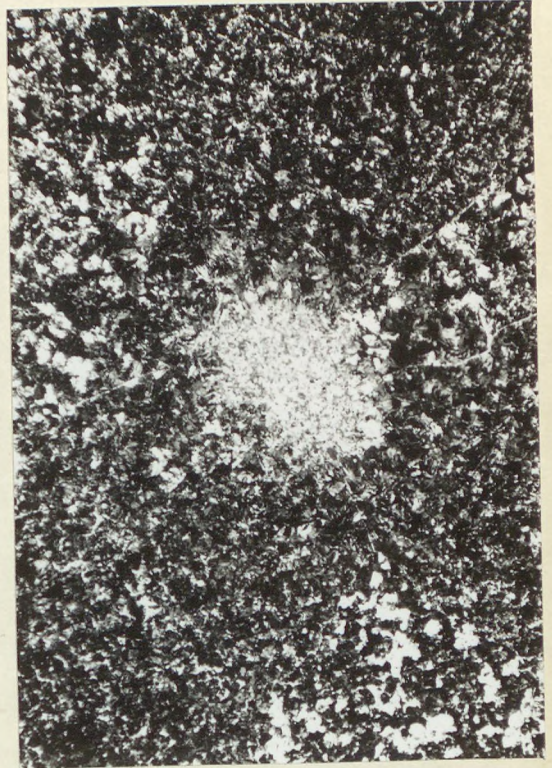
Maratás: Nital

Próbaszám: 2/44

2/45



N = 10



N = 100

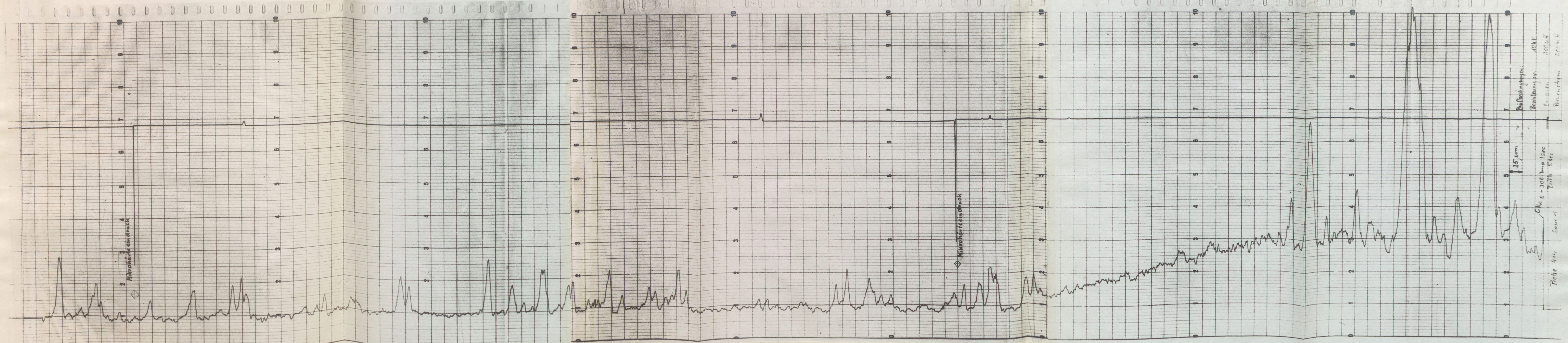


13. ábra

A 0,48 % C-tartalmú, 1550^oC hőmérsékletű olvadékban olvadó
1,60 % C-tartalmú rúd befagyasztás során kialakult szövete a
4 és 5 helyzetekben, a metszet közepén.

N = 10 és 100

Maratás: Nital



14. ábra

1,60 % C-tartalmú, 1550°C hőmérsékletű olvadékban olvadó 0,10 % C-tartalmú rúd befagyasztás után, a 4 pozícióban kimunkált csiszolatán végzett mikroszondás vizsgálat C-profilja.

elvetettük.

A nehézségek áthidalására Vorsatz-Répási-Horváth-Szabó szabadalmazott műszerén végeztük el a szükséges vizsgálatokat [22].

Méréseinkhez kisméretű szikrakisülést használtunk, mely zárt térben, oxigénáramban ég és folyamatosan halad előre a próba felületén. A kisülés által felhevített kis helyen a próba anyaga az oxigénáramban elég. Ezáltal a próbában levő karbon CO_2 -vé alakul. A gázáramban levő és a karboneloszlással arányosan folyamatosan változó CO_2 mennyiségének meghatározása szikra által a próba felületén megtett út függvényében való ábrázolása segítségével ezen a módon lehetségessé válik a karbon-tartalom eloszlásának rögzítése. A mérés azonban előnyei mellett több nehézséggel is jár, melyek pl.:

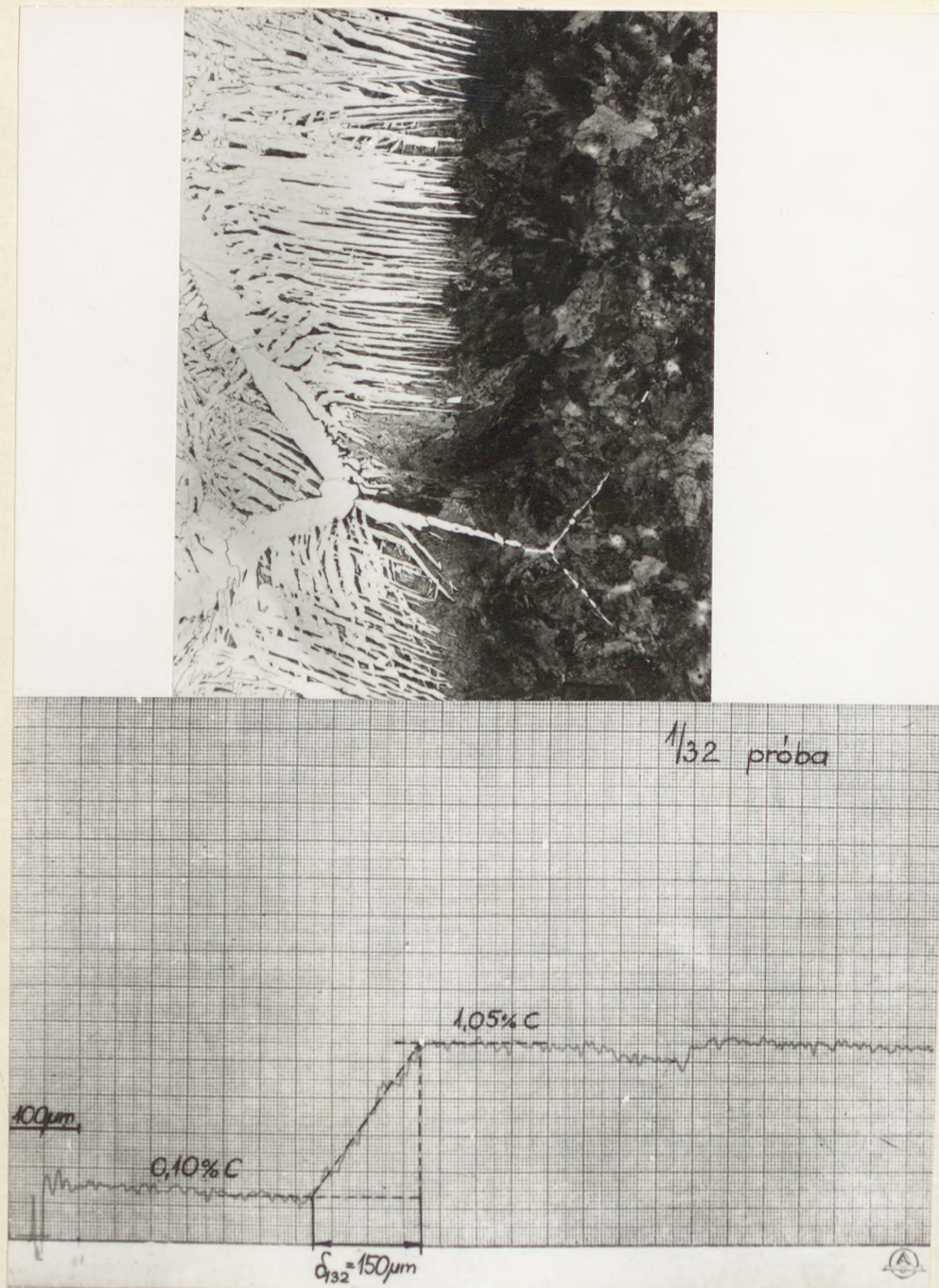
A szikrában, illetőleg ivben eléggő anyagból keletkező CO_2 mind elektrokémiai, mind pedig katarométeres módszerrel meghatározható, bár ez utóbbinál az érzékenység határa közelében dolgozunk, és a meghatározás csak a nagyon kis káros térfogatok következtében lehetséges.

A berendezés folyamatosan mozgó tühegyes elektródból és a mintából képezett szikra, illetve ivközből, igen kis térfogatot képviselő zárt gázvezető rendszerből, porszűrőből és a CO_2 -t érzékelő egységből áll. A szikra, illetve ivköz - azaz a felső tüelektród mozgását egy X-Y író X tengelyére, a CO_2 meghatározó jelét pedig az Y tengelyre vite, az X-Y író által rajzolt görbe a tüelektród útja mentén a karboneloszlást fogja ábrázolni.

A megfelelően beállított szikra, illetve iv esetében kisülés által megolvasztott folt átmérője mintegy 0,2 mm az előrehaladáskor, az eloszlásban mutatkozó távolsági hiba mintegy $\pm 20 \mu\text{m}$ -re tehető. Az eloszlási görbe felvétele csak pontosan összehangolt előtolási sebesség, gerjesztési körülmények, gázáramlási sebesség és minimális káros térfogat beállítása esetében lehetséges.

Mikroszikrás módszerrel felvett görbe látható a 15. ábrán.

Hasonlóképp vizsgáltuk a 0,10 % C-tartalmú, 50 kg-os fürdőbe merített 1,05 % C-tartalmú próbát (1/31 jel) is, mely a ráfagyási peri-



15. ábra

0,10 % C-tartalmú olvadékba merülő 1,05 % C-tartalmú próba átmeneti zónájának szekunder szövete és a mikroszikkra-
karbonmeghatározással nyert diagram ($\delta = 150 \mu\text{m}$).

ódus kezdeti szakaszából való. A karbonprofilt a 16. ábra érzékelteti. A görbét a bemelegítési szinttől 70 mm mélységben vettük fel.

3.3 A kísérletek kiértékelése

3.3.1 Az olvadási görbék és az azokból levonható következtetések

A 0,10, 0,48, 1,05 és 1,60 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített 0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú, 20°C hőmérsékletű próbák beolvadása során nyert adatok (IV., V. és VI. táblázat) feldolgozását a 17-23. ábrák foglalják össze.

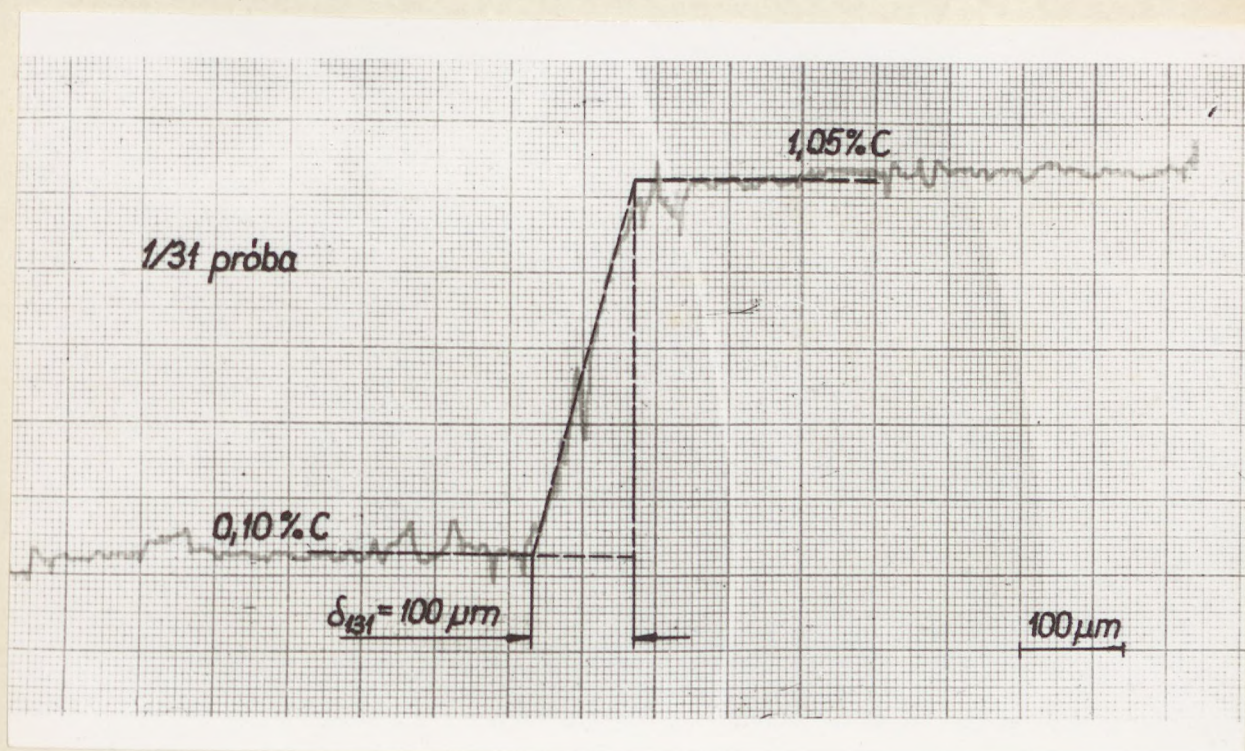
A 17. ábra a 0,10 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített 0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú, 20°C hőmérsékletű próbák olvadási görbéit tartalmazza. A diagramon folyamatos vonallal kihúzott görbék az indukciós kemencében megolvasztott és nyugodt fürdő viszonyaira vonatkoznak, míg a szaggatott görbék az előírt hőmérsékleti határok tartása mellett realizált induktív fürdőmozgás viszonyára jellemzőek.

Mindegyik görbe lefutásának közös jellegzetessége, hogy a fürdőbe merülést követően súlynövekedés áll be. A fürdőbe merítés idejének növelésével ez a súlynövekedés egy ideig tart, majd súlycsökkenés veszi kezdetét, melynek során a fürdőbe merített próba eredeti súlyát éri el, majd teljesen olvadt állapotba megy át. A beolvadás folyamata az adott viszonyok között tehát két periódusra oszlik:

- a/ a ráfagyási periódusra és a
- b/ tényleges beolvadás periódusára.

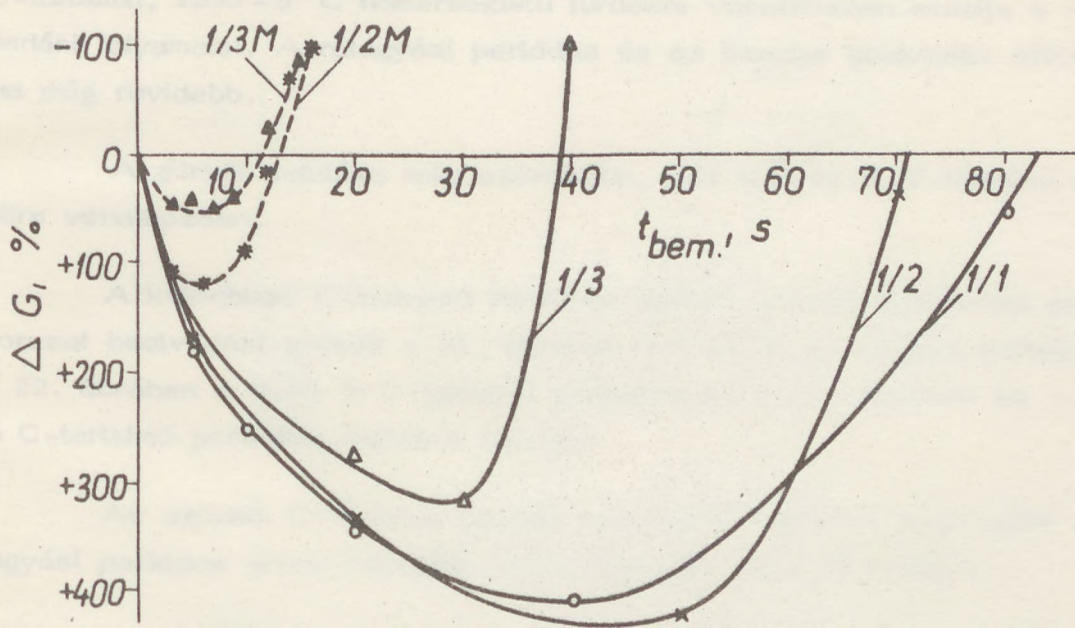
A ráfagyási periódus annál hosszabb, és az egész olvadási folyamatban részesedése annál nagyobb, minél kisebb a 0,10 % C-tartalmú fürdőbe merülő próbák C-tartalma.

A fürdő mozgása a beolvadás folyamatát - a határréteg csökkentése révén - jelentősen meggyorsítja. A ráfagyási periódus és a tényleges beolvadási periódus azonban ebben az esetben is jellemző a folyamatra, bár a ráfagyási periódus lényegesen rövidebb és az egész beolvadási folyamatban részesedése kisebb, mint nyugodt fürdő esetében.



16. ábra

A 0,10 % C-tartalmú olvadékba 5 s-ig merülő 1,05 % C-tartalmú rúd fürdőfelszínétől 70 mm-re levő helyzetének átmeneti övezetében mikroszinkrás módszerrel felvett C-profilja.



17. ábra

A 0,10 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített 0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú, 20°C kezdőhőmérsékletű próbák beolvadási görbéi.

A 18. ábra a 0,48 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített 0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú, 20°C hőmérsékletű próbasorozat beolvadási görbéit foglalja össze. A görbék lefutásának jellege azonos a 17. ábrán látottakkal. A ráfagyási periódus azonban lényegesen kisebb, mint a 0,10 % C-tartalmú fürdő esetében. Az összes beolvadási időben lényeges különbségek nem figyelhetők meg, bár a 2/3 görbe lefutása jellegzetes és eltér a 2/1 és 2/2 görbékétől.

A 19. ábra az 1,05 % C-tartalmú, a 20. ábra pedig az 1,60 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőkre vonatkozóan mutatja a beolvadási folyamatot. A ráfagyási periódus és az összes beolvadás időtartama még rövidebb.

A görbék lefutása még szorosabb, mint a 0,48 % C-tartalmú fürdőre vonatkozóan.

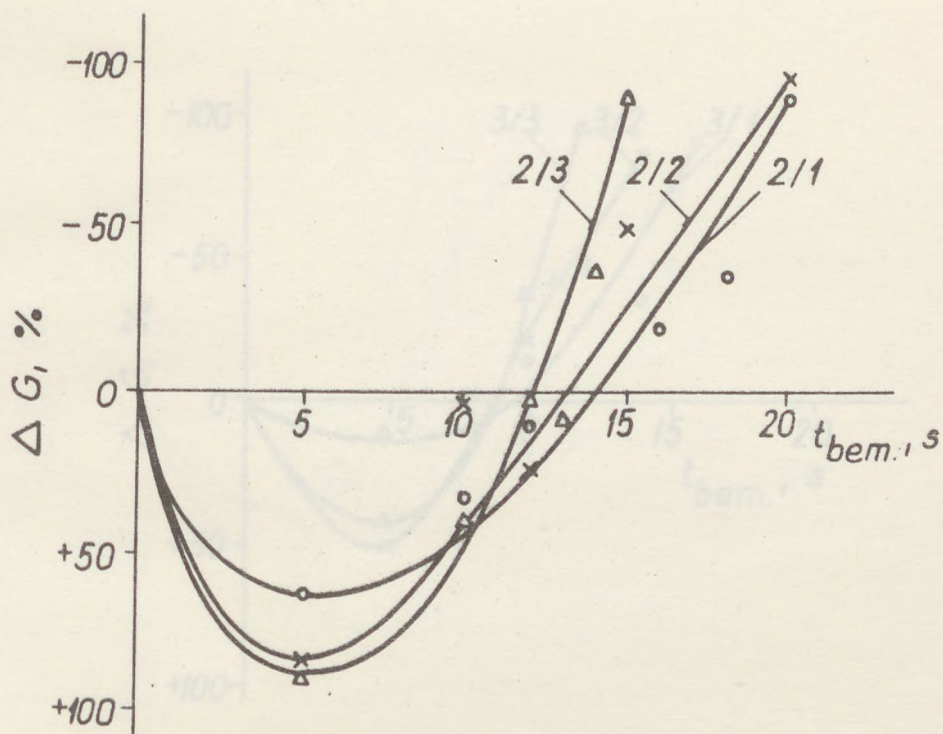
A különböző C-tartalmú fürdőkbe merülő azonos C-tartalmú próbasorozat beolvadási görbéit a 21. ábrában a 0,10 % C-tartalmú próbákra, a 22. ábrában a 0,48 % C-tartalmú próbákra és a 23. ábrában az 1,05 % C-tartalmú próbákra foglaltuk össze.

Az azonos C-tartalmú próbák beolvadási ideje és ezen belül a ráfagyási periódus annál rövidebb, minél nagyobb azok C-tartalma.

Az olvadékokéval azonos C-tartalmú próbasorozatok beolvadási görbéi a 24. ábrán láthatók. A 0,10 % C-tartalmú acélpróbák ráfagyási periódusa mintegy kilencszerese az 1,05 % C-tartalmú acélénak és mintegy hatszorosa a 0,48 % C-tartalmú acélénak.

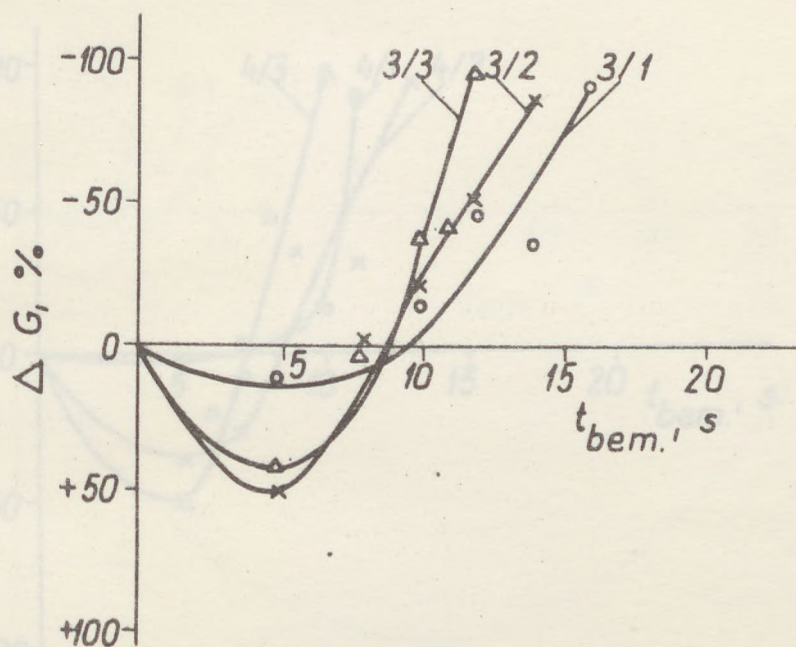
A fentiek alapján célszerűnek látszik megvizsgálni azt, hogy a fürdő likvidusz hőmérséklete és a fürdőbe merülő próba likvidusz hőmérséklete közti különbség függvényében hogyan alakul a ráfagyási periódus és a beolvadási folyamat teljes időtartama. A 25. ábra mutatja be az összefüggéseket a vizsgált esetekre vonatkozóan.

A különböző C-tartalmú fürdőbe merülő azonos C-tartalmú acélok ráfagyási periódusának és a teljes beolvadásnak időtartamának a fürdő és



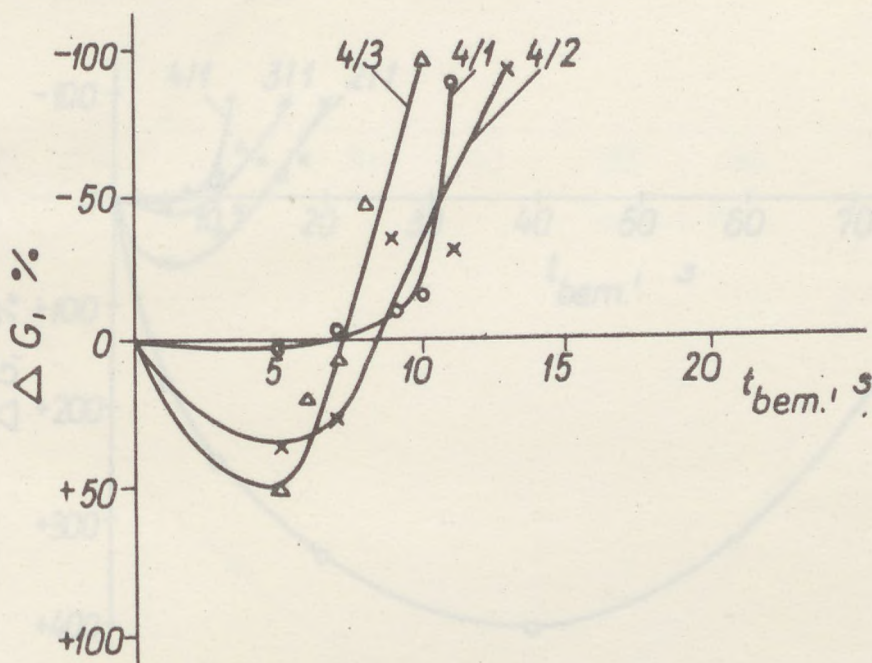
18. ábra

A 0,48 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített
0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú, 20°C kezdőhőmérsékletű
próbák beolvadási görbéi.



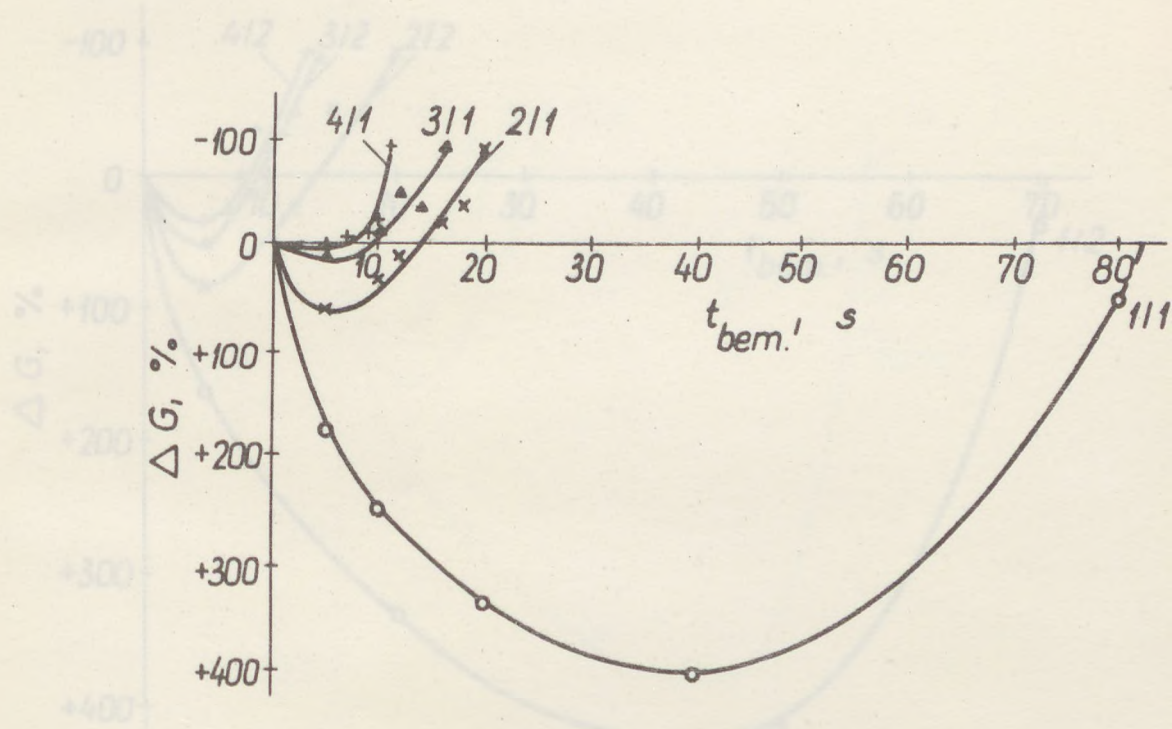
19. ábra

Az 1,05 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített
 0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú, 20°C kezdőhőmérsékletű
 próbák beolvadási görbéi.



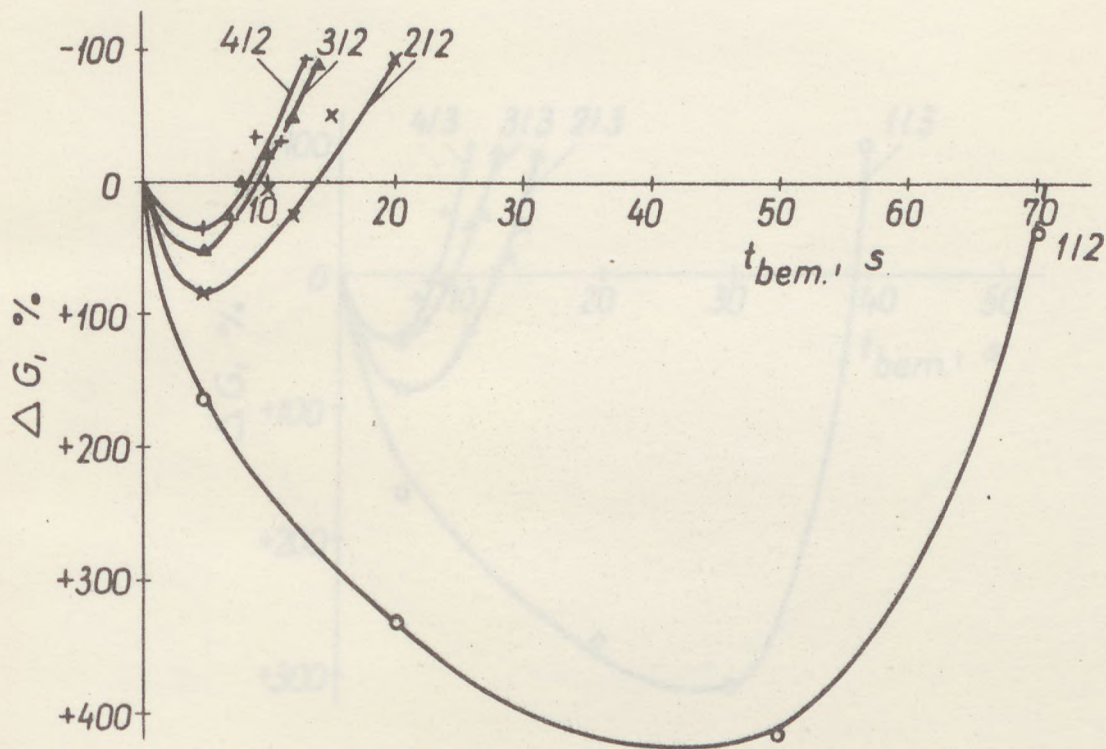
20. ábra

Az 1,60 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ \text{C}$ hőmérsékletű fürdőbe merített 0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú, 20°C kezdőhőmérsékletű próbák beolvadási görbéi.



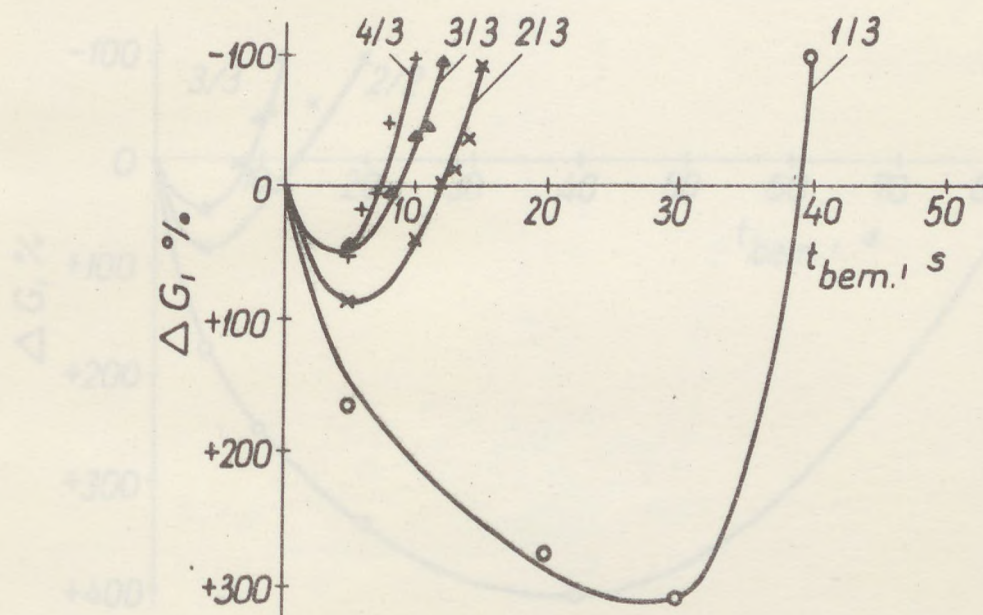
21. ábra

A 0,10 % C-tartalmú próbák beolvadása 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ \text{C}$ hőmérsékletű fürdőben.



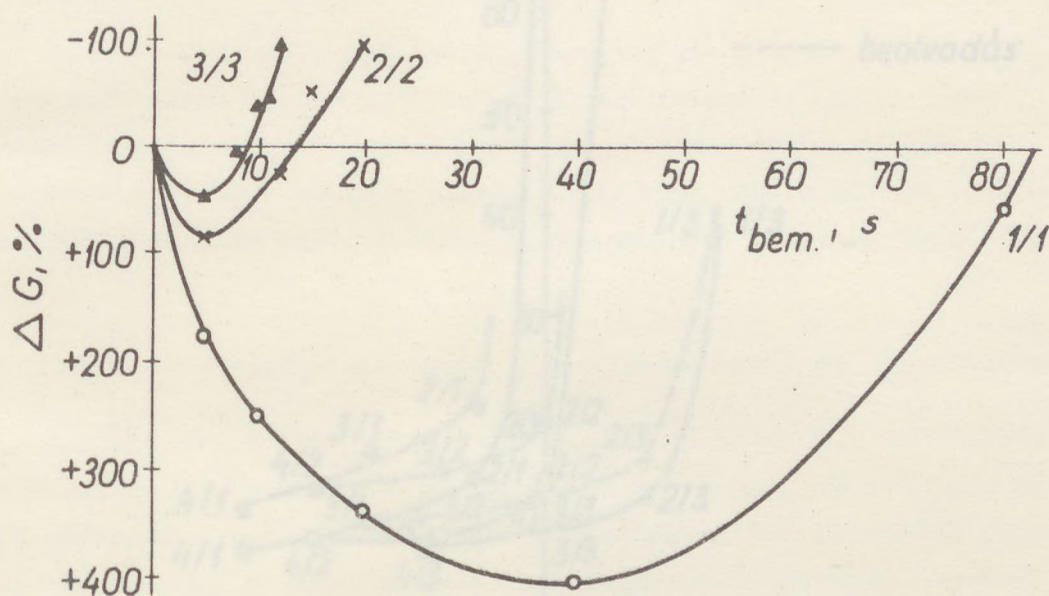
22. ábra

A 0,48 % C-tartalmú próbák beolvadása 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékletű fürdőben.



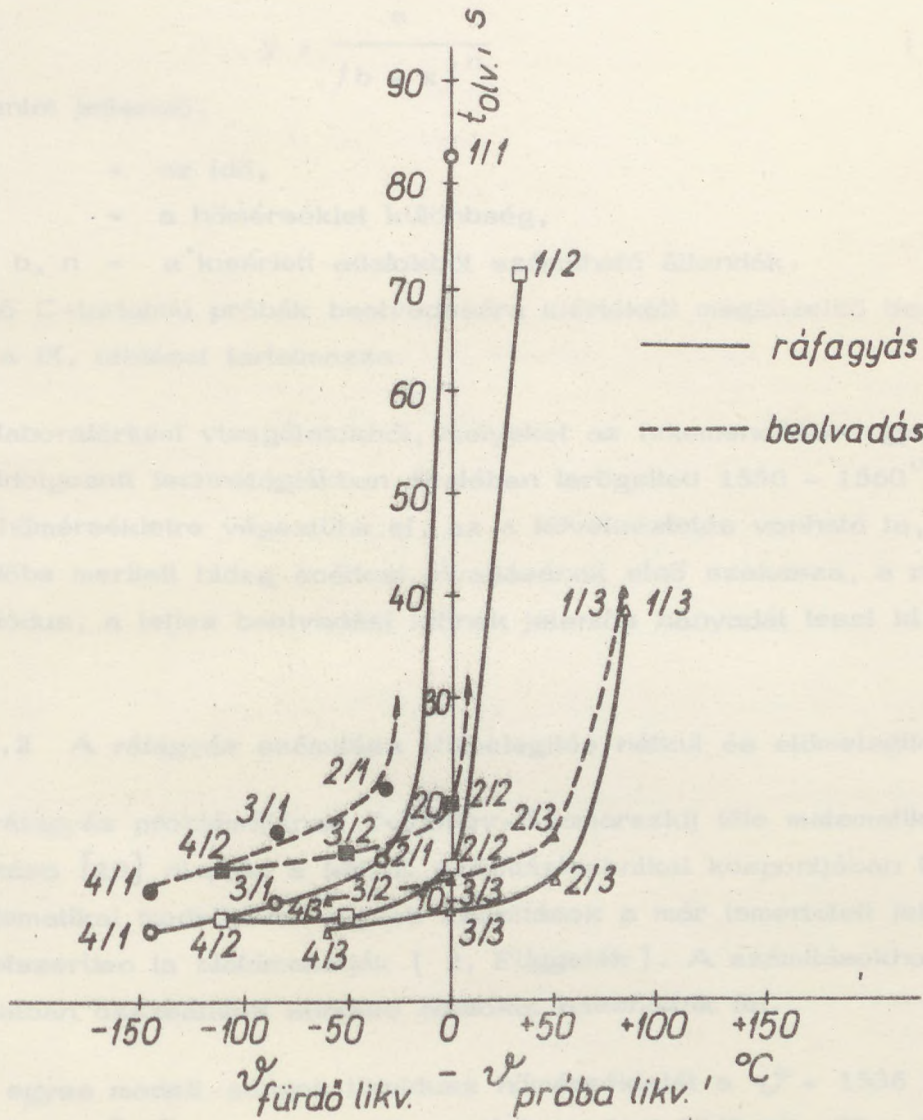
23. ábra.

Az 1,05 % C-tartalmú próbák beolvadása 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ \text{C}$ hőmérsékletű fürdőkben.



24. ábra

Saját, $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékletű olvadékába merített 0,10, 0,48 és 1,05 % C-tartalmú próbák beolvadása.



25. ábra

Az olvadék és a bemező próba likvidusz hőmérséklete közti különbség és a tényleges beolvadás kezdetéig, valamint befejeződéséig eltelt idő közti összefüggés.

a bemező próba likvidusz hőmérséklet különbségétől függésére a

$$y = \frac{a}{(b - x_i)^n} \quad (1)$$

tipusú egyenlet jellemző,

ahol:

y = az idő,

x = a hőmérséklet különbség,

a, b, n = a kísérleti adatokból számítható állandók.

A különböző C-tartalmú próbák beolvadására kiértékelt megközelítő összefüggéseket a IX. táblázat tartalmazza.

A laboratóriumi vizsgálatokból, melyeket az ivkemencékben gyártott adagokra kidolgozott technológiákban általában lerögzített 1550 - 1560 °C beolvadási hőmérsékletre végeztünk el, az a következtetés vonható le, hogy a fürdőbe merített hideg acéltest olvadásának első szakasza, a ráfagyási periódus, a teljes beolvadási időnek jelentős hányadát teszi ki.

3.3.2 A ráfagyás számítása előmelegítés nélkül és előmelegítéssel

A ráfagyás problémájának Tyihonov-Szamarszkij féle matematikai megfogalmazása [10] alapján a MVAE számítástechnikai központjában kialakított matematikai modelljével végzett számítások a már ismertetett jelenségeket adatszerűen is alátámasztják (2. Függelék). A számításokhoz a X. táblázatban összeállított kiinduló adatokat használták fel.

Az egyes modell-adagok likvidusz hőmérsékletét a $\vartheta = 1536 - 90$ C összefüggésből [12] alapján, a hővezetőképességet Uhlitzsh 23 alábbi összefüggésének felhasználásával számítottuk az $\alpha - \vartheta$ átalakulásnál nagyobb hőmérsékletekre:

$$\lambda = \lambda'_a + \frac{25 - \lambda'_a}{1200 - \vartheta'_a} (\vartheta_1 - \vartheta'_a) \quad (2)$$

ahol

λ'_a = a hővezetőképesség az $\alpha - \vartheta$ átalakuláskor és ennél kisebb hőmérsékleten

ϑ'_a = az átalakulás hőmérséklete, °C

ϑ_1 = a kérdéses hőmérséklet, °C

A ráfagyási periódus és a teljes beolvadás idejének
közelítő számítása

/ Fürdő hőmérséklet: $1555 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ /

IX. táblázat

A beolvadó acél C-tartalma, %	Megközelítő összefüggés	
	a ráfagyási periódus időszükségletére	a teljes beolvadás idő- szükségletére
0,1	$y = \frac{39}{(0,1-x)^{0,32}}$	$y = \frac{100}{(1-x)^{0,443}}$
0,48	$y = \frac{35,5}{(34,1-x)^{0,3}}$	$y = \frac{53}{(34,3-x)^{0,282}}$
1,05	$y = \frac{23,44}{(85,1-x)^{0,2155}}$	$y = \frac{50,43}{(87-x)^{0,325}}$

y = a ráfagyás, illetve a teljes beolvadás időszükséglete, s
x = a fürdő és a bemelegülő próba likvidushőmérséklete közti
különbség, $^{\circ}\text{C}$

A ráfagyás számításához felhasznált kiinduló adatok 20°C hőmérsékletű próbák, 1555°C hőmérsékletű fürdőbe merítésére

X. táblázat

A fürdő C-tartalma, %	A fürdőbe merülő próbák C-tartalma, %	A próba kezdeti hőmérséklete, °C	A fürdő állandó hőmérséklete, °C	A fürdő likvidus hőmérséklete, °C	A próba hővezető képessége, λ_{20° kcal/m, h, °C	A fürdő hővezető képessége, λ_{1555° kcal/m, h, °C	A fürdő olvadáshője, k	A próba fajhője, $C_p 20^\circ$ kcal/kg, °C	A fürdő fajhője, $C_p 1555^\circ$ kcal/kg, °C	A próba sűrűsége, γ_{20° kg/m ³	A fürdő sűrűsége, γ_{1555° kg/m ³
0,10	0,10	20	1555	1527	49,30	23,63	65,7	0,129	0,173	7850	7092
0,10	0,48	20	1555	1527	42,20	23,63	65,7	0,129	0,173	7835	7092
0,10	1,05	20	1555	1527	36,80	23,63	65,7	0,129	0,173	7817	7092
0,10	1,60	20	1555	1527	32,40	23,63	65,7	0,129	0,173	7790	7092
0,48	0,10	20	1555	1493	49,30	23,75	64,6	0,129	0,173	7850	6993
0,48	0,48	20	1555	1493	42,20	23,75	64,6	0,129	0,173	7835	6993
0,48	1,05	20	1555	1493	36,80	23,75	64,6	0,129	0,173	7817	6993
0,48	1,60	20	1555	1493	24,78	23,75	64,6	0,129	0,173	7790	6993
1,05	0,10	20	1555	1442	49,30	24,00	62,8	0,129	0,173	7850	6901
1,05	0,48	20	1555	1442	42,20	24,00	62,8	0,129	0,173	7835	6901
1,05	1,05	20	1555	1442	36,80	24,00	62,8	0,129	0,173	7817	6901
1,05	1,60	20	1555	1442	32,40	24,00	62,8	0,129	0,173	7790	6901
1,60	0,10	20	1555	1382	49,30	24,00	60,6	0,129	0,173	7850	6803
1,60	0,48	20	1555	1382	42,20	24,00	60,6	0,129	0,173	7835	6803
1,60	1,05	20	1555	1382	36,80	24,00	60,6	0,129	0,173	7817	6803
1,60	1,60	20	1555	1382	32,40	24,00	60,6	0,129	0,173	7790	6803

$$\lambda_a = \frac{360}{5,5 + 0,1\eta + 0,35\eta + 2,2C\%(1-0,1125\eta) + 4,5Si\%(1-0,125\eta) + 1,9Mn\%(1-0,1125\eta)} \quad (3)$$

ahol $\eta = \frac{\text{hőmérséklet, } ^\circ\text{C}}{100}$

Az olvadáshőre megfelelő adatokat nem találtunk az irodalomban és ezért Richards eredetileg szinfémetekre vonatkozó szabályát alkalmaztuk. Ez azt mondja, hogy a moláris olvadáshő és az abszolút hőmérsékletben kifejezett olvadáspont aránya közel 2,1 [14].

A fajhő értékelését a

$$C_p = 6,74 + 1,60 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad (4)$$

összefüggésből végeztük el [24].

A sűrűségeket Benedicks [25] munkája nyomán rögzítettük le.

A MVAE Elliott 803 számítógépén végzett ráfagyási vizsgálat eredményeit 20°C bemelegítő próba hőmérséklet és 1555 ± 5°C fürdőhőmérséklet eseteire a XI. táblázat tartalmazza.

A $\lambda = \alpha \sqrt{t}$ összefüggés alapján, a számítás során nyert λ értékek birtokában a fürdőbemelegítés első s-jára érvényes ráfagyott rétegvastagságot is kiértékeltek és csökkenő ráfagyási sebesség sorrendet állapítottunk meg. Ez a sorrend a kvázi diffúziómentes olvadás eseteire /saját fürdőben olvadás eseteire vonatkozó első adatcsoport/ teljesen azonos alakulást mutat a laboratóriumi vizsgálatokéval (17 - 24. ábra).

A matematikai modellt felhasználtuk arra is, hogy a 300°C- és a 700°C hőmérsékletű próbaelőmelegítés hatását is kiértékeljük. A számításokhoz XII. táblázatban összefoglalt adatokat vettük figyelembe. Az ered-

A MVAE Elliott 803 számítógépén végzett ráfagyási vizsgálat eredményei

$$\bar{z} = L \sqrt{t} \text{ összefüggés szerint}$$

XI. táblázat

Fürdő C-tartalma, %	Beolvadó próba C-tartalma, %	$L, \frac{1}{m \cdot h^{\frac{1}{2}}}$	$\bar{z} = 1,67 L$ az első s-ra, cm	Csökkenő ráfagyási sebes- ség sorrend
0,10	0,10	0,13025	0,217	1
0,48	0,48	0,09914	0,166	5
1,05	1,05	0,07716	0,129	12
1,60	1,60	0,06180	0,103	16
0,10	0,48	0,11499	0,192	2
0,10	1,05	0,10297	0,172	4
0,10	1,60	0,09291	0,154	7
0,48	0,10	0,11170	0,185	3
0,48	1,05	0,08914	0,148	8
0,48	1,60	0,06493	0,108	15
1,05	0,10	0,09586	0,160	6
1,05	0,48	0,08549	0,143	9
1,05	1,60	0,07920	0,132	11
1,60	0,10	0,08374	0,140	10
1,60	0,48	0,07496	0,124	13
1,60	1,05	0,06786	0,113	14

A ráfagyás számításához felhasznált kiinduló adatok 300°C és 700°C-ra előmelegített próbák és 1555°C hőmérsékletű fürdők eseteire

XII. táblázat

A fürdő C-tartalma,	A fürdőbe merülő próba C-tartalma,	A próba állandó hőmérséklete,	A fürdő állandó hőmérséklete,	A fürdő likvidusz hőmérséklete,	A próba hővezető képessége,		A fürdő hővezető képessége,	A fürdő olvadás hője,	A próba fajhője		A fürdő fajhője,	A próba sűrűsége		A fürdő sűrűsége,
%	%	°C	°C	t_{likv} °C	λ_{300°	λ_{700°	λ_{1555°	k	$C_{p_{300^\circ}}$	$C_{p_{700^\circ}}$	$C_{p_{1555^\circ}}$	γ_{300°	γ_{700°	γ_{1555°
					kcal/m, h, °C		kcal/m, h, °C	kcal/kg	kcal/kg, °C		kcal/kg, °C	kg/m ³		kg/m ³
0,10	0,10	300	1555	1527	42,10		23,63	65,7	0,150		0,173	7711		7092
0,10	0,10	700	1555	1527		27,40	23,63	65,7		0,161	0,173		7525	7092
0,48	0,48	300	1555	1493	38,20		23,75	64,6	0,150		0,173	7683		6993
0,48	0,48	700	1555	1493		26,90	23,75	64,6		0,161	0,173		7482	6993
1,05	1,05	300	1555	1442	35,10		24,00	62,8	0,150		0,173	7657		6901
1,05	1,05	700	1555	1441		26,30	24,00	62,8		0,161	0,173		7445	6901
1,60	1,60	300	1555	1382	32,30		24,00	60,6	0,150		0,173	7627		6803
1,60	1,60	700	1555	1382		24,10	24,00	60,6		0,161	0,173		7413	6803

ményeket a XIII. táblázatban láthatjuk. A próbára ráfagyott réteg kiszámított vastagsága lényegesen kisebb az előmelegítés esetében, mint 20°C hőmérsékletű próbákra. Az előmelegítés hőmérsékletének növekedésével természetesen ez is jelentősen csökken.

A fürdőbe bemerülő különböző hőmérsékletű próbára az első s-ban ráfagyott réteg vastagságának alakulását hasonlítja össze a 26. ábra. Ebből azt a további következtetést vonhatjuk le, hogy "nyugodt" beolvadási körülmények között - tehát mesterséges fürdőmozgás nélkül történő beolvadáskor - a 700°C -ra előmelegített 0,10 % C-tartalmú próba saját fürdőjébe mártva közel olyan vastag ráfagyási kérget kap az első s-ban, mint a 20°C hőmérsékletű, saját fürdőjébe helyezett 1,60 % C-tartalmú próba.

3.3.3 A laboratóriumi vizsgálati eredmények összehasonlítása az ivkemence beolvadási körülményeivel

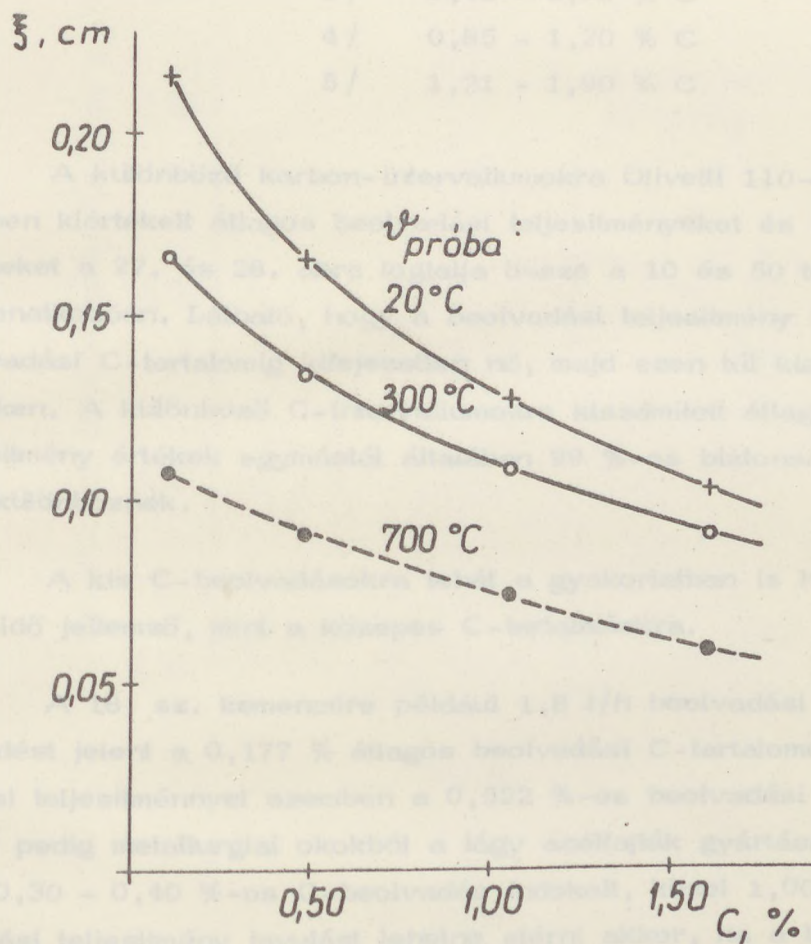
Az eddig ismertetett vizsgálati eredményeinket a gyakorlatban az ivkemencében lefolyó beolvadási folyamatra közvetlenül és fenntartás nélkül átvinni természetesen nem lehet. Bizonyos megfontolásokkal azonban értelmezhetők a laboratóriumi megfigyelések is a gyakorlati beolvadás néhány esetére. Így például az a beolvadási típus, mikor ivkemencében csak lágy hulladék olvad be, mindenképpen hasonló a laboratóriumban 0,10 % C-tartalmú fürdőbe merített 0,10 % C-tartalmú próba beolvadásához. Bár az ivkemencében az elektródák alatt képződő fürdő nem teljes térfogatában nyugodt, és a fürdőben álló, vagy abba belebukó hulladékdarabok részben "előmelegített" állapotúak az olvadás kezdetén, mégis a teljes beolvadási időre nagy befolyású ráfagyási periódus a lágy betét esetében a leghosszabb és így az egész beolvadási folyamat is akkor a legidőigényesebb a vizsgált C-intervallumban.

A laboratóriumi és a számítógéppel nyert adatoknak a gyakorlati adatokkal összehasonlítására mintegy 450 válogatás nélküli, ötvözetlenül beolvadó adag jellemző értékeit használtuk fel az LKM 11, 16 és 18 sz. ivkemencéknek adataiból [26].

A MVAE Elliott 803 számítógépén végzett ráfagyási
vizsgálat eredményei $\sum = \alpha \sqrt{t}$ összefüggés szerint

XIII. táblázat

A fürdőbe merített próba előmelegítési hőmérséklete, °C	A fürdő C-tartalma, %	A fürdőbe merített próba C-tartalma,	$\sum$, m . h ^{1/2}	$\sum = 1,67 \cdot \alpha$ az első s-ra cm	Csökkenő ráfagyási sebesség- sorrend
300	0,10	0,10	0,10140	0,1685	1
300	0,48	0,48	0,08111	0,1342	2
300	1,05	1,05	0,06566	0,1095	3
300	1,60	1,60	0,05412	0,0910	5
700	0,10	0,10	0,06409	0,1070	4
700	0,48	0,48	0,05411	0,0908	6
700	1,05	1,05	0,04525	0,0754	7
700	1,60	1,60	0,03627	0,0605	8



26. ábra

Különböző C -tartalmú, 1555°C hőmérsékletű olvadékba merülő, 20°C , 300°C és 700°C hőmérsékletű próbákra a bemeztetés első s -ban ráfagyott réteg vastagsága Tyihonov-Szamarszkij elve alapján számolva.

Az adatokat az alábbi beolvadási karbon-intervallumokba osztottuk:

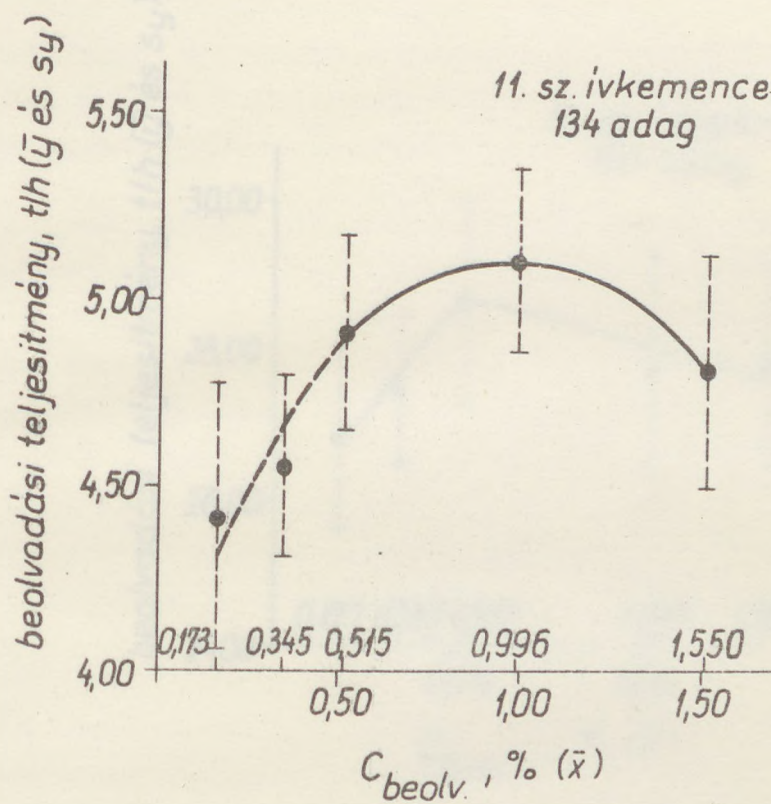
1/	<0,25 % C
2/	0,25 - 0,40 % C
3/	0,41 - 0,70 % C
4/	0,85 - 1,20 % C
5/	1,21 - 1,90 % C

A különböző karbon-intervallumokra Olivetti 110-es asztali számítógépen kiértékelt átlagos beolvadási teljesítményeket és korrigált szórásértékeket a 27. és 28. ábra foglalja össze a 10 és 50 tonnás ivkemencére vonatkozóan. Látható, hogy a beolvadási teljesítmény a 0,5 - 1,0 % beolvadási C-tartalomig kifejezetten nő, majd ezen túl kisebb mértékben csökken. A különböző C-intervallumokra kiszámított átlagos beolvadási teljesítmény értékek egymástól általában 99 %-os biztonsággal szignifikánsan különböznek.

A kis C-beolvadásokra tehát a gyakorlatban is hosszabb beolvadási idő jellemző, mint a közepes C-tartalmúakra.

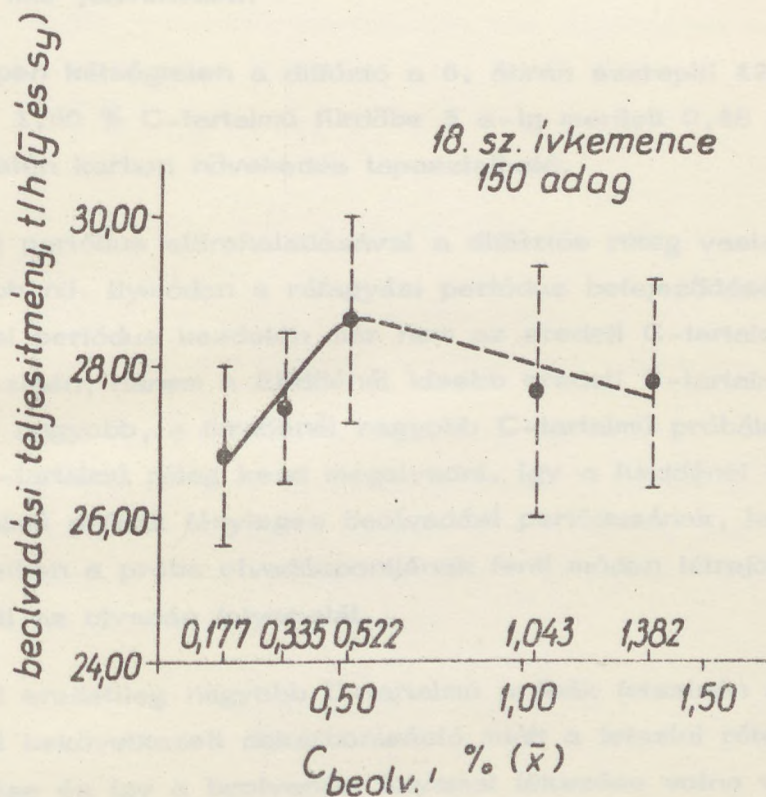
A 18. sz. kemencére például 1,8 t/h beolvadási teljesítmény növekedést jelent a 0,177 % átlagos beolvadási C-tartalomra jellemző beolvadási teljesítménnyel szemben a 0,522 %-os beolvadási C-tartalom. Mivel pedig metallurgiai okokból a lágy acélfajták gyártásához is minimálisan 0,30 - 0,40 %-os C-beolvadás indokolt, közel 1,00 t/h átlagos beolvadási teljesítmény javulást lehetne elérni akkor, ha a lágy beolvadásokat a hulladék megfelelő különtárolásával megelőzné az üzem és megfelelő mennyiségű karbonizáló anyaggal rakná be a kemencébe a lágy hulladékot. Az összes teljesítmény növekedés az eddig lágyan befutott adagokra számítva 0,5 t/h, azaz 4 %, illetve 12 min. A tényleges teljesítmény növekedés még ennél is nagyobb, mivel a lágyra befutott adagokat a fővetés előtt fel kell karbonizálni, ami további 5 - 10 min-t vesz igénybe. Ezzel az időnyereség egy-egy ilyen adagra 17 - 22 min, azaz 5,5 - 7,1 % volna.

A ráfagyási periódus 3.2.2 fejezetben ismertetett vizsgálata alapján megállapítható, hogy a ráfagyási periódus kezdetétől fogva diffúziós



27. ábra

Az LKM 11. sz., 10 t-s ivkemencéjére jellemző összefüggés a beolvadási karbontartalom és a beolvadási teljesítmény között.



28. ábra

Az LKM 18. sz., 50 t-s ivkemencéjére jellemző összefüggés a beolvadási C-tartalom és a beolvadási teljesítmény között.

folyamat játszódik le a fürdőbe merülő és attól eltérő C-tartalmú próbák felületi rétegében. Az 5. ábrán látható 131 jelű próba csupán 5 s-ig merült be a 0,1 % C-tartalmú fürdőbe, de a karbondiffúzió nyoma az 1,05 % C-tartalmú próba felszínén karboncsökkenés formájában, illetve a hajdani fürdőből a próbára fagyott réteg próbafelszínhez közeli sávjában karbon-dúsulás formájában már jelentkezett.

Hasonlóképpen kétségtelen a diffúzió a 6. ábrán szereplő 421 próba esetében is, az 1,60 % C-tartalmú fürdőbe 5 s-ig merített 0,48 % C-tartalmú próba felületén karbon növekedés tapasztalható.

A ráfagyási periódus előrehaladásával a diffúziós réteg vastagsága természetesen tovább nő. Ily módon a ráfagyási periódus befejeződésével, a tényleges beolvadási periódus kezdetén már nem az eredeti C-tartalom található a próba felszínén, hanem a fürdőénél kisebb eredeti C-tartalmú próbák esetében annál nagyobb, a fürdőénél nagyobb C-tartalmú próbákra pedig annál kisebb C-tartalmú réteg kezd megolvadni. Így a fürdőénél eredetileg kisebb C-tartalmú próbák tényleges beolvadási periódusának, legalább az első másodperceiben a próba olvadáspontjának fenti módon létrejött csökkenése elősegíti az olvadás folyamatát.

A fürdőénél eredetileg nagyobb C-tartalmú próbák felszínén a ráfagyási periódus alatt bekövetkezett dekarbonizáció miatt a felszíni réteg olvadáspont növekedése és így a beolvadási folyamat fékezése volna várható. A próba szelvényének túlnyomó részére vonatkozóan azonban a 8. ábra 132 és 133 próbájának primér szövete és a képződött lunker alapján az a következtetés vonható le, hogy fürdőbe merítéstől eltelt 20, illetve 30 s alatt a próba felszínére fagyott 0,10 % C-tartalmú kéregben, mint olvasztótégelyben a 0,10 % C-tartalmú acél szolidusz pontjánál lényegesen alacsonyabb olvadáspontú, 1,05 % C-tartalmú próba megolvad. Ilyen esetben tehát a ráfagyási periódus alatt indul meg már az olvadás, aminek következtében a próbára fagyott kéreg megolvadását követően hirtelen zajlik le a tényleges beolvadás periódusa. Ez a jelenség a 17. ábrán (1/3 görbe) és a 18. ábrán (2/3 görbe) is érzékelhető: az olvadási görbék befejező szakasza meredek.

A ráfagyási periódus vizsgálata alapján tehát egyrészt azt a megállapítást lehet tenni, hogy a diffúzió az olvadás ezen szakaszában is vég-

bemenő és el nem hanyagolható folyamat, másrészt a fürdőénél nagyobb C-tartalmú hulladék olvadása részben, vagy egészben már a ráfagyási periódus alatt - a ráfagyással párhuzamosan - végbemehet.

3.3.4 A határréteg megközelítő értéke és az anyagátadás számítása

Az olvadás során lejátszódó anyagátadás film-modelljének ismert leírását a következő összefüggés adja [5] [13] [14] [27]:

$$\dot{N} = \frac{D}{\delta} \Delta c \quad (5)$$

ahol

$\dot{N}$ = az anyagátadás sebessége, $\text{g}/\text{cm}^2, \text{ s}$

D = diffúziós együttható, cm^2/s

δ = a diffúziós határréteg vastagsága, mm

Δc = az anyagátadásra jellemző koncentráció-különbség, g/cm^3

A határréteg elvi vázlatát a 29. ábra mutatja be [14] [16] [17].

Az ábra a./ vázlatán látható u.n. Elliott-elképzelés tulajdonképpen figyelmen kívül hagyja azt a körülményt, hogy a fürdőbe merülő szilárd test felszíni rétegében is végbemegy a diffúzió, esetünkben a C áramlása. A hatékony diffúziós határréteg vastagsága ebben az esetben:

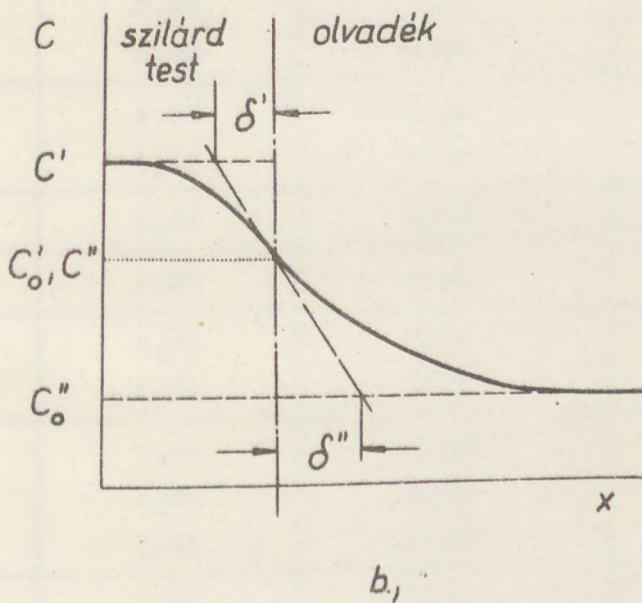
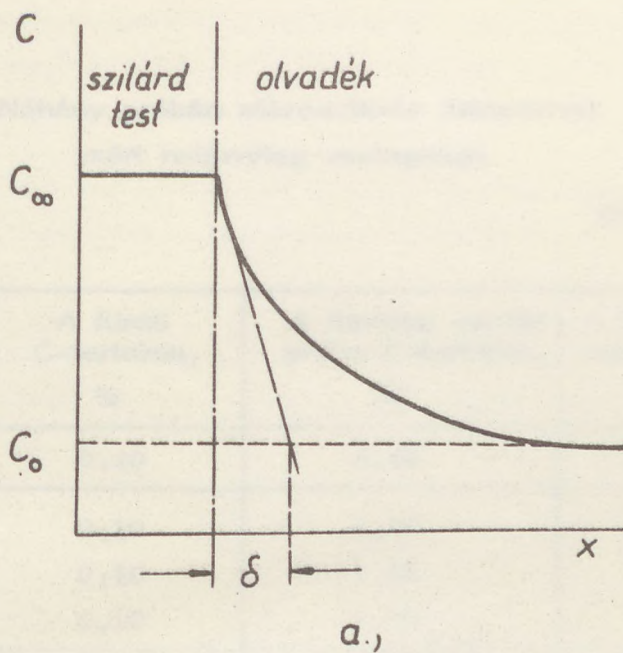
$$\delta = \frac{C_{\infty} - C_0}{\left[\frac{\partial c}{\partial x} \right]_{x=0}} \quad (6)$$

A b./ esetben - a Bodsworth megfogalmazás szerint - a határréteg két rész-határrétegből áll: az egyik a szilárd, a másik a folyékony fázisban kialakult koncentráció-profil érintője segítségével számítható ki. Erre vonatkozóan az anyagátadás sebessége:

$$\dot{N} = D' \frac{C' - C_0'}{\delta'} = D'' \frac{C'' - C_0''}{\delta''} \quad (7)$$

Mivel a határréteg megközelítő mérését tűzhattük csak ki célul és mivel a C diffúziós együtthatója az Fe-ben szintén nem áll rendelkezésünkre nagy pontossággal, a határréteg első megfogalmazását választottuk alapul a további vizsgálatokhoz. Ilyen az értelmezése az irodalomban a nyersvasban beolvadó acélra érvényes határrétegre vonatkozó adatnak is [5].

A 3.2.3 fejezetben bemutatott, átmeneti övezetben felvett C-profilok alapján nyert megközelítő határréteg értékeket a XIV. táblázat foglalja össze.



29. ábra
A határréteg fogalma

Néhány próbán mikroszikkra s módszerrel
mért határréteg vastagsága

XIV. táblázat

A próba jele	A fürdő C-tartalma, %	A fürdőbe merülő próba C-tartalma, %	A határréteg vastagsága, μm
1/22	0,10	0,48	125
1/32	0,10	1,05	150
1/33	0,10	1,05	150
1/34	0,10	1,05	100
2/12	0,48	0,10	75
2/41	0,48	1,60	170
2/44	0,48	1,60	140
3/13	1,05	0,10	70
3/14	1,05	0,10	85
3/22	1,05	0,48	140
3/41	1,05	1,60	100
4/13	1,60	0,10	137 ^x
4/14	1,60	0,10	85
4/21	1,60	0,48	110
4/22	1,60	0,48	60
4/24	1,60	0,48	130
4/31	1,60	1,05	85
1/31 ^{xxx}	0,10	1,05	100

^x 3 mérési adat átlaga

^{xxx} 50 kg-os indukciós kemencében levő fürdőből a ráfagyási
periódusban kivett próba

A vizsgált esetekben és a vázolt körülmények között tehát 60 - 170 μm sávban helyezkednek el a határréteg megközelítő értékei. Ezen belül az olvadás folyamatára legjellemzőbb 3. és 4. próba-pozíciókon mért értékek 70 - 137 μm intervallumban szórnak.

Az 50 kg-os indukciós kemence fürdőjéből a ráfagyási periódusban kiemelt próbán mérhető határréteg a befagyasztott próbákéin mért értékek alsó szintjével egyezik.

A hő- és anyagátadás közti hasonlóság felhasználásával kimunkált dimenzió nélküli számok alkalmazásával a határréteg vastagsága az alábbi összefüggéssel értékelhető ki [2].

$$\delta = l \times (G \times Pr)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{\gamma \cdot \nu \cdot D}{g} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{\Delta \gamma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

ahol:

$$G = \frac{gh}{\nu^2} \cdot \frac{\Delta \gamma}{\gamma}$$

$$Pr = \frac{\nu}{D}$$

$$\gamma = \text{a fürdő sűrűsége, g/cm}^3$$

$$\nu = \text{a fürdő kinematikai viszkozitása, cm}^2/\text{s}$$

$$D = \text{a diffúziós együttható, cm}^2/\text{s}$$

$$g = \text{a nehézségi gyorsulás}$$

$$l = \text{a jellemző hossz a vizsgált próbán, cm}$$

$$\Delta \gamma = \text{a fürdő és az olvadó rúd felületének sűrűségkülönbsége, g/cm}^3$$

Az (5) képlet segítségével kiértékeljük az adott metallurgiai viszonyok között kialakuló határréteg-vastagságot. A számításokhoz a XV. táblázatban összefoglalt adatokat használtuk fel.

G és Pr

A dimenzió nélküli számok alkalmazásával kiértékelt határréteg-vastagságokat a XVI. táblázat tartalmazza.

A mért és a számított határréteg-vastagságoknak a fürdő és a bemerülő próba likvidusz hőmérséklete közti különbséggel összefüggését a 30. ábrán láthatjuk. Az elvégzett regresszió analízis alapján megállapítható, hogy a számított határréteg-vastagságokra jellemző egyenes mintegy 30 μm -nal

A hasonlóság elmélet alapján végzett
határréteg-számításhoz felhasznált adatok

XV. táblázat

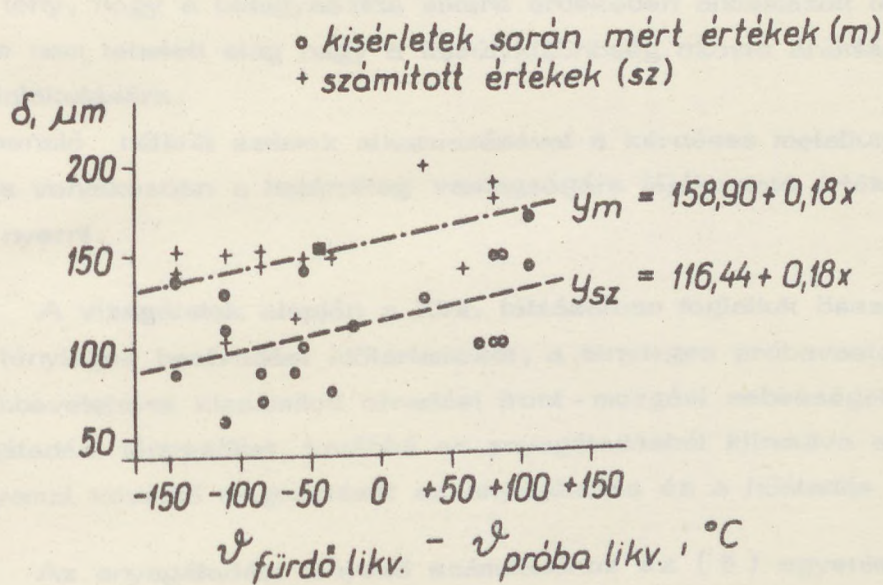
	η^x c P	D^{xx} cm ² /s	$\tau_{o.p.}^{xxx}$ g/cm ³	$\gamma_{1555^\circ C}^{xxx}$ g/cm ³
0,10 % C	5,0	$7,9 \times 10^{-5}$	7,142	7,092
0,48 % C	4,8	$7,6 \times 10^{-5}$	7,042	6,993
1,05 % C	4,5	$7,3 \times 10^{-5}$	6,993	6,901
1,60 % C	4,3	$7,1 \times 10^{-5}$	6,993	6,803

^x [27] alapján
^{xx} [13] alapján
^{xxx} [25] alapján

Néhány számítással nyert határréteg-vastagság

XVI. táblázat

A próba jele	A fürdő C-tartalma, %	A fürdőbe merülő próba C-tartalma, %	A határréteg vastagsága, um
1/22	0,10	0,48	200
1/32	0,10	1,05	179
1/33	0,10	1,05	187
2/12	0,48	0,10	149
3/13	1,05	0,10	144
3/14	1,05	0,10	153
3/22	1,05	0,48	148
3/41	1,05	1,60	138
4/13	1,60	0,10	141
4/14	1,60	0,10	151
4/21	1,60	0,48	107
4/22	1,60	0,48	226
4/24	1,60	0,48	151
4/31	1,60	1,05	113



30. ábra

A mért és számított határréteg-vastagságok összefüggése a fürdő és a próba likvidusz hőmérsékletének különbségével.

magasabban fut, mint a mért értékek egyenese. Mivel a mért és számított értékeknek a legkisebb négyzetek elvén meghatározott regresszió egyenestől szórása a Fisher analízis alapján 95 %-os biztonsággal szignifikáns, azt a kvalitatív megállapítást is tehetjük, hogy mind a számított, mind a mért határréteg-vastagságok a fürdő és a bemező próba likvidusz hőmérsékletének különbségének növekedésével növekvő tendenciát mutatnak; a számított érték kb. 50-30 %-kal nagyobb a mérténél.

A vizsgálat során mutatkozó különbség olyan okra utal, amely minden kísérlet alatt közel azonosan befolyásolta a méréseket. Ilyen ok lehet az a tény, hogy a befagyasztás sikere érdekében alkalmazott tégely belső mérete nem lehetett elég nagy a fajsúlykülönbség okozta áramlás zavartalan kialakulására.

A dimenzió nélküli számok alkalmazásával a kérdéses metallurgiai viszonyokra vonatkozóan a határréteg vastagságára tájékoztató értékeket lehet csak nyerni.

A vizsgálatok alapján a XVII. táblázatban foglaltuk össze az összes és a tényleges beolvadási időtartamokat, a tényleges próbavastagságok figyelembevételével kiszámított olvadási front-mozgási sebességeket, az anyagátadási tényezőket, továbbá az anyagátadásból kiindulva a beolvadási folyamat közelítő megoszlását az anyagátadás és a hőátadás között.

Az anyagátadási tényező számításához az (5) egyenletben szereplő

$$\frac{D}{\delta} = \beta$$

arányt használtuk fel, amely közelítően egyenlő az anyagátadásból adódó beolvadási front mozgásának sebességével, a

$$\left(\frac{dv}{dt} \right)_{\alpha}$$

értékkel [8] [20].

A vizsgált körülmények között 0,186 - 0,366 m/h az anyagátadási tényező.

A beolvadás folyamatára jellemző adatok

XVIII. táblázat

Fürdő próba	Összes beolvadási idő, s	Tényleges beolvadási idő, s	A próba vastagsága, 2v, mm	A beolvadási front mozgási sebessége, $\frac{dv}{dt}$,		A számított anyagátadási tényező, m/h	A beolvadási folyamat közvetítő megoszlási hányada: anyagátadásra hőátadásra %	%
				mm/s	m/h			
1/3	40,0	1,5	6,55	2,19	7,85	0,215	2,7	97,3
2/1	21,0	6,0	7,00	0,58	2,09	0,366	17,6	82,4
2/2	19,5	6,5	7,25	0,58	-	-	-	100,0
2/3	16,0	3,0	7,10	1,18	-	-	-	-
3/1	16,5	6,5	7,10	0,55	1,97	0,337	17,1	82,9
3/2	14,5	5,5	7,55	0,69	2,49	0,187	7,5	92,5
3/3	12,0	3,0	7,05	1,17	-	-	-	100,0
4/1	11,0	3,0	6,55	1,09	3,94	0,186	4,7	95,3
4/2	13,0	5,0	7,00	0,70	2,52	0,268	10,6	89,4
4/2 ϕ	20,5	7,0	16,00	1,14	4,10	0,268	6,5	93,6
4/3	10,0	3,0	7,05	1,18	4,25	0,301	7,1	92,9
1/2 M	16,0	3,5	6,55	0,94	3,40			
1/3 M	15,5	4,0	6,55	0,82	2,92			

A tényleges beolvadási folyamatra jellemző, hogy az anyagátadás csupán 2,7 - 17,6 %-ban kap szerepet a beolvadási front mozgásában. Ez a megállapítás összhangban van Glinkov és munkatársai más számítási módszerrel nyert vizsgálati eredményeivel [7]. A viszonyok tehát alapvetően mások, mint a nagy C-tartalmú nyersvas fürdőben beolvadó acélhulladék esetében, amikor a beolvadás folyamatát az anyagátadás határozza meg elsősorban [8][20].

A különböző metallurgiai körülményekre számítással és becsléssel kimunkált anyagátadási tényezőket vizsgálataink eredményeivel a XVIII. táblázat foglalja össze. A felülről fúvott oxigénes konverter viszonyaira a kisebb karbontartalmú fürdőkre becsült anyagátadási tényező 10 - 20-szorosa a kísérleteink során nyugodt fürdőre kiszámított értékeknek, ami nagyságrendben elképzelhető.

A XVIII. táblázatban szereplő 3,65 m/h anyagátadási tényezőből a felülről fúvott oxigénes konverter viszonyaira és $D = 7,1 - 7,9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ diffúziós együttható-intervallumra

$$\delta = 7,3 - 8,2 \mu\text{m}$$

határréteg-vastagságot nyerünk. A konverter nagy intenzitású fürdőmozgására tehát hozzávetőlegesen egy nagyságrenddel vékonyabb határréteg jellemző, mint saját kísérleteink "nyugodt" fürdőire.

A különböző C-tartalmú acélok beolvadási jelenségeinek vizsgálata során nyert megállapítások a hagyományosan vezetett ivkemence üzem beolvasztási körülményeihez - legalább a 0,25 %-nál kisebb beolvasztási C-intervallumban - magyarázatot adtak. A napjainkban terjedő kisméretű "shredder" hulladék acélfürdőbe történő folyamatos adagolása során végbe-menő olvadásra vonatkozóan még kevesebb megszorítással lehet megállapításainkat alkalmazni.

Külön figyelmet érdemel a terjedőben levő fémesített pellet beolvadási folyamata. Ezt a betétanyag-fajtát hagyományos módon, kosárban rétegesen adagolva nem nyerünk optimális beolvadási teljesítményt [30] [31] [32] [33] [34]. Az ivkemencébe hagyományosan beadagolt hulladékhányad beolvadását követően a különböző módon folyamatosan és megfelelő energiaszinten történő fémesített érc-pellet vagy brikett-bevitel biztosítja a legnagyobb beolvadási teljesítményt.

Néhány, Fe-C fűrdőben olvadó acélra vonatkozó
anyagátadási tényező

XVIII, táblázat

β , m/h	$\vartheta_{olv.}$ °C	$C_{fűrdő}$ %	$C_{próba}$ %	A fűrdő jellege	β értékelési módja	Irodalmi forrás
0,018 - 0,252	1350 - 1500	2,7	0,2	agitált	számított	[6]
0,18	1350	3,2	3,2	agitált	számított	[35]
0,83	1450	2,4	3,2	agitált	számított	[35]
0,08	1260 - 1450	4,0 - 2,2	0,1	agitált	számított	[5]
0,72	1300	4,3 - 4,4	0,1	oxigénés konverter	becsült	[12]
3,44	1650 - 1300	3,2	0	" -	becsült	[20]
3,65	1650 - 1300		0,25	" -	becsült	[29]
0,186 - 0,366	1555	0,10 - ,60	0,10 - 1,05	nyugodt	számított	saját kísérlet

A folyamatosan adagolt fémesített érc-pellet tehát 1550-1560 °C hőmérsékletű acélfürdőbe jut a salakrétegen áthaladás és az elegendő sűrűségrögzítéssel együttjáró átmelegedés után [36]. Közelítő számítás alapján a XIX. táblázatban összefoglalt viszonyok mellett a fémesített pellet salakrétegben tartózkodási idejére 20 s-ot kapunk. Ebből hozzávetőlegesen

$$\frac{dv}{dt} \approx \beta = 0,28 \text{ mm/s} = 1,00 \text{ m/h}$$

az olvadási front mozgási sebessége, illetve az anyagátadási tényező, ha feltételezzük, hogy a salakrétegben tartózkodás ideje közel azonos az acélfürdőbe jutott pellet tényleges olvadási idejével. Ebből a valószínű, közelítő értékű határréteg-vastagság:

$$\delta = \frac{7,9 \times 10^{-5}}{0,28 \times 10^{-1}} \approx 29 \text{ } \mu\text{m}$$

A fémesített pellet összetételéből [34], irodalmi adatokból és saját megfigyeléseinkből következik, hogy a beolvadása során keletkező gázok jelentős fürdőmozgást okoznak. Ennek következtében lényegesen kisebb határréteg-vastagság alakulhat csak ki, mint a "nyugodt" fürdőben olvadó hulladékon. Ezzel nő az anyagátadás mértéke.

Az eddigiek alapján az anyagátadási tényező hozzávetőlegesen úgy aránylik a felülről fúvatott oxigénes konverter, a fémesített érc-pellettel folyamatosan adagolt ivkemence és a "nyugodt" acélfürdő viszonyaira, mint (10) : (3) : (1 - 0,5).

A fémesített érc-pellet folyamatos adagolásakor
az ivkemencében uralkodó metallurgiai viszonyok
jellemző adatai

XIX. táblázat

Salak hőmérséklet:	$\vartheta_s = 1600^{\circ}\text{C}$
Acélfürdő hőmérséklet:	$\vartheta_a = 1555^{\circ}\text{C}$
Az acélfürdő C-tartalma:	$C = 0,10 \%$
A C diffúziós együtthatója:	$D = 7,9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$
A fémesített érc-pellet átlagos sugara:	$r = 0,55 \text{ cm}$
A pellet hőmérséklete a kemencébe adagoláskor:	$\vartheta_{pk} = 20^{\circ}\text{C}$
A pellet megközelítő átlagos hőmérséklete az acélfürdőbe jutáskor:	$\vartheta_{pv} = 1450^{\circ}\text{C}$
A pellet salakban időzése [36]:	$t_{ps} \approx 20 \text{ s}$
A pellet tényleges beolvadási ideje:	$t_{po} \approx 20 \text{ s}$

3.3.5 Az új tudományos eredmények rövid összefoglalója (tézisek)

1. Négy különböző C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékletű acéolvadékbba merített különböző C-tartalmú, 20°C kezdőhőmérsékletű és egyforma méretű acélpróbákra való ráfagyás, valamint a teljes beolvadás időtartamát vizsgáltam. A ráfagyás, illetve a teljes beolvadás időtartama a fürdő, valamint a bemerített próba anyagának likvidusz hőmérséklete között fennálló különbségnek a függvénye. A tapasztalati összefüggést

$$y = \frac{a}{|b - x|^n}$$

alakú egyenlet fejezi ki,

ahol y = az idő,
 x = a hőmérséklet különbség,
 a, b, n = a kísérleti adatokból számítható állandók.

2. A 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú, 1555°C hőmérsékletű olvadékbba merített 20°C hőmérsékletű, 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú acélpróbákra a bemerítés kezdetén ráfagyott rétegvastagságok sorrendje megfelel az ilyen metallurgiai körülményekre eddig még nem alkalmazott Tyihonov-Szamarszkij elv alapján számítógépes programmal kiértékelt ráfagyott rétegvastagságok sorrendjének.

3. Ha az olvadék anyagának likvidusz hőmérséklete jelentősen, például 85°C -szal nagyobb a bemerített acélpróbák anyagáénál, akkor a ráfagyással egyidejűleg olvadás ("előolvadás") is bekövetkezik, a ráfagyott réteg megolvadása után kezdődő tényleges olvadás időszükséglete ennek következtében csökken.

4. 2, 10 és 50 tonnás ivkemencék ötvözetlenül beolvadó adagjainak beolvadási teljesítménye a beolvadási karbontartalommal maximumos görbe szerint változik. A maximális beolvadási teljesítmény 0,5 - 1,0 % között van. A 0,25 %-nál kisebb beolvadási karbontartalomra jellemző kis beolvadási teljesítmény az olvadás mikrofolyamatai során tapasztalt jelenségekkel is magyarázható. Ennek ismeretében az üzemi adagok betétanyagra visszavezethető kis beolvadási teljesítménye kiküszöbölhető.

5. A vizsgált és 0,111 - 0,132 Prandtl-számmal és 80 - 90 Schmidt-számmal is jellemezhető metallurgiai körülmények között mért 70-170 μm határréteg-vastagságok felhasználásával 0,186 - 0,366 m/h anyagátadási tényező értékekhez jutottam. Az anyagátadási tényező tájékoztató értékére fémesített ércpellet 0,10 % C-tartalmú olvadékban végbemenő beolvadása esetén 1 m/h-t számoltam ki.

6. Az acélok beolvadási folyamatában a vizsgált körülmények között az anyagátadás minden esetben 20 %-nál kisebb részesedését állapítottam meg, a beolvadás sebességét tehát elsősorban a hőátadás határozta meg.

- [6] Gindoff, H. A., Fricke, K. Z. für Angewandte Physik (1970) 249. o.
- [7] Gindoff, H. A., Fricke, K. Z. für Angewandte Physik (1972) 62. o.
- [8] Kapusztovskiy, A. I. Vopr. Khim. i Fiz. (1965) 7. sz. 12. o.
- [9] Friedrich, H. A., Jans, H. Z. für Angewandte Physik (1970) 199. o.
- [10] Tyshkov, A. N. Z. für Angewandte Physik (1970) 200. o.
- [11] Chung, Y. K. Z. für Angewandte Physik (1971) 1201. o.
- [12] Aoki, Shigeo Z. für Angewandte Physik (1971) 127. o.
- [13] Elliot, J. H., Gleizer, M. Z. für Angewandte Physik (1963) 705. o.
- [14] Shaw, C. R. Z. für Angewandte Physik (1965) 104. o.
- [15] Boudewijn, C. Z. für Angewandte Physik (1963) 705. o.
- [16] El Gharbi, E. Z. für Angewandte Physik (1971) 127. o.
- [17] Lebedev, V. G. Z. für Angewandte Physik (1963) 705. o.
- [18] Frank-Kamenetskii, A. A. Z. für Angewandte Physik (1967) 104. o.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Brückner, R.: Kolloid - Zeitschrift, 222 (1968) 39. o.
- [2] Bungardt, K., Wiebking, K., Brandis, H. és Schmalzried, H.: DEW-Technische Berichte, 9 (1969) 407. o.
- [3] Dahlke, O. és Knacke, O.: Archiv für das Eisenhüttenwesen, 26 (1955) 373. o.
- [4] Vertman, A.A. és Samarin, A.M.: Izv. Akademii Nauk SzSzsZR, Metallü (1965) 46. o.
- [5] Pehlke, R.D., Goodell, P.D. és Dunlap, R.W.: Transactions of The Metallurgical Society of AIME, 233 (1965) 1420. o.
- [6] Glinkov, M.A., Filimonov, Ju.P. és Jurevics, V.V.: Stal' (1970) 599. o.
- [7] Glinkov, G.M., Bakszt, V.Ja., Medzsibozsezkij, M.Ja. és Szelszkij, V.I.: Izv. Vüzsich Ucsebnüch Zav. Csornaja Metallurgia, (1972) 62. o.
- [8] Kapusztyn, E.A.: Izv. Vüzsich Ucsebnüch Zav. Csornaja Metallurgia, (1965) 7. sz. 32. o.
- [9] Friedrichs, H.A., Jauer, H. és Knacke, O.: Zeitschrift für Metallkunde, 63 (1972) 169. o.
- [10] Tyihonov, A.N. és Szamarszkij, A.A.: A matematikai fizika differenciálegyenletei, Akadémiai Kiadó, Budapest (1956) 280. o.
- [11] Chuang, Y.K. és Szekely, J.: Int. J. Heat and Mass Transfer, 14 (1971) 1281. o.
- [12] Asai, Shigeo és Muchi, Iwao: Transactions of ISIJ, 11 (1971) 107. o.
- [13] Elliott, J.F., Gleiser, M. és Ramakrishna, V.: Thermochemistry for steel-making. Vol. 11 (1963) 709. o.
- [14] Sims, C.E.: Electric furnace steelmaking, Interscience Publishers, New-York-London, (1963)
- [15] Ilshner, B.: Zeitschrift für Metallkunde, 57 (1966) 194. o
- [16] Bodsworth, C.: Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture, Longmans (1963)
- [17] El Gammal, T.: Kinetik metallurgischer Vorgänge bei der Stahlherstellung, Verlag Stahleisen, Düsseldorf (1972) 91. o.
- [18] Levics, V.G.: Fiziko-chemicseszakaja gidrodinamika. Akad. Nauk, SzSzsZR Moszkva (1952)
- [19] Frank-Kameneckij, D.A.: Anyag- és hőátadás a kémiai kinetikában, Moszkva (1947)

- [20] Szekely, J. és Themelis, N.I.: Rate phenomena in process metallurgy. Wiley-Interscience, (1971) 455. o.
- [21] Brückner, R.: Kinetik metallurgischer Vorgänge bei der Stahlherstellung, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, (1972) 482. o.
- [22] Vorsatz, B., Répási, G., Horváth, A. és Szabó I. bejelentett magyar, osztrák és német találmánya (KFKI-DV-szabadalom).
- [23] Uhlitzsh, H.: Neue Hütte 4 (1959) 284. o.
- [24] Kelley, K. K.: Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy, U.S. Bureau of Mines Bull., 584. sz.
- [25] Benedicks, C., Ericsson, N. és Ericson, G.: Archiv für das Eisenhüttenwesen 3 (1930) 473. o.
- [26] Szőke, L.: Elektroacélmű teljesítményének növelése. 3-2-325/1973 VASKUT kutatási jelentés (1973)
- [27] Vielstich, W.: Zeitschrift für Elektrochemie, 57 (1953) 646. o.
- [28] Kawai, Y.: Proceedings ICSTIS, 11 (1971) 387. o.
- [29] Szekely, J., Chuang, Y.K. és Hlinka, J.W.: Metallurgical Transactions 3 (1972) 1972. o.
- [30] Bonar, L. G. és munkatársai: Electric Furnace Proceedings, (1969) 126. o.
- [31] Gordon, J. P.: Az IISI Harmadik Konferenciája. (1969) Tokio.
- [32] Sibakin, J. G., Hookings, P. H. és Roeder, G. A.: Journal of the Iron and Steel Institute, 205 (1967) 1005. o.
- [33] Antoine, J. és munkatársai: La Metallurgie 101 (1969) 267. o.
- [34] Szőke, L.: Kohászat, 106 (1973) 6. o.
- [35] Baptizmanskij, V. I., Goldfarb, E. M. és Sersztov, B. I.: Izv. VUZ. Csernaja Metallurgia, (1972) 10. sz. 48. o.
- [36] Elliott, J. F.: Proceedings ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ. 11 (1971) 434. o.
- [37] Gárdonyi, S.: Számítógépes program a ráfagyás problémájára, MVAE nem publikált anyaga.
- [38] Ling Yang és Derge, G.: Physical chemistry of process metallurgy 1 r. (1961) 503.o.

1. Függelék

Metallurgiai folyamatok dimenzió nélküli kifejezései
[18] [19] [20]

Kifejezés	Összefüggés	Szereplő tényezők	Jellemzett mennyiségek	Alkalmazási terület
Folyadék dinamika				
Reynolds-szám Re	$\frac{l v \rho}{\mu}$	l = a rendszerre jellemző hossz v = a folyadék mozgási sebessége ρ = a folyadék sűrűsége μ = a folyadék viszkozitása	$\frac{\text{inercia-erő}}{\text{viszkózus-erő}}$	folyadék áramlás
Hőátadás				
Biot-szám, Bi Prandtl-szám Pr	$\frac{\alpha r_k}{\lambda}$ $\frac{c_p \mu}{\lambda}$	α = a konvektív hőátadási tényező r_k = a mag és felszín közti távolság λ = hővezetőképesség c_p = a fűrdő fajhője	$\frac{\text{belső ellenállás}}{\text{felületi rétegelállás}}$ $\frac{\text{momentum-diffúzió}}{\text{hődiffúzió}}$	változó hőmérséklet mezejű hőáramlás szabad és mesterséges áramlás
Anyagátadás				
Grashof-szám, Gr	$\frac{g \rho^2 l^3 \beta' \Delta x}{\mu^2}$	β' = a koncentráció sűrűségváltozási együtthatója = $\frac{1}{\rho} \left(- \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \rho$	$Re \left(\frac{\text{felhajtó-erő}}{\text{viszkózus erő}} \right)$	szabad áramlás
Schmidt-szám, Sc	$\frac{\mu}{\rho \cdot D_{A-B}}$	Δx = koncentráció hajtóerő D_{A-B} = A alkotós tényező B alkotóban	$\frac{\text{momentum-diffúzió}}{\text{molekuláris diffúzió}}$	szabad és mesterséges áramlás
Sherwood-szám, Sh	$\frac{\beta l}{D_{A-B}}$	β = anyagátadási tényező l = jellemző hossz	$\frac{\text{összes anyagátadás}}{\text{molekuláris diffúzió}}$	

A ráfagyás problémájának matematikai megfogalmazása

Vizsgáljunk egy folyadékkal töltött félteret, amelynek a hőmérséklete $t = 0$ időben $\vartheta_2(x, 0) = \vartheta_2 = \text{állandó}$ /1. ábra/. Tegyük fel, hogy a félter határfelületének hőmérsékletét $\vartheta_1(0, t) = \vartheta_1$ -re csökkentjük és ezen az értéken tartjuk. Ha $\vartheta_1 <$ mint a folyékony fázis olvadáspontja, akkor kristályosodás indul meg, azaz elkezdődik a kristályos fázis kialakulása.[37] A folyékony-szilárd fázishatárnak az időben való mozgását írja le az

$$x = \xi(t) \quad (1)$$

függvény. A féltér határa és a fázis határ között lévő térben a folyadék már megdermedt. Hőmérséklet eloszlásáról a $\vartheta_1(x, t)$ függvény tájékoztat. Ezzel szemben a folyékony fázisban, hol $x > \xi$, a hőmérséklet viszonyokat a $\vartheta_2(x, t)$ függvény írja le. Itt természetesen a hőmérséklet az olvadáspontot meghaladja. Hogy a számítások egyszerűbbek legyenek, az olvadáspontot 0-val tesszük egyenlővé. Ezáltal ϑ_1 -re és $\vartheta_1(x, t)$ -re negatív értékek adódnak.

Természetesen mind a szilárd, mind a folyékony fázisban érvényes a hővezetési egyenlet a_1^2 és a_2^2 hőmérsékletvezetési számokkal. Ezen túlmenően a fázishatárra igaz, hogy

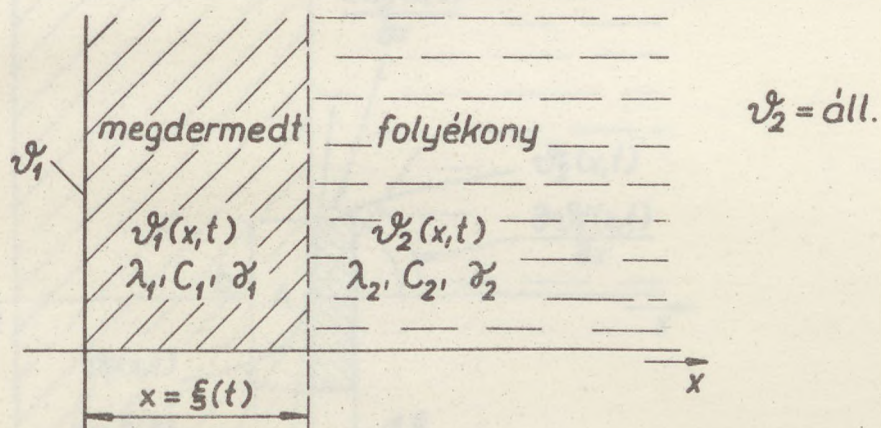
$$\vartheta_1(\xi, t) = \vartheta_2(\xi, t)$$

Rögzítsünk t időben a fázishatáron egy A pontot, amely köré egységnyi felületet vonunk /2. ábra/. Ehhez a t időpontot követő időegységben a folyékony fázisból a hővezetés

$$Q_2' = - \lambda_2 \left. \frac{\partial \vartheta_2(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\xi(t)} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad (2)$$

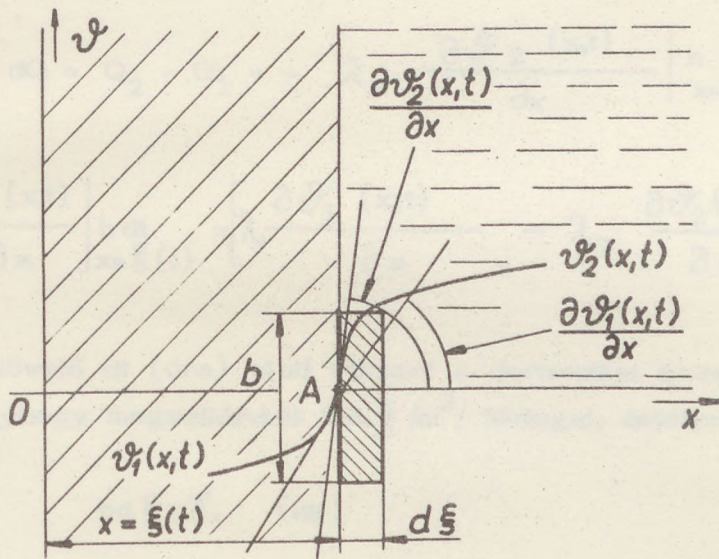
hőenergiát szállít. Ha a felület nagysága: 1.b.(m^2) és nem 1, hanem dt óráról van szó, az odajutott hőenergia:

$$Q_2 = - \lambda_2 \left. \frac{\partial \vartheta_2(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\xi(t)} dt \quad \text{kcal} \quad (3)$$



1. ábra

Folyadékkal töltött féltér jellemzése.



2. ábra

A pont köré vont megdermedő felületre vonatkozó
hóáramlás jellemzői.

Teljesen hasonlóan az A pontot körülvevő egységnyi területről a szilárd fázisban a hővezetés (1 m^2 felületen 1 óra alatt)

$$Q_1' = - \lambda_1 \left. \frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\xi(t)} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{ h}} \quad (4)$$

hőenergiát szállít el. Ugyanez $1.b \text{ (m}^2\text{)} felületre és dt (óra) időre:$

$$Q_1 = - \lambda_1 \left. \frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\xi(t)} \cdot 1.b \cdot dt \quad \text{kcal} \quad (5)$$

A kettő különbsége:

$$\begin{aligned} dQ = Q_2 - Q_1 = & - \lambda_2 \left. \frac{\partial \vartheta_2(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\xi(t)} \cdot b \cdot dt + \\ & + \lambda_1 \left. \frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\xi(t)} \cdot b \cdot dt = \left[\lambda_1 \frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2(x,t)}{\partial x} \right]_{x=\xi(t)} b \cdot dt \quad (6) \end{aligned}$$

A t időt követő dt (óra) alatt viszont a dermedési front $d\xi$ -vel jutott tovább, úgyhogy megszilárdult $b \cdot d\xi \text{ /m}^3\text{ /}$ térfogat, amelynek súlya:

$$b \cdot d\xi \cdot \gamma \quad (\text{kg})$$

Legyen $k \text{ /kcal/kg/}$ a kristályosodási hő. Ezzel a megszilárdulásakor fel-
emésztődött

$$b \cdot d\xi \cdot \gamma \cdot k \quad \text{kcal.}$$

Igy végső soron írható, hogy

$$\left[\lambda_1 \frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2(x,t)}{\partial x} \right]_{x=\xi(t)} b \cdot dt = b \cdot \gamma \cdot k \cdot d\xi, \quad (7)$$

ahonnan a megdermedési front mozgására a

$$\left[\lambda_1 \frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2(x,t)}{\partial x} \right]_{x=\xi(t)} = \sigma_k \frac{d\xi(t)}{dt} \quad (8)$$

differentiálegyenlet adódik.

Végző soron a következı peremérték feladatot kell megoldani:

$$\frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 \vartheta_1(x,t)}{\partial x^2} \quad (0 < x < \xi) \quad (a)$$

$$\frac{\partial \vartheta_2(x,t)}{\partial t} = a_2^2 \frac{\partial^2 \vartheta_2(x,t)}{\partial x^2} \quad (x > \xi) \quad (b)$$

kezdeti feltétel $\vartheta_2(x,0) = \vartheta_2 \quad (x \geq 0) \quad (c)$

peremfeltétel a féltér hatására $\vartheta_1(0,t) = \vartheta_1 \quad (d)$

peremfeltétel a dermedési fronton $\vartheta_1(x,t) - \vartheta_2(x,t) = 0 \quad \Big|_{x=\xi(t)} \quad (e)$

a dermedési front mozgását leíró diff.e. $\left[\lambda_1 \frac{\partial \vartheta_1(x,t)}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial \vartheta_2(x,t)}{\partial x} \right]_{x=\xi(t)} = k \sigma \frac{d\xi(t)}{dt} \quad (f)$

Fenti a és b differentiál egyenleteket a c kezdeti feltétellel, d és e peremfeltételekkel, továbbá f határ feltétellel - mely a dermedési front mozgását írja le - kell megoldani.

A differentiál egyenletek megoldása a részletes matematikai analízis mellő-

zésével az alábbi transzcendens egyenlet megoldására redukálódik:

$$\frac{\lambda_1 \vartheta_1 e^{-\frac{\alpha^2}{4a_1^2}}}{a_1 \phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} + \frac{\lambda_2 \vartheta_2 e^{-\frac{\alpha^2}{4a_2^2}}}{a_2 \left[1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)\right]} = -\frac{\sqrt{\pi}}{2} k \vartheta \alpha \quad (9)$$

Ha ennek a transzcendens egyenletnek pozitív gyökét megkerestük, akkor a dermedési front mozgását leíró egyenlet

$$\xi = \alpha \sqrt{t} \quad (10)$$

alakba hozható, az egyes félterek hőmérséklet-függvényei pedig:

$$\begin{aligned} \vartheta_1(x, t) &= A_1 \left[\phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right) - \phi(\delta_1) \right] = -\frac{\vartheta_1}{\phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} \left[\phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right) - \phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right) \right] = \\ &= \frac{\vartheta_1}{\phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} \left[\phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right) - \phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right) \right] \quad (0 \leq x \leq \xi) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_2(x, t) &= A_2 \left[\phi\left(\frac{x}{2a_2\sqrt{t}}\right) - \phi(\delta_2) \right] = \frac{\vartheta_2}{1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)} \left[\phi\left(\frac{x}{2a_2\sqrt{t}}\right) - \phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right) \right] \\ &\quad (x \geq \xi) \end{aligned} \quad (12)$$

alakban állíthatók elő, ahol

$$A_1 = -\frac{\vartheta_1}{\phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} \quad (13)$$

$$A_2 = \frac{\vartheta_2}{1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)} \quad (14)$$

$$\delta_1 = \frac{\alpha}{2a_1} \quad (15)$$

$$\delta_2 = \frac{\alpha}{2a_2} \quad (16)$$

ahol $\phi = \text{erf}$

Az adott logikai diagrammal oldottuk meg a transzcendens egyenletet.

A (9) egyenletet nullára redukáltuk és a nullára redukált egyenlet baloldalát B-vel jelöltük:

$$B = \frac{\lambda_1 \vartheta_1 e^{-\frac{\alpha^2}{4a_1^2}}}{a_1 \phi\left(\frac{\alpha}{2a_1}\right)} + \frac{\lambda_2 \vartheta_2 e^{-\frac{\alpha^2}{4a_2^2}}}{a_2 \left(1 - \phi\left(\frac{\alpha}{2a_2}\right)\right)} + \frac{\sqrt{\pi}}{2} k \vartheta \alpha \quad (17)$$

A logikai diagram az alábbi lépésekből tevődik össze (6. ábra)

1./ Az adatok beolvasása.

A szükséges adatok:

1/ ϑ_1 ,

5/ λ_2 ,

2/ ϑ_2 ,

6/ k_1 ,

3/ ϑ_1 (likvidusz hőmérséklet)

7/ C_1 ,

4/ λ_1 ,

8/ C_2 ,

$$9/ \quad \gamma_1,$$

$$10/ \quad \gamma_2,$$

A számításához szükséges adatok és együtthatók kiszámítása.

Tudjuk, hogy egyszerűbb formulák generálása céljából a hőmérsékletskála nullpontját a likvidus hőmérséklettel tettük egyenlővé. Ezért ϑ_1 és ϑ_2 átalakítandó:

$$\vartheta_1 = \vartheta_1 - \vartheta_1, \quad (18)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_2 - \vartheta_1, \quad (19)$$

Ezenkívül kiszámítandó még a két fázis hőmérsékletvezetési száma és a közepes fajsúly is:

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \vartheta_1}, \quad (20)$$

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \vartheta_2}, \quad (21)$$

$$\gamma = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \quad (22)$$

2./ α kezdő értékének beállítása. α kezdő értékét a következőképpen adjuk meg:

$$A = \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (23)$$

Megjegyzés: az egyenlet gyökére adott kezdő értéket az A változóban (rekeszben) helyeztük el.

3./ Az egyenlet baloldalának (B-nek) kiszámítása.

A-val kiszámítjuk az egyenlet baloldalát. A baloldal konkrét értéke most B rekeszben van.

4./ Megvizsgáljuk a $B < 0$ reláció teljesülését.

Itt most két eset lehetséges.

Első eset: A $B < 0$ reláció nem teljesül. Ekkor A értékét megfelezzük:

$$A := \frac{A}{2}, \text{ és ezzel az új A-val újra kiszámítjuk az egyenlet}$$

baloldalát.

Második eset: $A B < 0$ reláció teljesül. Ebben az esetben A értékét elrakjuk az A_{10} változóban: $A_{10} := 10$.

5./ Az értékét egy századdal megnöveljük. $A := 1,01A$.

6./ A -nak ezzel az új értékével kiszámítjuk az egyenlet baloldalát.

7./ Megvizsgáljuk a $B > 0$ reláció teljesülését. A következő két lehetőség adódhat.

Első eset: $A B > 0$ reláció nem teljesül. Ekkor A értékét újra megnöveljük egy századdal: $A := 1,01A$ és A új értékével ismét kiszámítjuk az egyenlet baloldalát.

Második eset: $A B > 0$ reláció teljesül. Ez esetben A értékét elrakjuk az A_{11} -es változóban: $A_{11} := A$

8./ A közelítő gyök kinyomtatása. A részletezett eljárással a transzcendens egyenlet gyökére az alábbi közelítés adható:

$$A := \frac{A_{10} + A_{11}}{2} \quad (24)$$

A gyököt magában foglaló egy intervallum nagysága:

$$M = |A_{11} - A_{10}| \quad (25)$$

Célszerű a közelítő gyök és a hozzá tartozó ϕ_1 és ϕ_2 függvények kinyomtatása is.

9./ Megvizsgáljuk az $M < \epsilon$ reláció teljesülését.

Lehetséges esetek.

Első eset. A reláció teljesül. A programnak ezzel vége van.

Második eset. A reláció nem igaz. Ekkor áttérünk a következő utasításra.

10./ A transzcendens egyenlet baloldalának kiszámítása a közelítő gyökkel.

11./ Megvizsgáljuk a $B < O$ reláció teljesülését.

Első eset. A reláció nem igaz. Ezt a szituációt a 3. ábrán illusztráljuk. Ekkor az A11 változó értékét kicseréljük a közelítő gyök értékével: A11: = A és visszatérünk a 8-as blokk végrehajtására.

Második eset. A reláció igaz. A viszonyokat a 4. ábrával szemléltetjük. Most azt tesszük, hogy az A10 változó értékét cseréljük ki a gyök közelítő értékével: A10: = A és visszatérünk a 8-as blokk végrehajtására.

Az eljárás lényege az alábbiakban foglalható össze:

1./ Keresünk A részére olyan intervallumot, amelynek baloldali végpontjában: A10-ben az egyenlet baloldala: $B < O$, jobboldali végpontjában: A11-ben $B > O$.

2./ A gyök közelítésére az intervallum felezést használjuk.

3./ A számítást befejezzük, ha az $[A10, A11]$ intervallum abszolút értéke kisebb, mint ϵ .

A következőkben a transzcendens egyenlet megoldására adott logikai diagram alapján Elliott AUTOKÓD nyelven írt programot ismertetjük:

A programot az 5. ábra mutatja be.

A program három szubrutinból áll:

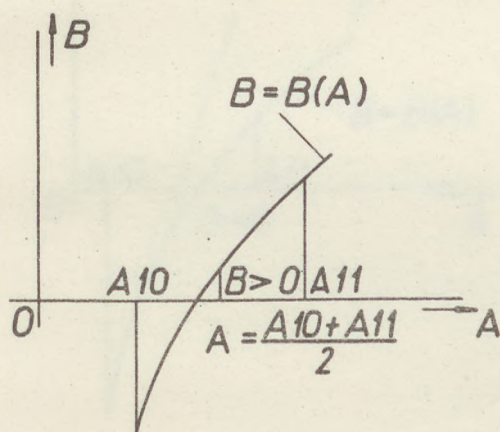
A 10-es szubrutin beolvassa az adatokat és egyéb adminisztrációs teendőket végez.

A 13-as szubrutin a gyök kezdő értékét adja meg és végrehajtja az intervallum felezési eljárást. Közben igénybeveszi a

11-es szubrutint, amely az egyenlet baloldalát számítja ki. Ez viszont aktivizálja az

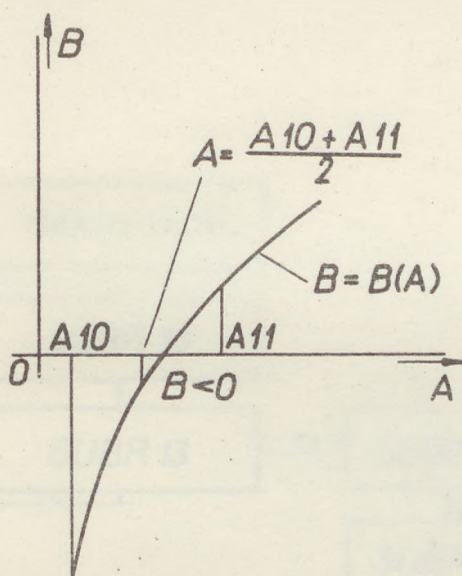
1-es szubrutint, amely az erf. függvény kiszámítására íródott (gépi kódban).

A transzcendens egyenlet logikai megoldását a 6. ábra mutatja.



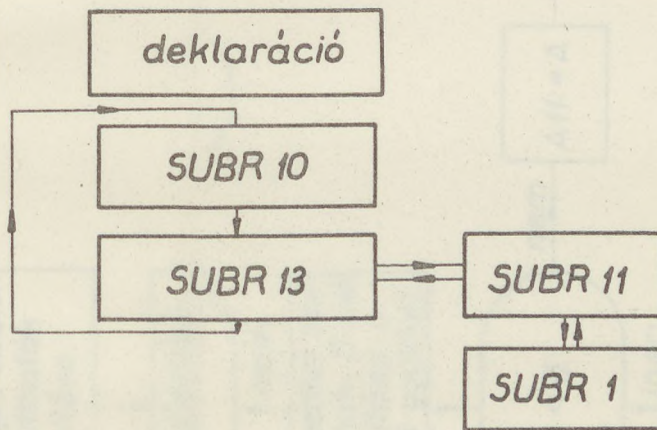
3. ábra

A $B < 0$ reláció teljesülésének vizsgálata
(A reláció nem igaz)



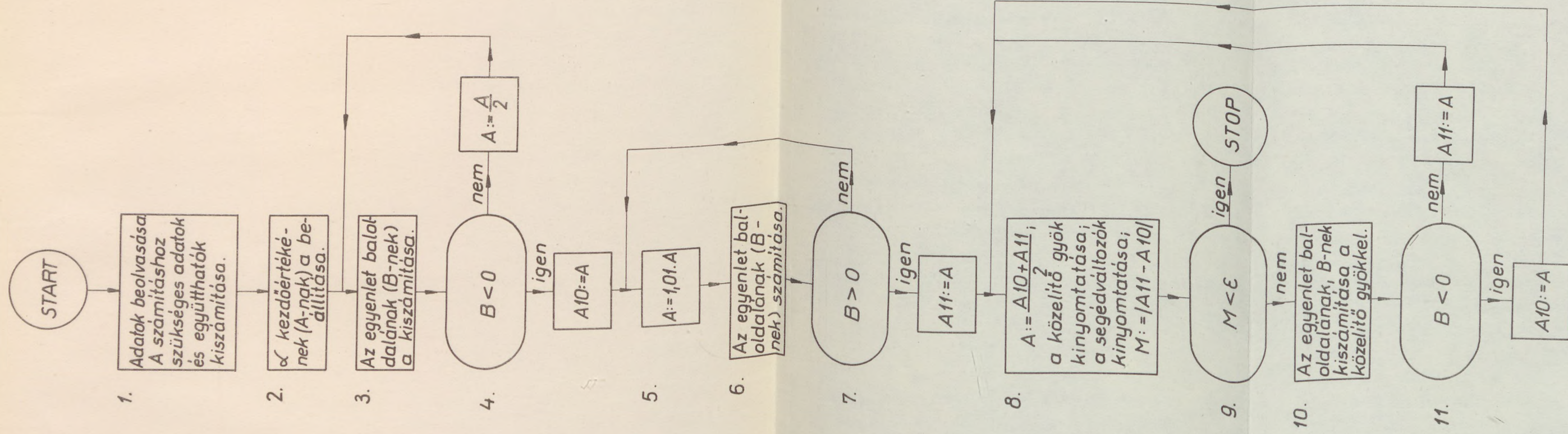
4. ábra

$A \ B < 0$ reláció teljesülésének vizsgálata
(A reláció igaz)



5. ábra

Az Elliott AUTOKÓD nyelven írt program.



D/6304

KANDIDÁTUSI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**A KÜLÖNBÖZŐ KARBONTARTALMU ACÉLOK
BEOLVADÁSA KÖZBEN LEJÁTSZÓDÓ NÉHÁNY
FOLYAMAT VIZSGÁLATA**

Írta:

SZŐKE LÁSZLÓ

MAGYAR
TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
KÖNYVTÁRA

BUDAPEST

1974

I.

A kitűzött kutatási feladat rövid összefoglalása és tudományos előzményei

Az acélgyártás termelékenységének javítása a XX. század második felében a metallurgusok egyik főfeladatává vált. A beolvasztást követő metallurgiai folyamatok mélyreható elemzése és értelmezése segítségével új technológiai eljárásokat dolgoztak ki, melyekkel nagymértékben csökkentették az adagidőt, növelték az acélgyártás termelékenységét.

A vázolt fejlődés során a betétként szilárd acélhulladékot felhasználó acélgyártó eljárások egyes technológiai fázisainak időigénye úgy módosul, hogy a beolvasztás periódusa egyre nagyobb hányada a teljes adagidőnek. Ez arra ösztönzi az acélgyártókat és a kutatókat, hogy az olvadásnak korábban kevésbé vizsgált törvényeit részletesebben felderítsék és ezúton rövidítsék az acélgyártásnak ezt az el nem kerülhető periódusát, a teljesítmény növelése céljából.

Az acél olvadásának eddig többnyire azt a változót vizsgálták, amelyet lágy acélhulladéknak nagy karbon-tartalmú olvadékban való beolvadása valósít meg. Ilyen beolvadási folyamat zajlik le az SM-kemencében a nyersvasbeöntést követően vagy az oxigénes konverterben a fuvatás első szakaszában, illetve a folyékony nyersvasat is alkalmazó ivkemence-gyakorlatban.

Az acélgyártás körülményei azonban sokkal változatosabbak. Kisebb-nagyobb C-tartalmú szilárd hulladék különböző összetételű, a nyersvasnál kisebb C-tar-

talmú olvadékba merülhet és abban olvad meg. Ilyen folyamat az ivkemencés technológiában a kétkosaras adagolási módszer esetében a már legalább részben, vagy egészben megolvadt fürdőbe bevitt második kosár tartalmának beolvadása, az ivkemence acélfürdőjébe folyamatosan bevitt apró (shredder, vagy - 2" -) hulladék vagy fémesített ércpellet, illetve brikett beolvadása, továbbá a hagyományos ivkemence-technológia beolvasztási folyamata során az elektródák alatt keletkezett acélfürdőbe bebukó acélhulladék beolvadása is.

A gyakorlatban az acél beolvadásának folyamata nem egyszerűsíthető le a lágy acélnak nyersvasban való beolvadására, amint azt a folyamat legtöbb kutatója tette. Ezért a kísérleteim céljából annak vizsgálatát tűztem ki, hogy milyen jelenségek előzik meg és kísérik különböző C-tartalmú szilárd acéldarabnak ugyancsak különböző összetételű olvadékban való megolvadását. Kísérleteimet úgy terveztem meg, hogy ezek eredményeiből lehetőleg a gyakorlatban is hasznos következtetéseket sikerüljön levonnom.

Az acélolvadása fenomenológiai hasonlóságot mutat vízben, vagy organikus oldószerben oldható kristályos anyagok oldódásával. Erre vonatkozóan Bruckner végzett modell-kísérleteket víznél nagyobb és kisebb sűrűségű anyagok oldódásával kapcsolatban.

Az acél olvadásának problémáival foglalkozó tudományos előzményt két csoportba oszthatjuk.

Az egyik csoport az olvadás mikrofolyamatait kutatta. Dahlke, O. és Knacke, O. vizsgálódásának célja annak igazolása volt, hogy Nernstnek az oldódásra vonatkozó tétele szilárd karbonnak folyékony vasban való oldódására is érvényes.

Vertman, A. A. és Samarin, A. M. különböző hőmérsékletű vASFürdőben tanulmányozta a karbon-oldódás kinetikáját.

Pehlke, R. D., Goodell, P. D. és Dunlap, R. W., valamint Glinkov, M. A., Filimonov, Ju. P. és Jurevics, V. V. 2,7 %-nál nagyobb karbontartalmú, különböző, maximálisan 1455, illetve 1500°C hőmérsékletű fürdőkben vizsgálták a lágyacél beolvadásának körülményeit, általában mozgó fürdő viszonyaira.

Glinkov, G. M., Bakszt, V. Ja., Medzsibozsszkij, M. Ja. és Szelszkij, V. I. - kutatásunkkal egyidőben - végzett kísérletsorozatot az acélhulladék olvadáspontjánál nagyobb, 1450-1690°C hőmérsékletű fürdőben az acél olvadás-kinetikájának megismerése céljából.

Bungardt, K. és munkatársai molibdén és wolfram vasfürdőben való beolvadását tanulmányozta.

Friedrichs, H. A. és munkatársai egyszerű geometriájú jégkristályok vízben olvadását követték nyomon és állítottak fel viszonylag egyszerű matematikai összefüggéseket az olvadás folyamatára.

Az acélhulladék különböző C-tartalmú fürdőben olvadásának értelmezésében is fontos szerepet játszható fogalmát többek között Frank-Kameneckij, D. A., Elliott, J. F., Glinkov, G. M. és munkatársai, Sims, C. E., Ilchner, B., El Gammal, T. és Bodsworth, C. értelmezték és alkalmazták.

Az acél beolvadásakor fellépő folyadékáramlás, hőáramlás és anyagátadás folyamatainak analógiájára épített és a hidrodinamikában elterjedt dimenzió nélküli kifejezéseket többek között Frank-Kameneckij, D. A., Levics, V. G., Sims, C. E., Elliott, J. F., Bungardt, K. és munkatársai, Szekely, J. és Themelis, N. J. használták fel metallurgiai számítások egyszerűsítésére.

A vonatkozó irodalom másik csoportja az ipari méretű kemencékben lefolyó beolvadás problémakörét vizsgálja, az acél beolvadására kísérlet meg matematikai törvényszerűségeket felállítani.

Tyihonov, A. M. és Szamarszkij, A. A. - az acél beolvadásának első szakaszában is bekövetkező - fagyás frontjának mozgását irták le matematikai összefüggések segítségével.

Chuang, Y. K. és Szekely, J. a kis karbontartalmú acélhulladék oxigénos konverter vas-karbon fürdőiben való beolvadására állított fel számítógépes programot. Asai, S. és Muchi, I. hasonlóképpen oxigénos konverter viszonyaira vonatkozóan állított fel matematikai modellt a hulladék beolvadására.

Kapusztyin, E. A. tanulmánya folyékony nyersvas-acélhulladék eljárásra, a nyersvasbeöntés után lefolyó beolvadás körülményeinek tisztázására vonatkozik.

Elliott, J. F. a fémesített ércpellet ivkemencébe, folyamatosan adagolása során salakban való felmelegedésére dolgozott ki matematikai összefüggéseket.

II.

A lefolytatott vizsgálatok, kísérletek módszere

Az oldószernél nagyobb fajsúlyú oldott anyag oldódása során létrejövő áramlást vizsgáltam meg kristályos KMnO_4 -ból sajtolt hengerek 20°C hőmérsékletű vízben végbemenő oldódásával kapcsolatban.

A különböző karbontartamú acélok különböző karbon-tartalmú acélfürdőben való beolvadásának tanulmányozását 0,10%, 0,48%, 1,05% és 1,60% C-tartalmú ötvöztelen acél-adagok olvadékában, illetve próbákon, két kísérlet-csoportban hajtottam végre. Az egyik kísérlet-csoport keretében 50 kg-os középfrekvenciás indukciós kemencében fenti karbontartalmú, 1555°C hőmérsékletű olvadékba 0,10%, 0,48% és 1,05% C-tartalmú acélból kialakított $100 \times 20 \times 7$ mm és 100×16 mm $\varnothing$ próbákat merítve különböző bemerítési idő elteltével kiemeltem az olvadékból, majd lehűtés után a próbák súlyváltozását mérve dolgoztam ki a 0,10, 0,48, 1,05 és 1,60% C-tartalmú olvadékban olvadó 0,10, 0,48 és 1,05% C-tartalmú acél súlyváltozás-idő diagramjait.

A másik kísérlet-csoportban Tammann-kemencében, 18 mm belső átmérőjű tégelyben olvasztottam meg rendre a 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú ötvözetlen acélok azonos mennyiségeit, majd az $1550 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű olvadékokba 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú 6 mm $\varnothing$ rudat merítettem be. A beolvadás megindulása után a tégelyt az olvadékba merített acélruddal együtt - annak tégelyhez viszonyított helyzetének rögzítésével - kiemeltem a kemencéből és szabad levegőn hűtöttem le a rendszert. A tégelyben megmerevedett hajdani olvadékot a benne olvadásnak indult ruddal együtt azonos magasságú pogácsákká szeltem fel a határréteg metallográfiai, tömegspektrométeres, mikroszondás és mikroszikkra karbon-elégetéses módszerekkel történő mérése céljából.

A szekunder szövet tagoltsága miatt a metallográfiai és a mikroszondás, a próba előkészítés bonyolultsága miatt pedig a tömegspektrométeres vizsgálatot el kellett vetnem. A mikroszikkra karbonelégető módszerrel jól érzékelhető karbonprofilhoz jutottam, melynek alapján a határréteget meg lehetett mérni.

A hő- és anyagátadás közti hasonlóság felhasználásával kimunkált dimenzió nélküli számok - a Grashoff-szám és a Prandtl-szám - segítségével kiértékeltem a határréteg vastagságát is a vizsgált metallurgiai körülményekre vonatkozóan.

A beolvadás első periódusának, a "nyugodt" fürdő viszonyai között mindig tapasztalt ráfagyási periódusnak jelenségeit az első kísérlet-csoport néhány próbáján külön is vizsgáltam metallográfiai módszerekkel.

A ráfagyási periódus kezdeti szakaszaira vonatkozóan alkalmaztam a Tyihonov-Szamarszkij-féle matematikai megfogalmazásra alapított számítógépes programot. A különböző karbontartalmú fürdőbe beme-

rülő környezet hőmérsékletű, valamint 300 és 700°C-ra előmelegített acélra a fürdőbe merítés első másodpercekor ráfagyott kéregvastagságokat számítottam ki a program alapján.

2, 10 és 50 t-s üzemi ivkemencék 450 adagjának adatait számítógéppel dolgoztam fel a beolvadási C-tartalom és a beolvasztási teljesítmény összefüggésének felmérésére. A nyert diagramokat összefüggésbe hoztam a beolvadási vizsgálataink során nyert megállapításokkal.

A határréteg vastagságának és a karbon különböző karbontartalmú vas-karbon fürdőben érvényes diffúziós együtthatójának ismeretében kiértékeltem az egyes vizsgált esetekre érvényes anyagátadási tényezőt.

A beolvadási vizsgálat-sorozatok adataiból kiszámított olvadási front mozgási sebességek és az anyagátadási tényezővel közelítően egyenlő anyagátadásból adódó olvadási front mozgási sebességek felhasználásával megállapítottam, hogy a beolvadás folyamatában a vizsgált körülmények között az anyagátadás hozzávetőlegesen milyen szerepet játszott.

Irodalmi adatokra támaszkodva kiértékeltem az ivkemencébe folyamatosan adagolt fémesített ércpelle-ten, illetve a felülről fúvott oxigénes konverterbe adagolt lágyacél hulladékon kialakuló határréteg-vastagságot, illetve anyagátadási tényezőt.

III.

Az új tudományos eredmények rövid összefoglalója (tézisek)

1. Négy különböző C-tartalmú, $1555 \pm 5^\circ\text{C}$ hőmérsékletű acéolvadékbba merített különböző C-tartalmú, 20°C kezdőhőmérsékletű és egyforma méretű acélpró-

bákra való ráfagyás, valamint a teljes beolvadás időtartamát vizsgáltam. A ráfagyás, illetve a teljes olvadás időtartama a fürdő, valamint a bemelegített próba anyagának likvidusz hőmérséklete között fennálló különbségnek a függvénye. A tapasztalati összefüggést

$$y = \frac{a}{(b - x)^n}$$

alakú egyenlet fejezi ki, ahol y az idő, x a hőmérséklet különbség, a , b , és n pedig a kísérleti adatokból számítható állandók.

2. A 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú, 1555°C hőmérsékletű olvadékba merített 20°C hőmérsékletű, 0,10 %, 0,48 %, 1,05 % és 1,60 % C-tartalmú acélpróbákra a bemelegítés kezdetén ráfagyott rétegvastagságok sorrendje megfelel az ilyen metallurgiai körülményekre eddig még nem alkalmazott Tyihonov-Szamarszkij elv alapján számítógépes programmal kiértékelt ráfagyott rétegvastagságok sorrendjének.

3. Ha az olvadék anyagának likvidusz hőmérséklete jelentősen, például 85°C-szal nagyobb a bemelegített acélpróbák anyagáénál, akkor a ráfagyással egyidejűleg olvadás ("előolvadás") is bekövetkezik, a ráfagyott réteg megolvadása után kezdődő tényleges olvadás időszüksége ennek következtében csökken.

4. 2, 10 és 50 tonnás ivkemencék ötvözetlenül beolvadó adagjainak beolvadási teljesítménye a beolvadási karbontartalommal maximumos görbe szerint változik. A maximális beolvadási teljesítmény 0,5-1,0 % között van. A 0,25 %-nál kisebb beolvadási karbontar-

talomra jellemző kis beolvadási teljesítmény az olvadás mikrofolyamatai során tapasztalt jelenségekkel is magyarázható. Ennek ismeretében az üzemi adagok betétanyagra visszavezethető kis beolvadási teljesítménye kiküszöbölhető.

5. A vizsgált és 0,111-0,132 Prandtl-számmal és 80-90 Schmidt-számmal is jellemezhető metallurgiai körülmények között mért 70-170 m határréteg-vastagságok felhasználásával 0,186-0,366 m/h anyagátadási tényező értékekhez jutottam.

Az anyagátadási tényező tájékoztató értékére fémesített ércpellet 0,10 % C-tartalmú olvadékban végbemenő beolvadása esetén 1 m/h-t számoltam ki.

6. Az acélok beolvadási folyamatában a vizsgált körülmények között az anyagátadás minden esetben 20 %-nál kisebb részesedését állapítottam meg, az olvadás sebességét tehát elsősorban a hőátadás határozta meg.

IV.

Az értekezés témaköréből készült publikációk jegyzéke

1. Elektroacélgyártás. Vaskohászati Enciklopédia VII/2. Akadémiai Kiadó, Budapest (1965)
(Uray Vilmossal együtt írt könyv)
2. Nagy nyersvashányad alkalmazása ivkemencék betétjében. 1-2-351/1968 témaszámú VASKUT kutatási zárójelentés.
3. A fémesített pellet alkalmazásának jelene és jövője az acélgyártásban. Kohászat, 104 (1971)
433-439. o.

4. Fémesített brikett és pellet ivkemencében való felhasználásának néhány üzemi tapasztalata.
Kohászat, 106 (1972) 6-11. o.
5. Olvadáskinetikai vizsgálatok.
3-SKK-09 témaszámú VASKUT kutatási jelentés (1973).
6. Az acél olvadásának néhány mikrojelensége.
VII. Kohászati Anyagvizsgáló Napok, (1973).
7. Fémesített érc ivkemencében felhasználásának üzemi tapasztalatai.
A Vasipari Kutató Intézet Évkönyve, V. (1973).
8. Elektroacélmű teljesítményének növelése.
3-2-325/1973 témasszámú VASKUT kutatási zárójelentés.

MAGYAR
TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
KÖNYVTÁRA

MTA KESZ, Sokszorosító