

VERŐ BALÁZS – JANÓ VIKTÓRIA – CSIZMADIA JÁNOS – IFJ. GYÓRI IMRE – LAUB ÁDÁM – RÉGER MIHÁLY

## Szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek dermedése

*A szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek dermedési folyamatait a szilárd kéreg időbeli növekedését leíró törvényszerűségekből kiindulva tárgyalja a cikk, megkülönböztetve a dendritcsúcs és a dendritörzs helyének időbeli változását leíró függvényt. A dendritcsúcs görbületi sugara által meghatározott termikus túlhűlés és az ötvözőknek az olvadékbeli korlátozott diffúziós sebessége által meghatározott összetételi túlhűlésnek az öntvény falától mért távolság függvényében való változását elvi ábrákkal szemléltetik a szerzők. A bemutatott kapcsolatrendszer lehetőséget teremt a folyamat számítógépes modelljének kidolgozásához.*

### 1. Bevezetés

Előző cikkünkben [1] részletesen tárgyaltuk a tiszta fémek öntvényeiben lejátszódó, termikus túlhűlés által irányított dermedési folyamat szakaszait. Az egyes szakaszok kezdetét és befejeződését meghatározó feltételrendszereknek a szokásostól mélyebb elemzése – véleményünk szerint – feltétlenül szükséges a tiszta fémek öntvényeiben lejátszódó dermedési folyamat matematikai modelljének létrehozásához, és ezzel együtt az öntvény szövetszerkezeti sajátosságainak értelmezéséhez.

Az öntészeti gyakorlatban azonban nagy tisztaságú fémek csak elvétve szolgálnak alapanyagul, az öntvényeink alapanyaga gyakran szilárd oldatként dermed meg, vagy a dermedési folyamat első szakaszában a kristályos fázis szilárd oldat.

Gyakorlati jelentősége miatt ezért az öntvények dermedési folyamatának elemzését a szilárd oldatos ötvözetek öntvényeiben lejátszódó dermedési folyamat elemzésével folytatjuk. Ebben a cikkünkben a korábbi

cikkünk [1] gondolatmenetének számos elemét átvettük és alkalmazzuk. Kiinduló pontnak nem a dermedési folyamat egyes részjelenségeinek, hanem a szilárd oldatos öntvényekben lejátszódó dermedési folyamat egészének, egységes – idegen szóval holisztikus – szemléletű megközelítését tekintettük.

### 2. A szilárd kéreg vastagságának időbeli növekedését leíró összefüggés szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek dermedésekor

Előző dolgozatunkban [1] már bemutatottuk, hogy az öntvények szilárd kéregének időbeli növekedését színtémekre és ötvözetekre nézve is az öntészeti gyakorlatban széles körben elfogadott négyzetgyökös összefüggés írja le, nevezetesen az (1) egyenlet:

$$x = K\sqrt{t} \quad (1)$$

ahol  $x$  – a szilárd kéreg vastagsága  
 $t$  – a dermedési idő  
 $K$  – állandó

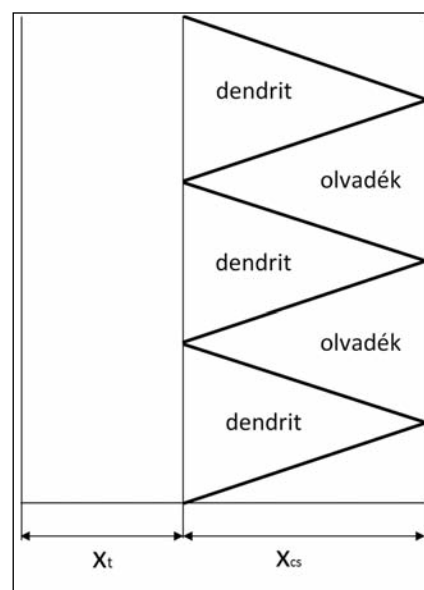
A szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek dermedésekor is ezt az összefüggést tekintjük tárgyalási

alapnak, de az (1) összefüggésben szereplő  $x$  szilárd kéregvastagságnak és a  $t$  dermedési időnek a definiálásakor már nehézségekkel találjuk szemben magunkat. Ha ugyanis a szilárd oldatos ötvözetek dermedését dendritnövekedési folyamatnak írjuk le, akkor a dendritek „csúcsos” alakjából következik, hogy külön-külön kell definiálni, illetve értelmezni a dendritcsúcsok és a dendritörzsök által kijelölt kéregvastagságot. Ezt a különbséget szemlélteti az 1. ábra vázlatja.

Kézenfekvő, hogy az  $x_{cs}$  és  $x_t$  kéregvastagság időbeli vastagodását külön-külön is leírjuk, nevezetesen:

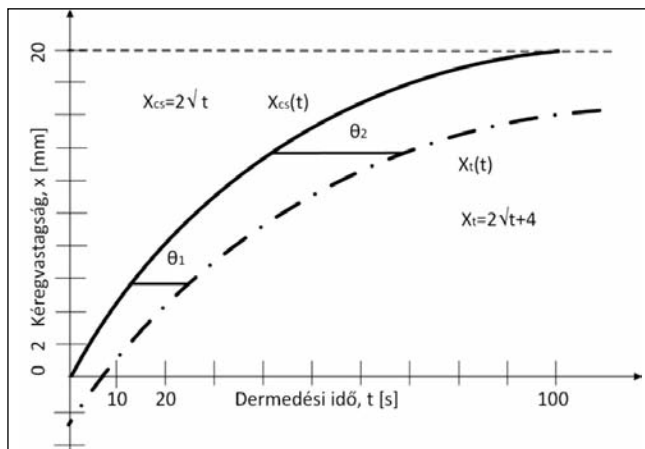
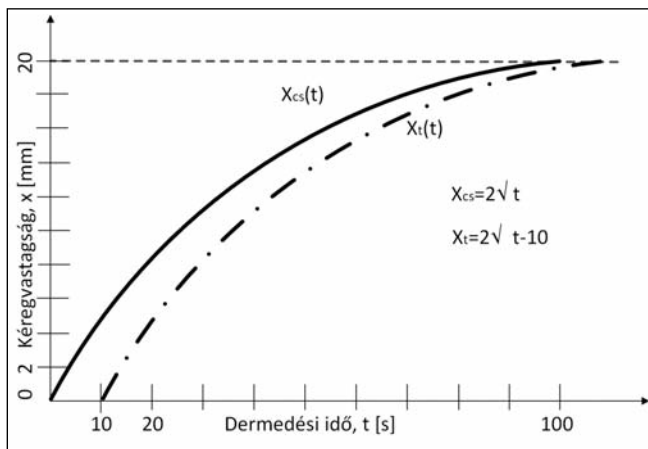
$$x_{cs} = x_{cs}(t) \quad (1a)$$

$$x_t = x_t(t) \quad (1b)$$



■ 1. ábra. A dendritek növekedésénél lejátszódó dermedési folyamat vázlatja.  $x_t$  – a dendritörzshöz rendelt kéregvastagság,  $x_{cs}$  – a dendritcsúcsához rendelt kéregvastagság

A szerzők szakmai életrajza a cikk első részénél, a 2016/5-6. számban található



■ **2. ábra.** A dendritcsúcs ( $x_{cs}$ ) és a dendrittörzs ( $x_t$ ) helyzete által kijelölt kéregvastagság változása a dermedési idő függvényében: a) Az  $x_{cs}(t)$  és az  $x_t(t)$  görbe kölcsönös helyzete  $t_0$ -al való eltoláskor; b) Az  $x_{cs}(t)$  és az  $x_t(t)$  görbe kölcsönös helyzete  $x_0$ -al való eltoláskor

alakban. Bár az (1a) és (1b) egyenletben független változóként csak az idő szerepel, nem szabad elfeledkez-nünk arról, hogy a szilárd kéreg kialakulásának folyamatában a hőmérséklet is változó. Ha elfogadjuk a négyzetgyökös összefüggés érvényességét mindkét esetre, akkor már csak a két függvénykapcsolat egymáshoz való viszonyát kell tisztázni, a dendritnövekedésnél lejátszódó dermedés sajátosságainak szem előtt tartásával.

A dendritek csúcsnövekedési modelljeiből következik, hogy az öntvényben egy adott pontot vagy felületet a dendritcsúcsok mindig előbb érnek el, mint a dendrittörzs. A továbbiakban viszonyítási alapként a dendritcsúcs növekedési törvényét tekintjük. Ennek a feltételnek matematikailag kétféleképpen is eleget tehetünk: – az (1) szerinti egyenletnek megfelelő görbét a  $t$  tengely mentén toljuk el adott  $t_0$  értékkel, vagy – ugyanezt a műveletet az  $x$  tengely mentén hajtjuk végre,  $x_0$  mértékben.

Az  $x_t(t)$  és az  $x_{cs}(t)$  görbék egymáshoz képest  $t_0$  értékkel való eltolása azt jelenti, hogy a dermedési folyamat teljes tartama alatt a lokális dermedési idő nem változik, míg az  $x_t$  és  $x_{cs}$  közötti távolság folyamatosan csökken. Az (1a) és az (1b) egyenlet szerinti görbék  $x$  menti eltolása pedig azt fejezi ki, hogy a lokális dermedési idő növekszik, míg az  $x_t$  és  $x_{cs}$  közötti különbség állandó.

A dendrittörzs vastagodására vonatkozó függvényeket az előbb tárgyalt két esetre nézve a (2a) és (2b) egyenletek adják meg.

$$x_t = K\sqrt{t - t_0} \quad (2a)$$

$$x_t = K\sqrt{t} + x_0 \quad (2b)$$

ahol  $x_0$  – az  $x$  tengely menti eltolás mértéke,

$t_0$  – a  $t$  tengely menti eltolás mértéke.

Azt eldönteni, hogy melyik változat írja le helyesen vagy helytelenül a folyamatot, egyértelműen csak kísérleti úton lehetne eldönteni. Véleményünk szerint azonban a (2b) egyenlet által jelzett viselkedés a valószínűbb. (Megjegyzés: [2] szerint is ez az összefüggés írja le helyesebben az acéltuskókban lejátszódó dermedési folyamatot.)

A (2a) és (2b) függvénynek megfelelő görbéket a 2. ábra mutatja.

A 2b ábrában feltüntetett adott  $x_i$  helyen a dermedés kezdete és befejeződése közötti lokális dermedési időt. Ennek értéke a dermedés előrehaladtával egyre nő, ami a diagramból közvetlenül leolvasható, de matematikailag is könnyen bizonyítható. (Megjegyzés: cikkünkben következetesen valamely tetszőleges változó  $i$  indexe az adott változó konkrét értékét jelöli.)

A 2. ábra szerinti ábrázolás arra is lehetőséget ad, hogy a kétféleképpen is értelmezhető kéregvastagság-növekedési sebességet is megadjuk adott  $t$  időpontban. Ezt matematikailag az  $x_{cs}(t)$  és  $x_t(t)$  függvények idő szerinti deriváltjai adják meg egy-egy adott időpontban.

Mivel joggal feltételezhető, hogy a dendritcsúcs mérete lényegesen kisebb, mint a kéreg vastagsága, a ké-

regnövekedés sebességét differenciális alakban is felírhatjuk. A 2b ábra szerinti helyzetre vonatkozóan az ábra jelöléseivel ezt az összefüggést a (3) egyenlet adja meg:

$$v = \frac{x_0}{\theta_i} \quad (3)$$

ahol  $\theta_i$  – egy adott  $x_i$ -hez tartozó lokális dermedési idő.

A (3) összefüggés azt fejezi ki, hogy a dermedési front sebessége a lokális dermedési idővel fordítottan arányos.

Valószínű, hogy sem a (2a), sem a (2b) összefüggés nem írja le tökéletesen egy adott konkrét esetben a kéreg időbeli vastagodását. Lehet, hogy  $x$ , illetve  $t$  tengely menti eltolást egyaránt alkalmazni kell. Az is lehet azonban, hogy a kéreg  $x$  időbeli vastagodását nem lehet egyszerű analitikus függvénykapcsolattal leírni. Ekkor mérési adatokra támaszkodva kell az  $x_{cs}(t)$  és az  $x_t(t)$  kapcsolatot jellemezni. Ez a megközelítés azonban a továbbiakban ismertetendő megfontolások helyességét nem befolyásolja.

### 3. A szilárd oldatos ötvözet öntvényeinek adott pontjára jellemző $T(x_i, t)$ görbéjének megszerkesztése és értelmezése

A szilárd oldatos ötvözetek egyensúlyi körülményekre vonatkozó lehülési görbéjének, vagyis a  $T = T(t)$  görbe alakja jól ismert. A lehülési görbén – a vizsgált ötvözet összetételétől függő hőmérsékleteken, nevezetesen a  $T_L$  likvidusz- és  $T_S$  szolidusz-hőmérsékleteken – töréspont jelenik meg.

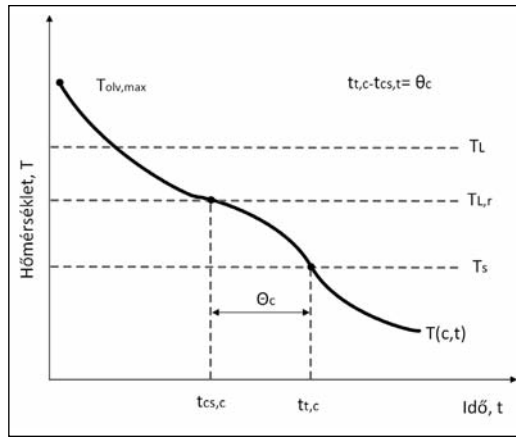
Ennek a két hőmérsékletnek a hőmérsékletbeli távolságát a likvidusz- és a szoliduszgörbe meredeksége közötti különbség határozza meg. A hőmérséklet csökkenésének folytonosságát a kristályos szilárd oldat megjelenésével együtt járó hőeffektus okozza.

Vizsgáljuk meg a következőkben, hogy a 2. ábra szerinti két négyzetgyökös kéregnövekedési függvényből, ezek egymáshoz való viszonyából, illetve néhány alapvető adatból mit mondhatunk az öntvény különböző pontjainak  $T(x_i, t)$  görbéinek alakjára nézve.

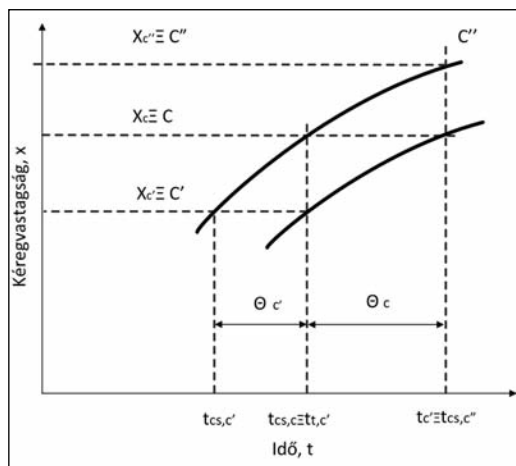
Az alapadatok tekintetében eltérő típusú hőmérsékleti adatokat tudunk definiálni (3. ábra): – A lehülési görbék kezdőpontjában az olvadék hőmérséklete az öntési hőmérsékletnek, vagyis  $T_{olv, max}$ -nak felel meg, ami a  $T_L$  hőmérsékletnél általában nagyobb.

– Végtelen lassú lehüléskor pedig – ahogy azt már jeleztük – a lehülési görbén az egyensúlyi  $T_L$  és  $T_S$  hőmérsékleteken kell a töréspontoknak megjelenniük. Reális öntvényekben egyensúlyi körülmények sohasem alakulhatnak ki, hiszen a lehülési sebesség az öntvény bármely pontjában nagyobb, mint nulla.

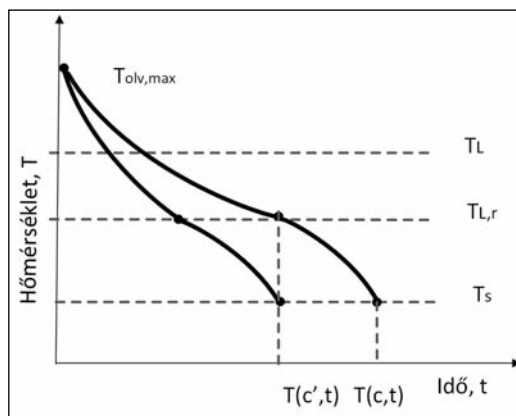
– A szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek dermedésekor a likvidusz- és szolidusz-hőmérsékletek értelmezésekor már figyelembe kell venni a dermedési folyamat sajátosságait. Az egyensúlyi  $T_L$  hőmérséklethez viszonyítva a dendritek növekedési folyamata ennél kisebb hőmérsékleten játszódik le, mégpedig a görbületi sugár nagyságától függő túlhűlés mértékének megfelelően. Ezt a hőmérsékletet továbbiakban  $T_{L,r}$ -rel jelöljük, ahol az  $r$  index a dendritcsúcs görbületi sugarára utal. Az is közismert, hogy szilárd oldatok dermedésekor a szolidusz-hőmérséklet az ötvözőelem szilárd állapotbeli korlátozott diffúziós sebessége miatt az egyensúlyi  $T_S$  hőmér-



■ 3. ábra. Egy szilárd oldatos ötvözet öntvényének adott pontjában érvényesülő lehülési görbe jellegzetes pontjai. A diagramba berajzoltuk az egyensúlyi  $T_L$  és  $T_S$  hőmérsékleteket is



■ 4. ábra. Vázlat az öntvény egyes pontjaiban érvényesülő lokális dermedési idők egymáshoz való viszonyának értelmezéséhez. A vázlat a 2b ábra C pont szerinti környezetének kinagyított részlete



■ 5. ábra. Az öntvény C és C' pontjára jellemző lehülési görbe viszonyát szemléltető vázlat

séklet alatt van. A mikrodúsulásnak nevezett jelenség hatását ebben a cikkben nem tárgyaljuk, illetve nem vesszük figyelembe.

A 2b ábra szerinti görbepár elemzése a lehülési görbe jellegére nézve

további adatokkal szolgál. Ehhez vizsgáljuk a dermedés folyamatát az öntvény egy kijelölt, mondjuk C pontjában. Az  $x_C(x_C, t)$  és az  $x_t(x_C, t)$  görbén adódó metszéspontokhoz  $t_{cs,C}$  és  $t_{t,C}$  dermedési idők tartoznak. Az egyszerűbb jelölés érdekében a továbbiakban az  $x_C$ -t C-vel jelöljük. A két görbe jelentéséből következik, hogy a  $t_{cs,C}$  és  $t_{t,C}$  időkülönbség a C pontban érvényesülő lokális dermedési idővel egyenlő, ahogy azt már a (2) egyenlet felírásakor említettük. Ez azt jelenti, hogy ez alatt az idő alatt az öntvény egy adott, pl. C pontjában az ötvözet anyagának hőmérséklete  $T_{L,r}$ -ről  $T_S$ -re változik. Ezzel az eredménnyel a C pontra jellemző  $T(x_i, t)$  görbén a  $T_{olv, max}$ -on túlmenően további két pont koordinátáit definiáltuk.

A 4. ábra szerint – amely a 2b ábra kinagyított részlete – a kéreg C pontjához  $t_{cs,C}$  és  $t_{t,C}$  dermedési idők rendelhetők. Vetítsük le a C ponthoz tartozó  $t_{cs,C}$  dermedési időt az  $x_t = x_t(t)$  görbére, a metszésponthoz tartozó kéregvastagságot jelöljük C'-vel, és az ehhez tartozó dermedési időt  $t_{t,C'}$ -vel. Nyilvánvaló, hogy a  $t_{cs,C}$  és  $t_{t,C'}$  időtartamok különbsége éppen a C' pontban érvényes lokális dermedési időt adja.

Hasonló jellegű szerkesztés hajtható végre a nagyobb dermedési idő felé is (lásd az ábra C'' pontját). Így – akár az  $x_t(t)$  görbe kezdőpontjából kiindulva rendre megkaphatjuk az  $x$  kéregvastagság diszkrét értékeihez tartozó és egyre növekvő dermedési időket.

Ez azt jelenti tehát, hogy az eredetileg választott C ponthoz közel lévő C'' pontban is meg tudjuk határozni a lokális dermedési időt, vagyis a  $T_{L,r}$ -ről a  $T_S$ -re való lehülés idejét. A korábbi megfontolások alapján a C ponthoz tartozó lokális dermedési idő nagyobb, mint a C'-höz tartozó. Ez összhangban van azzal a követelménnyel, hogy az öntvény falához közelebb lévő pontokban a kéregnövekedési sebesség nagyobb, mint az ettől távolabbiakban.

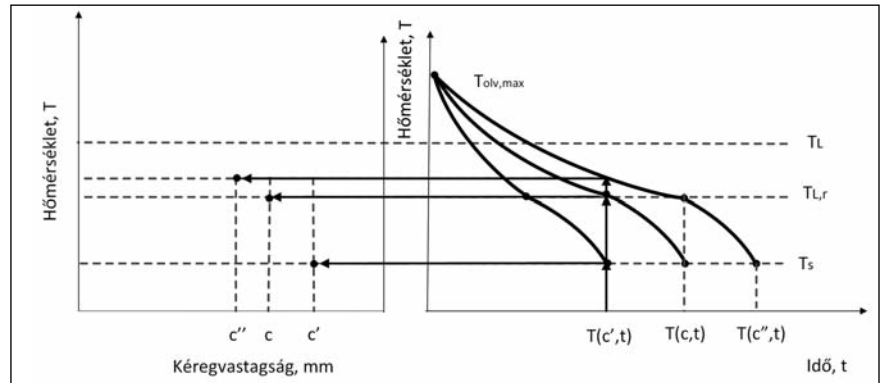
A 4. ábra elemzéséből adódó C', C és C'' pontban érvényesülő lehülési

görbére nézve az 5. ábra vázlata tájékoztató. A 4. és 5. ábrán bemutatott eljárással tetszőleges  $x_i$  helyhez tartozó lehülési görbe megszerkeszthető. Ez a lehetőség azért jelentős, mert csak a kellő sűrűségű lehülési görbesereg birtokában szerkeszthető meg a  $T = T(x, t_i)$  diagram. Az természetesen külön elemzés tárgyát képezi, hogy a  $T_{L,r}$  és  $T_S$  hőmérsékletek függenek-e, és ha igen, hogyan függenek az adott pontban érvényesülő lehülési sebességtől. A 3. és 5. ábrán állandó  $T_{L,r}$  hőmérsékletet tüntettünk fel, ami egyenértékű azzal az állítással, hogy a dendritcsúcs görbületi sugara a dendrit növekedése közben nem változik. Mérési adatok alapján is tudjuk, hogy ez az állítás csak az oszlopos dendritok növekedésekor jelent viszonylag jó közelítést, de nem alkalmazható a finom és az egyenlő tengelyű dendritok kialakulásának szakaszára nézve. Erre a körülményre a 3. és 5. ábrán a  $T_{L,r}$  és  $T_S$  hőmérsékletet jelző vízszintesek megszagatásával utalunk az adott tartományban. Amennyiben a  $T_{L,r}$  hőmérsékletnek a dendritcsúcs görbületi sugarától és egyéb tényezőktől való függését ismerjük, modellünkbe ezek az ismeretek beépíthetők, hasonlóan a kéregnövekedési törvénnyel kapcsolatban elmondottakhoz.

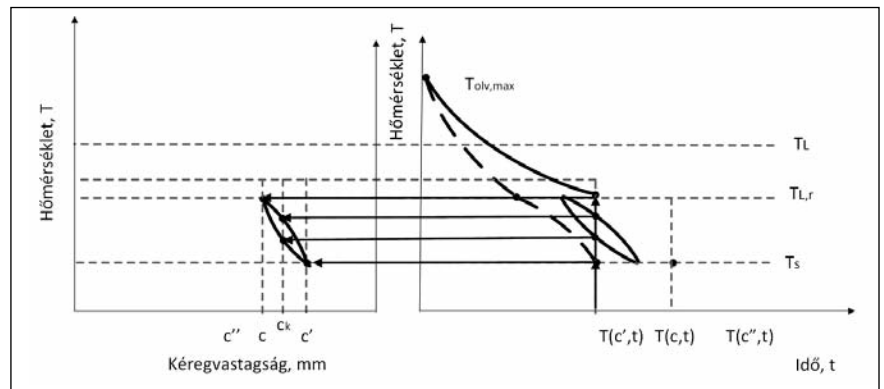
A lehülési görbék  $T_{L,r}$  és  $T_S$  közötti szakaszának alakjára nézve azt tetelezhetjük fel, hogy az annál inkább eltér a folyamatos hőmérséklet-csökkenést leíró görbétől, minél kisebb az adott pontban a lokális dermedési idő, vagyis minél nagyobb az adott pontban a lehülési sebesség. A lehülési görbesereg egyes tagjainak alakja egyáltalán nem közömbös a  $T = T(x, t_i)$  görbék lefutása szempontjából.

Az eddigi megállapítások azonban már lehetővé teszik a  $T = T(x, t_i)$  görbék jellegének vizsgálatát, ami már közvetlenül elvezethet a konstitucionális túlhűlésnek a megszokottól mélyebb értelmezéséhez.

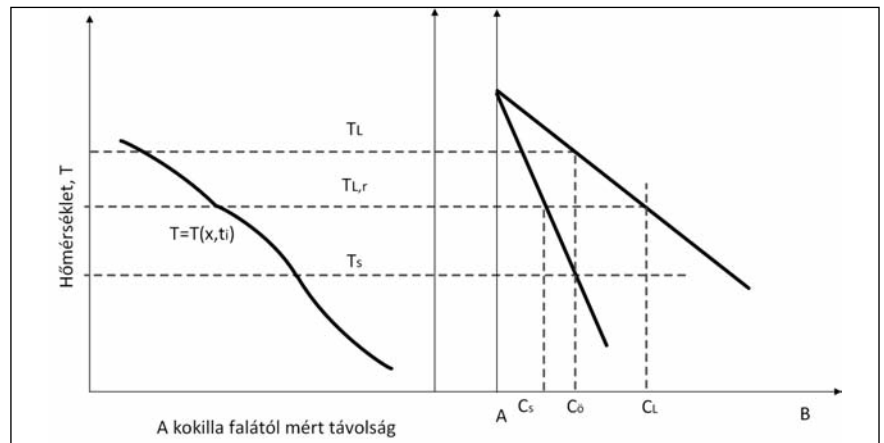
A lehülési sebesség mérésekből is meghatározható. A mindenkor  $T_{L,r}$  és  $T_S$  hőmérsékletek valamely kísérleti öntvény különböző pontjaiban felvett hőmérséklet-idő görbékkel határozható meg. Szokásos DTA vagy DSC mérésekből ezek a jellegzetes hőmérsékletek nem olvashatók ki, amint arra az 6. fejezetben még visszatérünk.



■ 6. ábra. A  $T = T(x, t_i)$  típusú görbesereg megszerkesztése. A  $C'$ ,  $C$  és  $C''$  pontokat a kéreg időbeli vastagodását leíró négyzetgyökös kapcsolat alapján kell kijelölni (lásd a 4. ábra vázlatát). (Megjegyzés: ahhoz, hogy a  $T = T(x, t=t)$  görbén a  $T_S$  hőmérséklet alatt is kapjunk pontot, a 6b ábrán a  $C'$ -nél közelebbi pontban érvényes lehülési görbét is figyelembe kell venni



■ 7. ábra. A  $T = T(x, t \equiv t)$  görbe egy, a  $T_{L,r}$  és  $T_S$  hőmérsékletek közé eső pontjának meghatározása. (Megjegyzés: A kérdéses pont megszerkesztéséhez a  $C'$  és  $C$  pontokhoz tartozó lehülési görbén túlmenően egy  $C'$  és  $C$  pont közötti  $C^k$  ponthoz tartozó lehülési görbét is ismerni kell)



■ 8. ábra. A szilárd oldatos ötvözetek dermedésére vonatkozó egyensúlyi fázisdiagram-részlet és a  $T = T(x, t_i)$  görbesereg kapcsolatát bemutató vázlat

#### 4. A $T = T(x, t_i)$ görbesereg meghatározása és az egyes görbék jellege

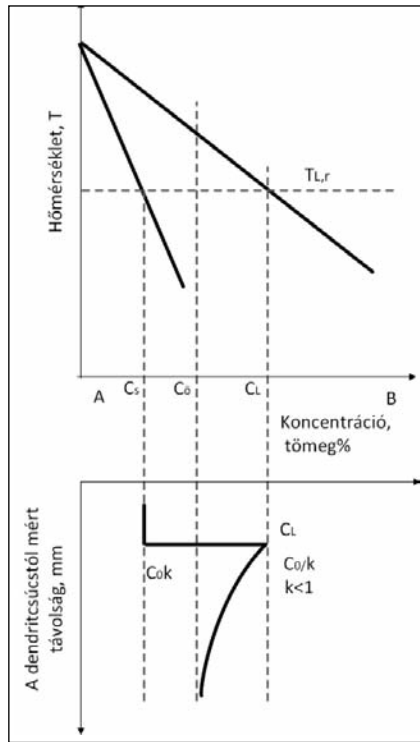
A hőmérsékletnek az öntvény falától mért távolság függvényében adott időpontban való változását az  $x_{CS}(t)$  és  $x_t(t)$  görbepár és a  $T = T(x_i, t)$  lehülési görbesereg ismeretében már

megszerkeszthetjük. A szerkesztés menetét a 6. ábra vázlatai szemléltetik. A 6. ábra szerinti vázlatoknak megfelelően jelöljük ki három, a  $C'$ ,  $C$  és  $C''$  pontnak megfelelő kéregvastagságot – a könnyebb áttekinthetőség kedvéért – most csak az  $x_{CS}(t)$  görbe szerint. Ehhez a három kéregvastag-

sághoz rendre  $t_{cs, C'}$ ,  $t_{cs, C}$  és  $t_{cs, C''}$  dermedési idők tartoznak. Jelöljük be ezeket az időpontokat a  $T = T(x_i, t)$  diagram vízszintes tengelyén, és keressük meg az ezekben a pontokban húzott függőleges és a  $T = T(x_{cs, C'}, t)$ ,  $T = T(x_{cs, C}, t)$  és  $T = T(x_{cs, C''}, t)$  lehülési görbékkel való metszéspontjait. Mivel az időpontokat a dendritcsúcs növekedésének kezdetét kijelölő görbéről határoztuk meg, nyilvánvaló, hogy a három kiválasztott időponthoz tartozó függőleges egyenes a lehülési görbékkel való metszéspontjait. Mivel az időpontokat a dendritcsúcs növekedésének kezdetét kijelölő görbéről határoztuk meg, nyilvánvaló, hogy a három kiválasztott időponthoz tartozó függőleges egyenes a lehülési görbékkel való metszéspontjait. Mivel az időpontokat a dendritcsúcs növekedésének kezdetét kijelölő görbéről határoztuk meg, nyilvánvaló, hogy a három kiválasztott időponthoz tartozó függőleges egyenes a lehülési görbékkel való metszéspontjait.

Vizsgáljuk meg a továbbiakban a  $T = T(x_i, t)$  lehülési görbék tényleges alakjának visszatükröződését a  $T = T(x, t)$  görbék  $T_{L, r}$  és  $T_S$  közötti szakaszában. Induljunk ki ismét a 6. ábra szerinti helyzetből. Az öntvény C pontjában a dermedés  $t_{cs, C}$  időpillanatban kezdődik meg, és  $t_{t, C}$  időpillanatban fejeződik be. Az öntvény C' pontjában a  $t_{cs, C'}$  időpillanatban a dermedés már befejeződött, és az  $x_{cs}(t)$  görbéről leolvashatóan  $t_{cs, C'}$  időpillanatban kezdődött meg. Ezt a hely és idő koordinátáknak megfelelő helyzetet tünteti fel a 7. ábra vázlata.

A két szomszédos C és C' pontok közötti tetszőleges helynek megfelelő lehülési görbét is rajzoljuk be eddigi ismereteink figyelembevételével. Ezt a közbülső kéregvastagságot a továbbiakban jelöljük  $C^k$ -val. Ahhoz,



■ 9. ábra. A  $T_{L, r}$  hőmérsékleten egyensúlyban lévő szilárd oldat és olvadék ötvözőfém (B fém) koncentrációjának és a dendritcsúcs előtti olvadék ötvözőfém-tartalmának változása a dermedési fronttól mért  $x$  távolság függvényében. A dermedési fronttól viszonylag nagy távolságban az ötvözet átlagos ötvözőfém-tartalmát ( $C_0$ ) tételezzük fel. A likviduszgörbén nyíl jelöli az olvadék ötvözőfém-tartalmának csökkenésével bekövetkező likvidusz hőmérséklet-növekedés irányát

hogy a lehülési görbék tényleges alakjának hatását a  $T = T(x, t)$  görbék is szemléltetni tudjuk, a 7. ábra vázlatán szaggatott vonallal berajzolunk egy olyan lehülési görbeszakaszt is, amelyeken eltekintettünk a szilárd oldat megjelenésével együtt járó hőeffektustól.

A szerkesztést a C és C' pontok közötti  $C^k$  tetszőleges helyre elvégezve az adódik, hogy ebben a tartományban a hőmérséklet értelemszerűen nagyobb, mint ami a hőeffektus elhanyagolása esetén adódna. Ez egyben azt is jelenti, hogy a dermedési front előtt nagy valószínűséggel pozitív hőmérsékleti gradiens alakul ki, vagyis a termikus viszonyok nem teszik lehetővé a dendritek termikus túlhűlés által irányított növekedését.

Hasonlóan a tiszta fémek dermedési folyamatának tárgyalásakor tapasztaltakkal, a lehülési görbe jellege és a hőmérsékletnek adott időpillanatban  $x$  szerinti változását leíró gör-

be jellege között nagyfokú hasonlóság tapasztalható.

## 5. Az összetételei (konstitucionális) túlhűlés értelmezése szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek dermedésekor

A  $T = T(x, t)$  görbesereg „megszerkesztésével” megadtuk az ötvözet hőmérsékletének változását az öntvény falától mért távolság függvényében, az ötvözet  $T_{olv, max}$  hőmérséklettől kezdve. Nem véletlenül használtuk az „ötvözet hőmérséklete” kifejezést. Ezzel azt fejeztük ki, hogy a  $T = T(x_i, t)$  lehülési görbe  $T_{L, r}$  és  $T_S$  közötti szakaszának bármely pontjában az egyensúlyt tartó szilárd oldat és az olvadék hőmérséklete szükségszerűen megegyezik. Ebből a körülményből, illetve megállapításból az következik, hogy a  $T = T(x, t)$  görbék megadják az olvadék tényleges, fizikai eszközökkel mérhető hőmérsékletét. Ennek ismerete feltétlenül szükséges az összetételei túlhűlés mértékének meghatározásához (lásd [1]-ben szereplő definíciót).

Az elmondottak szerint a 6. és 7. ábra megfeleltethető például a [2] 242. oldalán szereplő 4.21 ábra c), d) és e) vázlatán szereplő  $T_{eff}$  görbéknek, illetve a [3] 131. oldalán szereplő 4.13. ábraszorozaton  $T_W$ -vel azonosított görbéknek. Az „eff” index az effektív vagy tényleges kifejezést takarja, míg a „W” a „wahre” = valódi jelentésű német szó kezdőbetűje. Az elmondottak alapján az is belátható, hogy az összetételei túlhűlés értelmezésekor a dendritcsúcs előtti térben lévő olvadék hőmérsékletét – pontosabban tényleges hőmérsékletét – kell alapul venni. Csak így értelmezhető a [2] és [3] tankönyvben, illetve kézikönyvben látható, és az összetételei túlhűlést magyarázó ábraszorozat.

Közelebb juthatunk az összetételei túlhűlés által irányított dendritnövekedés értelmezéséhez, ha a [2] 242. oldalán található 4.21. ábra a) vázlatát vesszük szemügyre. Lényeges, hogy az ábra vázlatán szereplő egyensúlyi diagramrészleten bejelölt  $T_0$  hőmérséklet azonosan egyenlő az általunk használt  $T_{L, r}$  hőmérséklettel. A  $T_{L, r}$  hőmérsékleten az egyensúlyi diagramnak megfelelően  $C_0/k$  összetételű olvadék  $C_0/k$  összetételű szilárd oldat-

tal tart egyensúlyt, amint azt a 8. ábra szemlélteti. (Megjegyzés:  $k < 1$ .)

Ez a  $\Delta T = T_L - T_{L,r}$  mértékű túlhűlés kell ahhoz, hogy a dendritcsúcshoz anyagával egyensúlyt tartó, és azzal közvetlen kapcsolatban lévő olvadék összetétele különbözhesen az ötvözet átlagos összetételétől, kétalkotós rendszerre nézve annak ötvözőfém tartalmától.

Ebben a megközelítésben értelmezhető az összetételi túlhűlés jelensége, hiszen a dendritcsúcstól távolodva a csökkenő ötvözőfém-tartalomhoz növekvő, a helyi összetétel által meghatározott  $T_L$  likvidusz-hőmérsékletek tartoznak.

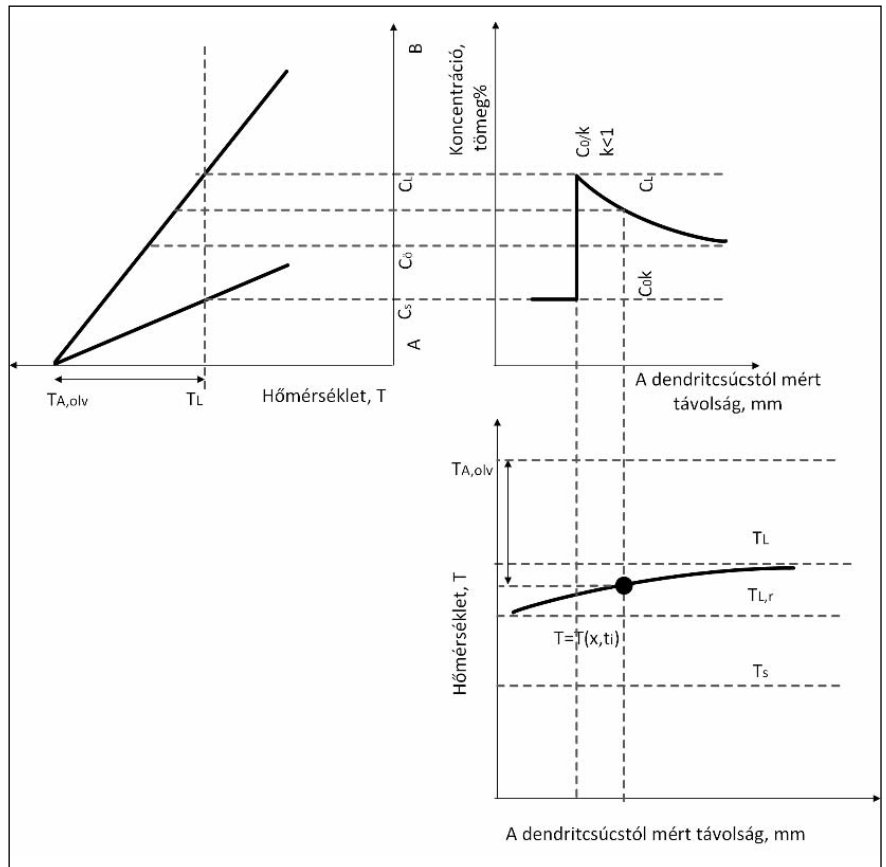
A 9. ábra ennek a  $T_L = T_L(x, t_i)$  kapcsolatnak a jellegét, és a  $T = T(x, t_i)$  görbe megszerkesztésének menetét mutatja. A  $c_{0lv} = c_{0lv}(x, t_i)$  görbe jellegével cikkünk 6. fejezetében foglalkozunk részletesebben.

A konstitucionális túlhűlés mértékét és  $x$  szerinti változását akkor kapjuk meg, ha képezzük a  $T = T(x, t_i)$  és a  $T_L = T_L(x, t_i)$  közötti különbséget  $x$  függvényében. Ezt mutatja a 10. ábra.

Ez az ábra világosan mutatja, hogy szilárd oldatok dendritjeinek növekedése akkor is lehetséges, ha a dendritcsúcshoz előtti olvadékban pozitív a hőmérsékleti gradiens, mert – a 11. ábra szerint – a dendritcsúcstól az olvadék belseje felé haladva a folyamat hajtóereje,  $\Delta G$  még ebben az esetben is nő. Ugyanakkor nehezen képzelhető el az a helyzet, amely a dendritcsúcshoz előtti negatív hőmérsékleti gradiens kialakulásához vezetne.

A konstitucionális túlhűlés értelmezéséhez felrajzolt egyensúlyi fázisdiagram-részletből a vizsgált jelenség kapcsolatban még további következtetésekre is juthatunk.

Mivel a  $T = T(x, t_i)$  görbék megadják az ötvözet mindenkor hőmérsékletét, célszerű az egymással egyensúlyt tartó fázisok arányának és összetételének a hőmérséklet csökkenése közbeni változását is nyomon követni. Ennek a változásnak a hatása az összetételi túlhűlés mértékében megmutatkozik. Elvileg az egyensúlyi  $T_L$  hőmérsékleten nincs meg az összetételi túlhűlés kialakulásának lehetősége, az egyensúlyi  $T_S$  szolidusz-hőmérsékleten pedig már nincs jelen olvadék.



■ 10. ábra. A likvidusz-hőmérsékletnek a dendritcsúcstól mért  $x$  távolság függvényében való változását bemutató görbe egy pontjának szerkesztési módja, és a  $T_L - x$  görbe jellege

Mielőtt a két szélső helyzet közötti állapotokat vizsgálnánk, tisztáznunk kell a szilárd oldat/olvadék-arány változásának helyét. Ennek rögzítésére hívjuk segítségül az 1. ábra vázlatát, amelyet a 12. ábra felső részén ismét bemutatunk, de itt már a koncentrációk, a hőmérsékleti adatok és a fázisarányok változását is berajzoltuk.

Nyilvánvaló, hogy a dendritcsúcshoz a szilárd oldat  $c_0k$  összetételű, míg a dendrittörzsnél  $c_0$ . A két helyen az olvadék összetétele rendre  $c_0/k$  (ahol  $k$  a megoszlási tényező), illetve a  $c_0$  összetételű ötvözet szolidusz-hőmérsékletén a likviduszgörbéről leolvasható ötvözőfém-koncentráció. A hőmérséklet-változást a mindenkor  $T = T(x, t_i)$  görbék írják le, míg a fázisarány – két egymás melletti „háromszög” alakú dendritcsúcshoz feltételezve – az  $x_{CS}$  és  $x_t$  közötti távolságon belül lineárisan változik  $x$ -szel.

Az elmondottakból akár könnyen arra a következtetésre is juthatnánk, hogy a konstitucionális túlhűlés mértéke helyileg és időben erőteljesen változik, hiszen a szilárd oldattal egyensúlyt tartó olvadék összetétele

a hőmérséklet csökkenésekor egyre inkább eltér az ötvözet átlagos összetételétől. Ez az állítás azonban hamis, mert a helyzetet a dendrites növekedés szempontjából mindig a dendritcsúcshoz kell vizsgálni, ahol a hőmérséklet mindig  $T_{L,r}$  közeli, és így  $c_0/k$  sem változik számottevően.

Mindebből következik, hogy az összetételi túlhűlés által irányított dendritnövekedés hajtóereje a dermedés során számottevően nem változik. Mértékére hatással van a dendritcsúcshoz előtti olvadék hőmérséklet-gradiensének nagysága és – nyilván – az ötvözőfémnek az olvadékbeli diffúziós sebessége.

Ezen a helyen célszerű megjegyezni, hogy kúp alakú dendritcsúcsot feltételezve – a dendritcsúcs felületén is kialakulhat összetételi túlhűlés, az adott helyre jellemző görbületi sugárnak megfelelően. Ezzel indokolható a szekunder dendritágak megjelenése, és ezzel magyarázható az a megfigyelés, hogy a szekunder dendritágak a dendritcsúcs közelében kezdenek el növekedni.

### 5.1. A szilárd oldatos ötvözet öntvényeinek adott pontjára jellemző lehülési görbe értelmezése

A 3. és az 5. ábra szerinti lehülési görbék értelmezésekor csak részben vettük figyelembe a dermedés dendrites jellegét. A dendritcsúcs és a dendritörzs közötti tartományra érvényes hőmérséklet, koncentrációs és fázisarány viszonyok elemzéséből azonban egyértelműen következik, hogy az öntvény egy adott pontjában – pl. a C pontban – a dermedés közben azért változik a hőmérséklet, mert a dendritcsúcs helyzete által kijelölt dermedési front „átvonul” a C ponton, és a mindenkor hőmérséklet a mozgó kétfázisú tartományban változik a  $T_{L,r}$  és a  $T_S$  között.

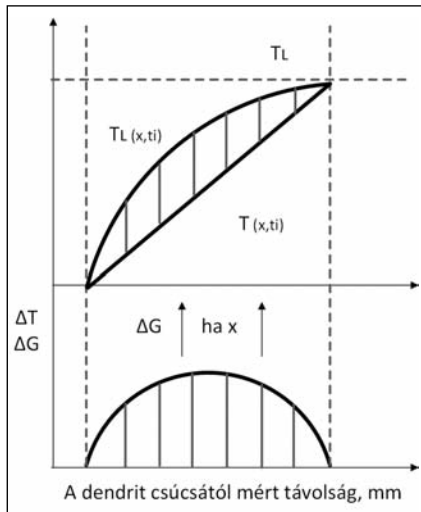
Valószínű tehát, hogy az öntvény adott pontjában – pl. termoelemmel – felvett lehülési görbe alakja nem minden részletében fog megfelelni egy ugyanolyan lehülési sebesség mellett pl. termikus analízis során felvett lehülési görbe alakjának.

### 6. Szilárd oldatos ötvözetek öntvényeiben kialakuló öntött szövet jellegzetes tartományai

Már előző cikkünkben [1] is utaltunk arra az egyébként közismert tényre, hogy a tiszta fémek és a szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek öntött szövete nagyon hasonló. Az öntött szövetet mindkét esetben három jól megkülönböztethető tartomány, nevezetesen egy finom dendrites, egy oszlopos dendrites és egy egyenlő tengelyű dendrites zóna alkotja.

A tiszta anyagok öntvényeinek dermedésekor az egyes tartományok kialakulásának, illetve az egyik tartományból a másikba való átmenet termikus feltételeit pontosan definiálni lehetett. Joggal várható, hogy ezt a feltételrendszert a szilárd oldatos ötvözetek dermedésére nézve is meghatározzuk, tovább mélyítve az összetételi túlhűlésre, illetve annak jelentőségére vonatkozó tudásunkat.

A továbbiakban csak a finom és az egyenlő tengelyű dendrites zónával foglalkozunk, mert az oszlopos dendritek növekedésére vonatkozó feltételrendszert már részletesen elemeztük a 4. és 5. fejezetben.



■ 11. ábra. Az összetételi túlhűlés mértékének változása a dendritcsúcstól mért  $x$  távolság függvényében. Az összetételi túlhűlés mértéke: a)  $T(x, t_i)$  és a  $T_L(x, t_i)$  görbe adott  $x$  pontjában adódó, és függőleges sraffozással jelölt hőmérséklet-különbséggel arányos; b) A konstitucionális túlhűlés változása a dendritcsúcstól mért  $x$  távolság függvényében. A  $\Delta G$  szabadentalpia-különbség – amely a túlhűlés mértékével arányos – a dermedési fronttól távolodva nő, még pozitív olvadékbeli hőmérsékleti gradiensenél is

### 6.1. A finom dendrites kéreg kialakulásának feltétele szilárd oldatos ötvözetek öntvényeiben

Szilárd oldatos ötvözetek öntvényeiben a szövetszerkezeti sajátosságokat nemcsak a termikus, hanem a koncentrációs viszonyok is befolyásolják. Lényegében azt kell vizsgálni, hogyan alakul a dermedési front – pontosabban a növekvő dendrit „csúcsa” előtt – az olvadék tényleges és az olvadék lokális összetétele által meghatározott likvidusz-hőmérséklet változását jellemző görbe.

A dendritcsúcs előtti tényleges hőmérséklet-változást a  $T = T(x, t_i)$  görbék írják le. Nyilvánvaló, hogy a dermedés kezdeti szakaszában, az olvadéknak a kokillába való beöntése után a  $t_i$  idő nagyon kicsi. A kokilla falánál megjelenő, majd növekedésnek induló csírák előtt az olvadék hőmérsékletének változása nem tér el lényegesen a dermedés megkezdése előtti helyzettől, ezen a helyen a  $\frac{\partial T}{\partial x}$  hőmérsékleti gradiens értéke nagy.

A gyorsan növekvő dendritcsírák előtt éles koncentrációgradiens is kialakul, hiszen a négyzetgyökös növekedési törvénynek megfelelően a ké-

reg  $v$  növekedési sebessége nagy, továbbá az ötvözőfémnek az olvadékbeli korlátozott diffúziós sebessége miatt hamar kialakul az ötvözet átlagos és dendritcsúcs előtti koncentrációja közötti különbség. A 9. ábrán bemutatott szerkesztés szerint, a koncentráció hely szerinti gyors változása a likvidusz-hőmérséklet gyors változását is jelenti egyben.

A bemutatott kvalitatív elemzés alapján látható, hogy a dermedés kezdeti szakaszában a tényleges és a likvidusz-hőmérséklet gyors hely szerinti változásával kell számolni, vagyis mindkét változásra annak nagy gradiense a jellemző.

Két esetet kell tehát megvizsgálnunk, az egyik esetben a  $T = T(x, t_i)$  görbe a  $T_L, x = T_L(x, t_i)$  görbe felett fut, a másik esetben fordított helyzetet kell értelmezni.

(Megjegyzés: az adott esetben  $x$  és  $t_i$  egyaránt kis értéket jelent, továbbá ez a kezdeti folyamat termikusan túlhűlt olvadékból játszódik le.)

A két görbe kölcsönös helyzete alapján két esetet lehet megkülönböztetni, figyelembe véve a nagy gradiens értékeket. Amennyiben a  $T_L$ - $x$  görbe a  $T$ - $x$  görbe alatt fut, vagy pontosabban

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x_{cs}} > \left(\frac{\partial T_L}{\partial x}\right)_{x_{cs}} \quad (4)$$

akkor az összetételi túlhűlés még a kokilla falánál sem alakul ki. A dermedési folyamatot ebben az esetben síkfrontos dermedésnek nevezzük [3]. A viszonyokat a 13a ábra vázlata szemlélteti. Az extrém termikus viszonyok miatt ez a helyzet a gyakorlatban alig fordul elő.

Ellenkező esetben, amikor tehát

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x_{cs}} < \left(\frac{\partial T_L}{\partial x}\right)_{x_{cs}} \quad (5)$$

akkor a 13b ábra vázlatának megfelelően egy viszonylag szűk tartományban létrejön az összetételi túlhűlés feltételrendszere, és az  $r$  görbületívugárral jellemzett dendritek elkezdnek növekedni. Ezt a növekedési szakaszt szabálytalan dermedési frontalak jellemzi, amely a későbbiekben hatszögös cellás szerkezetbe megy át [3].

Ennek a szakasznak a vége a kokilla falával érintkező tartományban a termikus túlhűlés megszűnéséhez

köthető, megjegyezve, hogy sok esetben finom dendrites tartomány ki sem alakul, nem figyelhető meg.

## 6.2. Az egyenlő tengelyű dendrites tartomány kialakulása szilárd oldatos ötvözetek ötvényeiben

A finom dendrites tartomány tárgyalásakor az ötvény lehülési viszonyai-ból, és a kéregnövekedési törvényből kiindulva értelmeztük a finom dendrit-ek növekedési feltételeit. Ugyanezt a gondolatmenetet követtük az egyenlő tengelyű dendrites tartomány kialakulásának tárgyalásakor is, figyelembe véve, hogy a részletesen tárgyalt oszlopos dendrites tartományban már csökkenő  $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x_{CS}}$

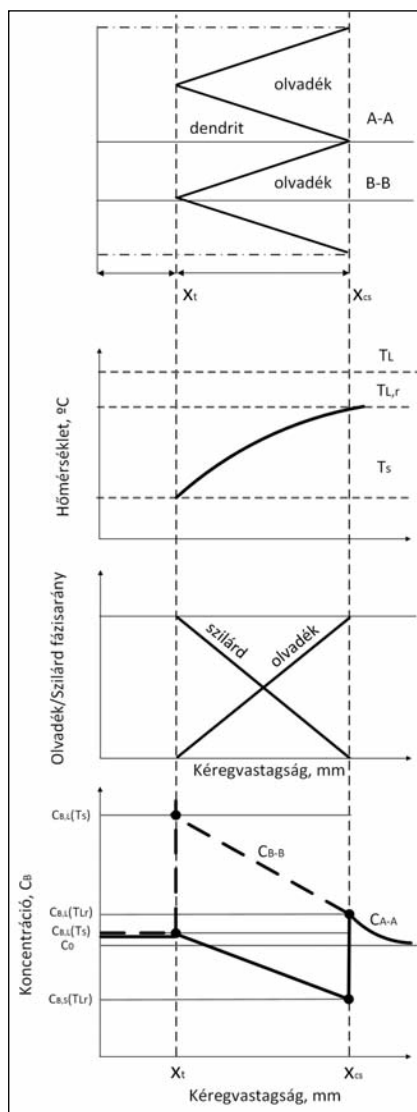
hőmérséklet és

ezután csökkenő  $\left(\frac{\partial T_L}{\partial x}\right)_{x_{CS}}$

likvidusz hőmérsékleti gradienssel kell számolni. Ugyanakkor a dendrit-csúcs görbüeti sugarának növekedésével a  $T_{L,r}$  és a  $T_L$  hőmérsékletek közötti különbség is csökken, sőt ez a különbség meg is szűnhet. Természetesen a  $T_L - x$  görbének a  $T - x$  görbe felett kell futnia.

Az oszlopos dendritek növekedésének későbbi szakaszában – ami egyúttal megfelel egy, az ötvény középvonalához közelebb eső tartománynak – a  $T - x$  görbe kezdeti szakasza egyre laposabb lesz, hasonlóan a  $T_L - x$  görbéhez. A két görbe egymáshoz viszonyított helyzete azonban nem változik, a viszonylag széles tartományban kialakul az összetéti túlhűlés, vagyis a dendrit-növekedés feltétele. Mértéke és az azzal arányos  $\Delta G$  szabadentalpia-különbség a dermedési fronttól mért távolság függvényében csak kis mértékben változik. Ez a körülmény az oszlopos dendritek és így a kéreg csökkenő növekedési sebességében is megmutatkozik, összhangban a négyzetgyökös kéregnövekedési törvénnyel.

Az oszlopos dendritek növekedésének befejeződését az jelenti vagy jelentené, ha a dermedési front előtt, a dendrit csúcsával érintkező olvadék összetétele  $c_0$ -t eléri, vagyis a front előtt nincs koncentrációgradiens. Erre lehetőséget teremt a rendelkez-



■ 12. ábra. A hőmérsékleti, a koncentrációs és fázisarány változása a dendrit-törzs ( $x_i$ ) és a dendritcsúcs ( $x_{cs}$ ) közötti tartományban

zésre álló idő fokozódó hosszabbodása. Az egyenlő tengelyű dendrites tartomány kialakulásának feltételrendszerét a 14. ábra foglalja össze.

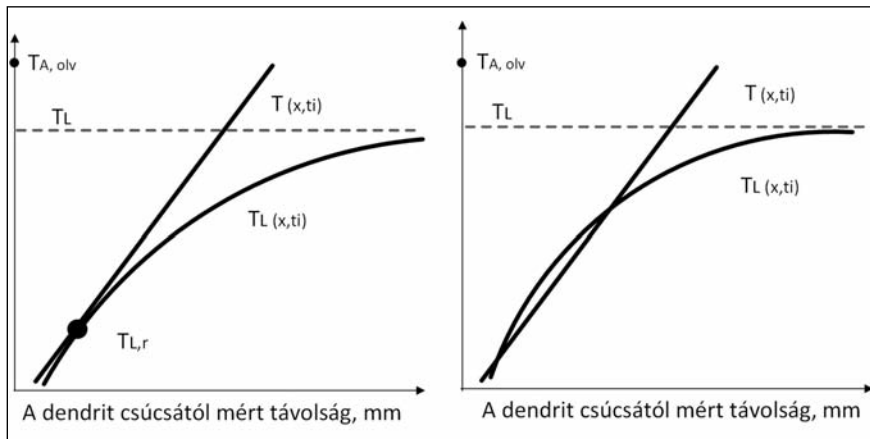
Összefoglalva megállapíthatjuk tehát, hogy az ötvény anyagának lehülése következtében folyamatosan változó termikus és összetéti viszonyok miatt az öntött szövet három jellegzetes tartománya közötti átmenet feltételrendszere olyan egzakt módon nem definiálható, mint a tiszta fémek ötvényeiben. A termikus túlhűlés csak a finom dendritek csíráinak létrejöttében jut szerephez. A csírák növekedését már az összetéti túlhűlés irányítja, az oszlopos dendritek közvetlenül ránőhetnek a finom dendritek anyagára. Ezzel magyarázható a finom dendrites tartomány esetenkénti teljes hiánya.

Az oszlopos dendritek növekedésének feltétele elvileg csak végtelen hosszú idő vagy végtelen lassú lehülés esetén szűnhet meg. Ez abban nyilvánul meg, hogy gyakorlati esetben az ötvény középvonaláig nőnek, ott koncentrálnak a fogyási üreget. Az egyenlő tengelyű tartomány kialakulását így egyéb tényezőkben kell keresnünk. Ezek lehetnek dúsulási és áramlási jelenségek, illetve idegen részecskéknek – például zárványoknak – a növekvő dendritek előtti térben való megjelenése.

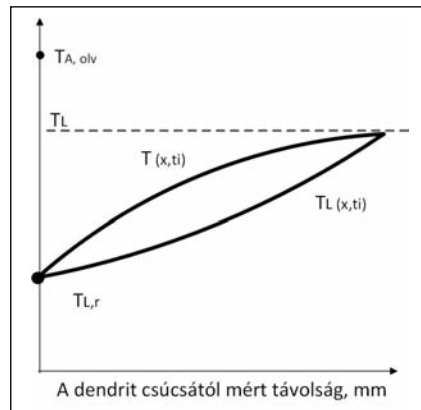
## 7. Összefoglalás

Cikkünknek – az előző és a színtételek dermedési folyamataival foglalkozó cikkünkhöz hasonlóan – alapgondolata az, hogy a dermedés folyamatát az ötvényben kialakuló lehülési viszonyokkal összefüggésben szabad csak tárgyalni. Ennek megfelelően a szilárd oldatos ötvözetek ötvényeinek dermedési folyamatát a szilárd kéreg időbeli növekedését leíró négyzetgyökös törvényszerűsége alapozva, abból kiindulva tárgyaltuk. A szilárd oldatos ötvözetek dermedésekor érvényesülő és figyelembe veendő sajátosságok a következők:

- A tényleges helyzetnek megfelelően megkülönböztettük a dendrit-csúcs és a dendrittörzs helyzetének időbeli változását leíró függvénykapcsolatot.
- Figyelembe vettük, hogy az ötvény adott pontjában a dermedés hőmérsékletközben, mégpedig a dendritcsúcs görbüeti sugara által befolyásolt likvidusz-hőmérséklet és a mindenkor szolidusz-hőmérséklet között játszódik le.
- A kéregnövekedési és a lehülési görbe ismeretében megszerkeszthető a  $T = T(x, t_i)$  görbesereg, vagyis megadható a dermedési folyamat kezdetétől számított adott időpillanatban az ötvözet hőmérsékletének az ötvény falától mért távolság függvényében való változása. Azt is feltételezzük, hogy az ötvény középvonalában a görbesereg egyes tagjainak az érintője vízszintes.
- A  $T = T(x, t_i)$  görbesereg és az adott szilárd oldatos ötvözetek egyensú-



■ 13. ábra. Az ötvözet tényleges és az olvadék lokális összetétele által meghatározott likvidusz hőmérsékletének változása a szilárd/olvadék határfelülettől mért távolság függvényében a kokillával való érintkezés kezdetén: a) Az extrém gyors lehűlés esete → nincs összetételi túlhűlés; b) Gyors lehűlés esete → az összetételi túlhűlés kialakulásának kezdete



■ 14. ábra. Az ötvözet tényleges hőmérsékletének és az olvadék lokális összetétele által meghatározott likvidusz hőmérsékletének változása az oszlopos dendriték csúcsa előtti térben az öntvény dermedésének befejező szakaszában

lyi fázisdiagramjának a szilárd oldat dermedésére vonatkozó részletének segítségével felrajzolható az ötvözőfém koncentrációjának a dendritcsúcs előtti olvadékban való változását jellemző görbe, vagyis a  $c = c(x, t_i)$  kapcsolat. A dendrit csúcsánál az olvadék összetétele a dendritcsúcs görbületi sugara által meghatározott túlhűlési mérték alapján az egyensúlyi diagramból olvasható ki, míg a dendritcsúcsból távolabb az olvadék ötvözőfém-tartalma  $c_0$ -val egyenlő.

– A  $c = c(x, t_i)$  görbe jellege által, vagyis az olvadék összetétele által meghatározott  $T_L$  likvidusz-hőmérséklet

és a  $T = T(x, t_i)$  görbék által meghatározott, az ötvözet tényleges hőmérsékletének  $x$  szerinti változását leíró görbék által definiált hőmérsékletkülönbség adja meg az összetételi túlhűlés mértékét, és ezzel együtt az összetételi túlhűlés által irányított dermedés  $\Delta G$  hajtóerejét.

A bemutatott összefüggérendszer a szilárd oldatos ötvözetek öntvényeinek dermedési folyamataival kapcsolatban számos, a korábbi megközelítési módokból nehezen értelmezhető kérdésre is választ ad. A tiszta fémek és a szilárd oldatos ötvözetek öntvényeiben lejátszódó dermedési folyamat tárgyalásakor alkalmazott megkö-

zelítés kiterjeszhető az eutektikus és a peritektikus ötvözetekre is.

#### Irodalom

- [1] Verő B. és társai: Tiszta fémek öntvényeinek dermedése. BKL Kohászat, 2016. 149. évf. 5–6. sz.
- [2] Verő József – Káldor Mihály: Fémtan, Tankönyvkiadó Budapest, 1977, ISBN 963 17 1798 4, 223–244. old.
- [3] Eckstein, H. J.: Wärmebehandlung von Stahl, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie – Leipzig, 1969. VLN 152-915/24/69. Abschnitt 4. 118–144. old.

CSEPELI ZSOLT

## Autóipari felhasználásra gyártott, melegen hengerelt acélok szilárdságának növelése nanoméretű kiválásokkal

### Bevezetés

Az autóiparban használt acéloknak gyakran egyszerre kell nagy szilárdságúnak és kiváló szívósságúnak lenniük. Az alkatrészek gyártásakor az acéllemezeknek komplex alakváltozást is el kell viselniük, ezért a nyújtvahúzás és a mélyhúzás által támasztott követelményeknek is meg kell felelniük. A DP és TRIP acélokat

nagymértékű szakadási nyúlás jellemzi, azonban kevésbé alkalmasak a gépjárműiparban gyakran alkalmazott lyuktágítással járó megmunkálásra. Ennek oka, hogy lyuktágításkor könnyen keletkezik repedés a DP és TRIP acéloknak egymás mellett levő, nagymértékben különböző keménységű fázisok határfelületén. Az inhomogén szövetszerkezet okozta problémát bénites szövetszerkezetű acé-

lok fejlesztésével próbálták csökkenteni, azonban a nagy szilárdságú minőségeknél a lyuktágító vizsgálatok eredménye a bénites acéloknál sem volt megfelelő [1]. Újabb kutatási eredmények azt mutatják, hogy az ausztenit és ferrit határfelületén nanoméretű kiválások létrehozásával ipari körülmények között is gyárthatók olyan acélok, melyek a jelenleg használt minőségeknél jobban meg-