Folyamatosan öntött lemezbugák középvonali dúsulása és következményei

MTA doktori értekezés

Írta dr. habil. Réger Mihály

Budapest 2010

Tartalomjegyzék

		oldal
	Summary	4
1.	Bevezetés, célkitűzés	5
2. 2.1 2.2 2.3 2.4	Az öntött szál termikus modellje és az ebből származtatott jellemzők A termikus modell A hőtani modell ellenőrzése A termikus modellből származtatott további jellemzők Összefoglalás	11 12 18 21 25
	Hivatkozások A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk	26 26
3. 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6	A porozitás szerepe a középvonali dúsulás jelenségében Makrodúsulás és középvonali dúsulás A középvonali dúsulás domináns folyamatai A középvonali dúsulás az ipari adatok tükrében Az LMI modell és alkalmazása Az eredmények értékelése Összefoglalás Hivatkozások A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk	28 30 31 33 36 41 42 44 44
4. 4.1 4.2 4.3	Olvadékáramlás a mushy szakaszon A dendritek közötti olvadék jellemzése Az áramlási viszonyok jellemzése az öntött szál mushy szakaszában Összefoglalás: a relatív sebesség alapján történő minősítés lehetőségei Hivatkozások A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk	46 47 54 54 55 55
5. 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6	A porozitási és a sebesség-eloszlási függvények alkalmazása A résméret csökkenési ütemének hatása Anomáliák a résméretben A támgörgők excentricitásának hatása Kihajlás a támgörgők között Összetett, kombinált helyzetek vizsgálata Összefoglalás: a modellezési eredmények alapján megfogalmazható következtetések A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk	56 56 63 68 76 79 86 90
6. 6.1	A középvonali dúsulás stabilitása Előzmények	92 92

2

6.2	Kísérleti munka	93		
6.3	A kísérleti módszer alkalmazhatóságának ellenőrzése			
6.4	A mangán koncentráció különbség hatása: az "E" jelű minta vizsgálati eredményei			
6.5	Az eredmények értelmezése, azeffektív" diffúziós tényező bevezetése			
6.6	Karbon, keménység és szövetelem eloszlások nem egyenletes mangáneloszlás 1 esetén			
67	Összefoglalás	107		
0.17	Hivatkozások	107		
	A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk	107		
7.	Összefoglalás	109		
8.	A kutatási munka eredményeként megfogalmazható új tudományos eredmények, tézisek	113		
9.	Az új tudományos eredmények hasznosítása	116		
	Az új tudományos eredményeket tartalmazó publikációk	117		
	Jelölések listája	119		
	Malláklatak			
A0	A Mannesmann cégcsoportnál a középvonali dúsuslás mértékének besorolására szolgáló mintakén sorozat			
Δ1	A Liquid Motion Intensity (LMI) modell leírása	122		
A2	Az öntött szál és a benne lévő olvadék közötti relatív sebességkülönbség			
٨2	A karban aktivitás számításán alanulá diffúziás modall laírása	122		
АJ	A karoon akuvnas szannasan alapulo untuzios mouen ienasa	133		

Summary

Formation and Consequences of Centerline Segregation in Continuously Cast Slabs

The continuous casting of slabs is aimed at producing a product with a proper chemical composition, geometry and surface quality, without any external or internal defects. One of the most unpredictable defects of the slabs is centerline segregation, which has a negative effect on further processing of the slabs and on the possible uses of the final products. Since the full complexity and the most common problem areas of continuous casting are typically present in the formation of centerline segregation, in this paper I am focusing on the formation of this defect and on research investigating possible ways of how to eliminate such defects. In the past ten years most research has been related, in a direct or indirect way, to the formation of centerline segregation. In addition, the findings of individual research projects can be interpreted by themselves too and can provide a great deal of useful, theoretical or practical, information.

Working out a reliable thermal model of the cast slab is a basic requirement for controlling the processes (e.g. developing a strategy of how to decrease centerline segregation or introducing a soft reduction technology). In Chapter 2 I am going to give a brief summary of the major achievements in this field in the past few years.

In the light of previous experience and of references in the literature it can be stated with certainity that solidification shrinkage porosity accompanying crystallization also contributes to the formation of centerline segregation. In many cases, micropores formed during the crystallization process can be observed in the centerline of the hot rolled products too. From this aspect, the size of the cluster of the shrinkage pores formed during the solidification of the slab and the conditions under which such a porosity is developed are of primary importance. This is discussed, on the basis of a comprehensive analysis of statistical data, in Chapter 3. From our analysis the following important conclusion can be drawn: after reaching a certain solid/liquid ratio in the section of the slab, practically no more liquid will be supplied.

If we accept the fact that free liquid movement ceases whenever a certain solid/liquid ratio has been reached, we can use the model (containing, of course, a number of simplifications and assumptions) described in Chapter 4 to make an estimate of the flow direction and of the intensity of the liquid flow in the upper part of the mushy section.

Chapter 5 discusses eventual applications of the described models under continuous casting conditions. Calculations show that centerline segregation is basically affected, at a given composition and cooling technology, by the setting of the supporting rolls, by the accuracy of the strand (e.g. adjustment accuracy of the supporting rolls), by the rigidity of the supporting rolls as well as by the shape distortion of the supporting rolls (eccentricity or wear). Bulging of the strand between the supporting rolls can also play some role but its effect is secondary as compared to that of the factors listed above.

The consequences of centerline segregation formulated in the slab and its stability are discussed in Chapter 6. A calculation model based on the analysis of the carbon activity was worked out and used to describe the diffusion processes. The results obtained in this model are in compliance with the hardness and microstructure measurements.

1. Bevezetés, célkitűzés

A PhD fokozat megszerzése (1998) óta eltelt időszakban tudományos tevékenységem elsősorban az acélok folyamatos öntési technológiájára, illetve az ezzel kapcsolatos részjelenségekre összpontosult. A folyamatos öntés alapfolyamatával, a kristályosodással már a korábbi években is – igaz más nézőpontokból – foglalkoztam. Egyetemi doktori értekezésemben (1994) a folyamatos acélöntő gép kristályosítójában képződött szilárd kéreg vastagsági és mikroszerkezeti jellemzőit elemeztem abból a célból, hogy a kristályosítóban zajló és egyébként nagyon nehezen ellenőrizhető folyamatokról tisztább képet lehessen kapni. Az értekezés alapgondolata az a felismerés volt, hogy a kristályosítóban szilárduló kéreg vastagsági mérete és szerkezete magában hordozza a keletkezés körülményeire vonatkozó információkat. Ha adott kémiai összetétel esetén ismerjük a kristályosodási jellemzők (hűlési sebesség, hőmérsékleti gradiens) és a kristályosodási jellemzők eredményeként kialakuló dendrites szerkezet paraméterei (primer és szerkezet esetén következtetni lehet a mikroszerkezetel létrehozó kristályosodás paramétereire, vagyis a kristályosítóban kialakuló dermedési viszonyokra és azok időben történő változásaira.

Ez utóbbi megfigyelés, nevezetesen az, hogy a gyakorlati öntési folyamatokban a kristályosodási jellemzők értéke változik az idő függvényében, vezetett el a PhD munkám témájához, a tranziens kristályosodási folyamatok részletesebb elemzéséhez. A hazai és külföldi kutatók a kristálvosodási jellemzők és a dendrites szerkezet morfológiája közötti kapcsolat vizsgálata során - kevés kivételtől eltekintve - az állandósult kristályosodási viszonyok biztosítását tűzték ki célul, vagyis kísérleteik során a kristályosodási jellemzők értéke nem, vagy csak kismértékben függött az időtől. A folyamatos öntés gyakorlatában azonban a kristályosodási jellemzők értéke változik, még akkor is, ha az öntési jellemzők időben nem változnak. Az állandósult állapotú (időben nem változó, stacioner) öntési viszonyok nem állandósult állapotú (instacioner) kristályosodási viszonyokat eredményeznek, hiszen a kristályosodási front folyamatosan változtatja a helyzetét az egyébként (normál körülmények között) állandósult állapotú hőmérsékleti mezőben. A folyamatos öntés gyakorlatában ráadásul a hőmérsékleti mező is megváltozhat, ha például valamilyen okból be kell avatkozni az öntési folyamatba (lassítás, gyorsítás, öntési hőmérséklet változása, stb.), ennek következtében nem állandósult állapotú öntési viszonyok kialakulásával lehet számolni. (Az elmondottak szerint tehát ezt meg kell különböztetni a nem állandósult állapotú kristályosodás fogalmától.) Természetesen, nem állandósult öntési körülmények között a dermedési fronton uralkodó kristályosodási viszonyok még jobban eltávolodnak az állandósult állapotú kristálvosodás feltételrendszerétől. A folvamatos öntés során tehát a dendrites szerkezet mindenképpen nem állandósult állapotú kristályosodási viszonyok eredményeként jön létre. A PhD munkám célja a nem állandósult állapotú körülmények közötti kristályosodás törvényszerűségeinek legalább részleges feltárása volt. A kísérleti munkát és az eredmények elemzését a nem állandósult állapotú kristálvosodási viszonyok egy speciális csoportjára, az un. tranziens esetekre vonatkozóan végeztem el. A tranziens viszonyokat két állandósult kristályosodási állapot közötti "ugrás" reprezentálta. Lényegében tehát egy jól definiált állandósult állapotból egy másik, szintén jól definiált állandósult állapotba való átmenet során a dendrites szerkezet változását (reakcióját) vizsgáltam és értékeltem. Mivel ezekben az esetekben a dendrites szerkezet időbeni változásának megfigyelése volt a feladat, így a kísérleti munkát átlátszó modellanyagon (succininitrile – aceton keverék) végeztem saját építésű, a tranziens kristályosítási viszonyokat reprodukálható módon megvalósítani képes kristálvosító berendezéssel.

Az elmúlt években a lemezbugák folyamatos öntésének komplex matematikai modellezési lehetőségeivel foglalkoztam és az értekezésemben már ezen újonnan választott szakterületen elért eredményeket ismertetem. A kutatási munkában – a kollégáimmal együtt – arra törekedtünk, hogy a folyamatos öntéssel kapcsolatos valós problémákra - megfelelő elméleti alapokon nyugvó matematikai modellek segítségével - a gyakorlatban is haszálható válaszokat tudjunk adni. A kutatási munka ipari hátterét az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. jelentette, ahol két – egyenként két-két szálas – vertikális lemezbuga öntőgép üzemel. Az ipari kollégákkal való szoros együttműködés és a velük folytatott folyamatos konzultáció tette lehetővé, hogy az öntés rendszerét és az azzal kapcsolatos problémákat megfelelő mélységben tudtuk megismerni. Ez volt az alapja annak, hogy a célnak megfelelő matematikai modellek kidolgozására sor kerülhetett. Az elmondottakból is következik, hogy a bemutatásra kerülő eredmények részben egy szakmai csapat hosszabb idejű közös munkájának a gyümölcse. Ezek közül igyekeztem csak azokat taglalni, melyek megalkotásában domináns szerepet játszottam, de a kutatási folyamat megvalósításában természetesen a kollektíva egésze vett részt (pl. a modellek működésének ellenőrzésében, kritikák és tanácsok megfogalmazásában, az üzemi kísérletek kivitelezésében, metallográfiai és egyéb vizsgálatok elvégzésében, ipari adatszolgáltatás megszervezésében, stb.). Ennek megfelelően és stilisztikai okokból is az eredmények taglalásakor a többes szám első személy használatát érzem indokoltnak. Ugyanakkor megkülönböztetett módon fogok utalni azokra a mások által elért eredményekre, illetve tevékenységekre, melyeket az érthetőség kedvéért nem volt célszerű kihagyni ebből az értekezésből.

A lemezbugák folyamatos öntésének célja megfelelő összetételű, geometriájú és felületű, külső és belső hibáktól mentes termék előállítása. Az acél lemezbugák egyik sajátos, nehezen befolyásolható és ellenőrizhető hibajelensége az un. középvonali dúsulás (középvonali szegregáció, centerline segregation), mely a lemezbuga további feldolgozását és a belőle készülő termék felhasználhatóságát rontja. A középvonali dúsulást tartalmazó lemezbugából hengerelt lemez – az erőteljes képlékeny alakítás ellenére is – módosult formában magában hordozza ezt a hibajelenséget. Az öröklődés eredményeként a lemez középső síkjában – a megelőző alakváltozás függvényében – néhány tized, illetve néhány mm vastagságban az alapanyagtól eltérő összetételű, szerkezetű és tulajdonságú anyagrész található, mely a forgácsolási, hegesztési és alakváltozási műveleteknél technológiai problémákat és hibajelenségeket (pl. felnyílás, repedés, a megmunkáló szerszám károsodása) okozhat. A tapasztalatok szerint a középvonali dúsulásból adódó kedvezőtlen anyagtulajdonságok utólagosan, pl. hőkezeléssel érdemben nem javíthatók.

Az elmondottakból következik, hogy a középvonali dúsulás mértékének befolyásolására csak az acélolvadék kristályosodása közben van lehetőség, vagyis a folyamatos öntés technológiájának kell biztosítania a hengerelt termékben a felhasználók számára elfogadható középvonali dúsulási szintet.

A doktori értekezésemben a középvonali dúsulás kialakulásának elméleti megközelítésével, illetve annak csökkentési lehetőségeivel kapcsolatos kutatási tevékenységet ismertetem. Az elmúlt több, mint tíz év kutatási munkája – közvetve, vagy közvetlenül – kapcsolatban áll a középvonali dúsulás kialakulásával, de az egyes részterületeken elért eredmények önmagukban is értelmezhetők.

A kutatómunkám alapvető célja a folyamatos acélöntés reális, gyakorlati viszonyai között a lemezbugában kialakuló középvonali dúsulás csökkentési lehetőségeinek feltárása, valamint ennek ismeretében a várható dúsulási mérték számszerűsíthető előrejelzése. A problémakör

reális viszonyok közötti megközelítéséhez szükséges az öntés folyamatát befolyásoló, ipari körülmények között működő hatások széleskörű ismerete és figyelembe vétele. Ezek közül kiemelendő az öntött szál szilárduló kérgét érő deformációs hatás, melynek eredményeként a szál belsejében térfogatváltozás jön létre és így az ott lévő olvadék áramlásra kényszerül. A kutatási tevékenység egyik alapvető célkitűzése ezen deformációs hatások korrekt figyelembevétele volt, mivel a tapasztalatok szerint a gyakorlati öntés feltételrendszerében ez a tényező befolyásolja leginkább és a legkevésbé kiszámítható módon az öntött lemezbugák belső minőségét. A teljes problémakör komplexitása miatt a feladat megoldásához többféle matematikai modell alkalmazása illetve kifejlesztése volt szükséges.

Az acélok folyamatos öntése világszerte széles körben alkalmazott tömeggyártási technológia, ennek ellenére a komplex folyamat leírása, matematikai modellezése, a termékminőség előrejelzése a jelenlegi ismereteink alapján közelítésekkel is csak nehezen valósítható meg. Ennek döntően az az oka, hogy az öntési folyamatban hőtani, áramlástani, dermedési, átalakulási, rugalmas és képlékeny alakváltozási, kúszási, stb. jelenségek kapcsolódnak össze és hatnak egymásra. A nehézségeket fokozza az a körülmény, hogy a folyamatosan öntött lemezbuga alakja, a vastagság, szélesség és hosszúság viszonyszámai a matematikai modellezés szempontjából nem kedvezőek. Az öntött szál öntési irányban vertikális gépeknél mintegy 10 méter, ívelt öntőgépeknél 25-30 méter hosszúságú, vastagsága 200-240 mm, szélessége pedig általában 800-1600 mm közötti. További nehézséget jelent a modellek által szolgáltatott eredmények ellenőrzése, mivel a kristályosodás egy kívülről nehezen vizsgálható rendszerben, a lemezbuga belsejében történik.

Ismereteink szerint az öntéstechnológiai paraméterek és a várható belső minőség közötti kapcsolatot megbízható módon előre jelző függvény, vagy matematikai módszer kidolgozása ezidáig egyetlen kutatóhelyen, illetve gyártóműben sem sikerült, még az öntés állandósult állapotára vonatkozóan sem. Részben ez a körülmény motiválta a kutatási feladatok megfogalmazását.

A kutatási munkában igyekeztünk minden olyan lényeges hatást figyelembe venni, mely állandósult és nem állandósult öntési viszonyok között befolyásolhatja az öntött termék minőségét, ezeket megpróbáltam szétválasztani és az egyedi hatástényezőket azonosítani. Több esetben – a megfelelő matematikai formalizmus, vagy megbízható numerikus számítási eljárások hiányában – empirikus módszerek alkalmazására kényszerültünk, elsősorban az egymással kölcsönhatásban álló folyamatok elemzésénél. Például az öntött szál dermedése, lehűlése kielégítő megbízhatósággal leírható a jelenleg ismert és alkalmazott módszerekkel, de abban az esetben, ha sor kerül az öntött szál deformációjára, alakváltozására, esetleg kúszására, akkor többnyire empirikus összefüggések bevezetése is szükséges. Ismereteink szerint nem készültek még el azok a kapcsolt modellek, melyek alkalmazásával – az öntött szál extrém geometriai viszonyaira vonatkozóan – a problémakörök kölcsönhatása kezelhető lenne. Ugyanakkor tudomásunk van arról, hogy több kutatóhelyen is foglalkoznak az összetett problémák kezelésének lehetőségeivel (pl. Archelor Research SA, Labein - Parque Tecnologico de Bizkaia), de az általuk fejlesztett modellek számunkra nem hozzáférhetők.

A problémakör vizsgálata esetenként olyan területet érint, mely elméleti szempontból sem tisztázott teljesen. A lemezbugák belső minősége szempontjából meghatározó jelentőségű pl. a likvidusz és szolidusz hőmérsékletközben (szilárd és olvadék fázist is tartalmazó mushy zóna) az acélolvadék viselkedése, tulajdonságai. Az ismeretek ezen a területen meglehetősen hiányosak, a mérési eredmények pedig sokszor ellentmondásosak, ahogy ezt R.G. Erdmann (University of Arizona, Department of Materials Science and Engineering) is összefoglalta a

"Permeability in the Mushy Zone" című átfogó előadásában a legutóbbi "Solidification and Gravity" konferencián [1.1]. Ez a példa egyúttal rávilágít az alkalmazott kutatás és az alapkutatás szoros kapcsolatára is.

A szakirodalom és a saját méréseink, tapasztalataink alapján a lemezbugák középvonali dúsulása részben a makrodúsulással, részben a megszilárduló olvadék zsugorodásával, apró fogyási üregek képződésével kapcsolatos jelenség. A középvonali dúsulás a folyamatos öntés során az öntött szál középvonali tartományában alakul ki, a kristályosodási és átalakulási (mikrodúsulás), olvadékáramlási folyamatok, valamint a kristályosodási zsugorodás kompenzálásához szükséges olvadék utánpótlás korlátozott lehetőségeinek függvényében. A középvonali szegregáció szempontjából azok a folyamatok meghatározóak, melyek a kristályosodó szál hosszának kb. utolsó harmadában történnek, ekkor a középvonalban a hőmérséklet a likvidusz hőmérséklet alatt van, vagyis a szál közepe a mushy (mushy szilárd + mushy olvadék) állapottal jellemezhető. A szál ezen részét a következőkben – a tárgyalás egyszerűsítése végett – mushy szakasznak nevezzük. A dendritek között már csak dúsult olvadék található, így bármely hatás (hűtési viszonyok, támgörgők beállításai, a szilárd kéreg támgörgők közötti kihasasodása, az un. kihajlás, stb.), mely olvadékmozgást eredményez, szükségképpen az öntött szál belsejében a dúsult olvadék áramláshoz és így makrodúsuláshoz vezet. (A szilárd kéreg ferrosztatikus nyomás okozta kihasasodásának jelensége a nem túl szerencsés kihajlás néven honosult meg a magyar szaknyelvben. A továbbiakban kihajláson ezt a deformációt értjük.) Lényeges, hogy a mushy zónában az olvadék keveredési és utánpótlási lehetősége drasztikusan csökken a szilárd fázis térfogatarányának növekedése függvényében. A dendritágak közötti zeg-zúgos rendszer áteresztő képessége (permeabilitása) lecsökken, így ebben a tartományban már csak korlátozott olvadék utánpótlás és keveredés lehetséges. Az olvadék utánpótlás lehetőségének csökkenése törvényszerűen fogyási üregek, un. mikrolunkerek keletkezését eredményezi, ez a középyonali dúsulás általánosságban megfigyelhető másik jellegzetessége. (Az olvadékmag redukciós eljárást a fenti hatások kompenzálására fejlesztették ki, sikeres alkalmazásához megfelelő gépészeti felépítésű öntőgép, valamint az összetétel és a technológiai paraméterek szigorú összehangolása szükséges.)

A középvonali dúsulással kapcsolatos egyik nehézség mindjárt magának a fogalomnak a illetve a konkrét középvonali dúsulási érték meghatározásának definíciójából, bizonytalanságából fakad. A szakirodalom ezt az elnevezést gyakorta használja, és a különböző kémiai elemek – egymástól eltérő – dúsulási mértékével (dúsulási hányados = koncentráció a középvonalban / átlagos koncentráció) jellemzi. Középvonali dúsulási értéket tehát meg lehet adni a karbonra, mangánra, kénre stb., de ezek számértékben nyilvánvalóan különbözőek. A szakcikkekben ismertetett vizsgálati módszer meglehetősen költségigényes, mivel sok kisméretű próba kimunkálását és részletes elemzését igényli, így az ipari gyakorlatban nem terjedt el. Az acélgyártók általában olcsóbb, gyorsabb és automatizálható eljárást alkalmaznak, ezek a módszerek viszont kevésbé megbízható információt szolgáltatnak a középvonali dúsulásról. Általában a lemezbugákból adott mennyiségenként kivágnak egy szeletet, megköszörülik, majd speciális módszerrel maratják (pl. mélymaratás, sósavas maratás nagyobb hőmérsékleten). Ezt követően, vagy a megmaródott anyagrész adott felületnagyságra eső aránya (képelemzési módszer alkalmazása), vagy saját etalonképekkel való összehasonlítás alapján a keresztmetszeten megállapítják a középvonali dúsulás mértékét (pl. Mannesmann cégcsoport etalonkép sorozata). A Baumann kénnyomat szerint történő minősítésre is lehet példát találni. Ezekkel módszerekkel a középvonali dúsulás megléte, illetve hiánya általában könnyen eldönthető, a mérték megítélése viszont meglehetősen szubjektív. A középvonali dúsulás meghatározására vonatkozó nemzetközileg elfogadott

egységes eljárás tehát nem alakult ki, az üzemek a saját gyakorlatuk és tapasztalataik szerint minősítik a termékeiket, illetve döntenek annak felhasználhatóságról.

A folyamatok kézbentartásának (így pl. a középvonali dúsulás csökkentését célzó stratégia kialakításának, vagy az olvadékmag redukciós technológia bevezetésének) alapvető feltétele az öntött szál megbízható hőtani modelljének kidolgozása. Az értekezés második fejezetében röviden összegzem az ezen a területen végzett több éves tevékenység főbb lépéseit. Ennek eredményeként elkészült az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. folyamatos öntőgépének hőtani működését leíró, üzemi kísérletekkel is ellenőrzött modellje. A tisztán hőtani alapokon nyugvó modellel az öntés számos alapvető jellemzője becsülhető (pl. tócsamélységek, gradiensek, hűlési sebességek) és ezek alapján további következtetések is levonhatók, pl. a mikroszerkezetre vonatkozóan (primer dendritág távolság, szekunder dendritág távolság, oszlopos-egyenlőtengelyű kristályosodás átmenete).

A középvonali dúsulás kialakulásában a kristályosodást kísérő zsugorodási mikroüregek szerepét már hangsúlyoztam. A belső minőség szempontjából döntő fontosságú, hogy milyen feltételek között és mekkora zsugorodási üreg halmaz keletkezik a lemezbuga dermedése során. Az értekezés harmadik fejezetében részletesen tárgyalom ezt a kérdéskört egy kiterjedt statisztikai elemzéssorozat eredményeire támaszkodva. Kifejlesztettem az un. olvadékmozgás intenzitási modellt (LMI, Liquid Motion Intensity Model), mely a lemezbuga dermedését kísérő természetes és kényszer alakváltozások, valamint a térfogatváltozások hatását is figyelembe veszi. A modell alkalmazásával sikerült relatíve erős korrelációs kapcsolatot megállapítani a zsugorodási üregek összmennyiségét jellemző számérték és az üzemi mérések során meghatározott középvonali dúsulási index között. A matematikai modell segítségével belátható, hogy a folyamatos öntés körülményei között a szabad olvadékáramlás (vagyis a kristályosodási zsugorodás kompenzálásához szükséges olvadék utánpótlásának lehetősége) a mushy zóna mintegy 30 %-os olvadéktartalmáig biztosított, e határérték alatt porozitás kialakulása valószínűsíthető. Ezen érték és a további zsugorodási és deformációs hatások alapján már becsülni lehet a kompenzálatlan zsugorodási üregek mennyiségét.

Ha feltételezzük, hogy a szabad olvadék utánpótlás a fent említett határérték elérésekor megszűnik, akkor a negyedik fejezetben bemutatott – természetesen számos egyszerűsítést és feltételezést is tartalmazó – modell segítségével a mushy zóna első szakaszában kialakuló olvadékáramlás irányának és nagyságának a becslésére is lehetőség kínálkozik. Ha a mushy tartomány ebben a szakaszban olvadékot szív be a felette lévő zónából, akkor a beáramló olvadék ötvözőkben és szennyezőkben bizonyosan dúsabb lesz, mint amilyen összetételű olvadék a kristályosodás (közel egyensúlyi koncentráció viszonyok közötti) folytatásához szükséges lenne. Ennek természetesen az ellenkezője is előfordulhat, a szálat vezető támgörgők ki is préselhetik a magrészben lévő olvadékot. A modell az olvadék szabad áramlásával jellemezhető mushy zóna hosszára vonatkozóan becslést ad az olvadék áramlás irányára és nagyságára vonatkozóan.

Az értekezés ötödik fejezete a bemutatott modellek gyakorlati alkalmazásának lehetőségeit elemzi állandósult (az öntési paraméterek az idő függvényében nem változnak) és nem állandósult (az öntési paraméterek az idő függvényében változnak) öntési viszonyokra vonatkozóan. A számítási tapasztalatok szerint a középvonali dúsulás kialakulását (adott összetétel és hűtési technológia esetén) alapvetően a támgörgők beállítása, a szálvezetés precizitása (pl. támgörgő beállítási pontossága, támgörgő merevsége) és a támgörgők alakhibája (pl. excentricitás, kopás) okozzák. Az öntött szálnak a támgörgők közötti kihasasodása (bulging) szintén szerepet játszhat, de ennek hatása az előző tényezőkhöz képest másodlagosnak tekinthető.

Az értekezés befejező része a lemezbugában már kialakult középvonali dúsulás következményeivel foglalkozik. A középvonali dúsulás termékminőséget befolyásoló hatása – és egyben a hengerelt termék belsejében való azonosíthatósága – a hengerelt lemez vastagságának is függvénye. Általánosságban kijelenthető, hogy minél vékonyabb a durvalemez (szalag), annál kevésbé rontja a minőséget a középvonali hibajelenség. A tapasztalatok szerint az utólagos hőkezelés, homogenizálás nem csökkenti érdemben a hengerelt termék középvonali dúsulását, és ez látszólag ellenmondásban van az egyszerű diffúziós modellek által szolgáltatott eredményekkel. Az értekezés erre a jelenségre, vagyis a középvonali dúsulás stabilitására vonatkozóan újfajta megközelítésből ad magyarázatot. A kísérleti munka során mesterséges középvonali dúsulást tartalmazó szendvics mintákat állítottunk elő, ezek hőkezelése és vizsgálata lehetőséget nyújtott a diffúziós folyamatokban az egyes elemek (pl. karbon és mangán) kölcsönhatásának különböző modellek alkalmazásával történő figyelembe vételére is. Ennek alapján újfajta, a karbon aktivitásának elemzésén alapuló számítási modellt dolgoztam ki. A keménységi és szövetszerkezeti eredmények jó összhangban vannak a modell által szolgáltatott értékekkel.

Hivatkozások

[1.1] Erdmann R. G., Poirier D.R., Hendrick A.G.: Permeability in the Mushy Zone, Materials Science Forum Vol. 649, pp. 399-408

2. Az öntött szál termikus modellje és az ebből származtatott jellemzők

Ebben a fejezetben a folyamatosan öntött szálat érő termikus hatások matematikai modellezésében elért eredményeket mutatom be. Az adott, egyedi öntőgépre vonatkozó, megbízható termikus modell megléte minden – a kristályosodás egyéb részfolyamatait leíró – modell kidolgozásának is alapfeltétele.

A folyamatos öntés hőtani modellezésének kezdetei a hetvenes évekre nyúlnak vissza. A témával foglalkozó újabb szakirodalomak esetében is megállapítható, hogy a hőtani modell kiindulópontként szolgál egyéb modellekhez. A következőkben ezek közül emelünk ki néhány olyan cikket, mely támpontnak vagy viszonyítási alapnak tekinthető az értekezésben ismertetett hőtani modell megítélése szempontjából.

El-Bealy [2.1] a hőtani modell részleteit is elemző átfogó munkájában feltételezi, hogy az öntési irányú, hővezetéssel terjedő hőmennyiség elenyésző a felületre merőleges hőelvonáshoz képest, így a három-dimenziós problémát két-dimenziósra egyszerűsíti. A kristályosodási látens hő felszabadulása kapcsán egyszerűsítést használ, a látens hő a szilárd fázison keresztül távozik, vagyis nincs konvekció. A sugárzás, a sűrűség változás hatását a számításokban figyelmen kívül hagyja. Ezen egyszerűsített modell alkalmazásával a támgörgők közötti kihasasodás (kihajlás) becslésére szolgáló modellt ismertet egy un. szilárd kéreg ellenállási tényező és az effektív szilárd kéreg vastagság fogalmának bevezetésével. El-Bealy munkája jó példa arra – az általunk is követett gyakorlatra –, hogy a termikus modell eredményeire épülő félig empírikus modellek bizonyos fokig helyettesíthetik – a bevezetésben említett apparátusok hiányában – a fizikailag és matematikailag megalapozott kapcsolt modelleket.

J.S. Ha és társai szintén a szekunder hűtés és a kihajlás kapcsolatát vizsgálták [2.2], egydimenziós, nem állandósult viszonyokra is érvényes hőátadási egyenlettel. A szekunder zónában minden támgörgőnél megkülönböztetik a támgörgőkkel való érintkezés, a vízhűtés tartományát, valamint a kettő közé eső, sugárzással jellemezhető szakaszt. Az ANSYS kereskedelmi szoftverrel számított kihajlás becsült értéke szolgált a hőtani modell validálására. Ez a cikk arra mutat példát, hogy sok esetben magának a hőtani modellnek az ellenőrzése sem oldható meg direkt módon, hanem csak a hőtani modell alapján becsült jellemzőkön keresztül – jelen esetben ez a kihajlás –, közvetve.

F. Kavicka és társai [2.3] a folyamatos öntés állandósult és nem állandósult állapotára vontkozó matematikai modelleket fejlesztettek ki. Nagy hangsúlyt fektettek a hűtőfúvókák geometriájától (szórásképétől), a vízmennyiségtől, a levegő nyomástól (víz-levegő fúvókák esetén), az elrendezési viszonyoktól és az öntési sebességtől függő felületi hőátadási együttható (HTC – heat transfer coefficient) eloszlásának meghatározására. A számítási eredmények W alakú olvadéktócsa kialakulását bizonyították, mely egyértelműen a hűtővíz eloszlás sajátosságaival magyarázható. A cikk alapján állítható, hogy a hűtőfúvókák megfelelő, realitást közelítő szórásképének ismerete elengedhetetlen a megbízható eredményeket szolgáltató hőtani modell megalkotásához.

A hőtan matematikai modellnek a folyamatos öntés optimalizálására való felhasználhatóságát demonstrálja C.A. Santos és társai munkája [2.4]. A tanulmány érdekessége, hogy kétdimenziós véges differencia módszert alkalmaznak a hőtani modell megalkotásához. Az optimalizációhoz hat feltételt, illetve feltétel rendszert definiálnak, a megoldás genetikus

algoritmussal történik. Az optimalizációs szempontrendszer meghatározása ebben az esetben csak a hőtani viszonyokra, illetve az abból levezetett technológiai alapjellemzőkre (pl. tócsamélység, felületi hőmérséklet a kiegyenesítés tartományában) terjed ki. Megjegyzendő ezzel kapcsolatban, hogy a COST 526 akció ("Automatic Process Optimization in Materials Technology" (APOMAT) Working Group 2 "Liquid-Solid Processing") – melynek munkájában volt szerencsém részt venni –, többek között szintén a folyamatos öntés optimalizációjának kérdésével foglalkozott. A szakmai bizottság közös véleményeként az fogalmazódott meg, hogy a teljes technológiai folyamatra kiterjedő optimalizálást (pl. a felületi repedésérzékenység, a középvonali dúsulás csökkentését célzó optimalizálás) – a tulajdonságokat kielégítően előre jelző modellek hiánya akadályozza.

Végezetül két RFCS (Research Fund for Coal and Steel, korábban ECSC) projektet említünk meg [2.5, 2.6]. Mindkettő a folyamatos öntés matematikai modellezésének élvonalába tartozó európai kutatóhelyek és acélművek együttműködésében megvalósult kutatási projekt eredményeit mutatja be. A tanulmányokban több példát lehet találni a termikus és az olvadékáramlási modell összekapcsolására, de az elemzés csak az öntött szálnak azon részében valósítható meg, ahol a szál középvonalában még olvadék (nem pedig a kétfázisú mushy zóna) található. Ezen a ponton meg kell említeni az Európában elismert hírű, a folyamatos öntés termikus és áramlási folyamatainak modellezésére ajánlott CALCOM szoftvert, mely szintén a tiszta olvadékok tartalmazó tartományban kialakuló viszonyok előrejelzésére hivatott. Ezek a szoftverek, modellek elsősorban a beömlés következtében a kristályosító környezetében kialakuló áramlás feltérképezésére alkalmasak, és nem használhatók a – középvonali dúsulás szempontjából kiemelkedő jelentőségű – mushy szakaszon kialakuló olvadékmozgás becslésére.

Ugyancsak lehet példát találni az RFCS tanulmányokban a termikus és mechanikai, sőt esetenként áramlási modellek összekapcsolására. A Labein (Parque Tecnologico de Bizkaia) által kifejlesztett hármas kapcsolt modell a kristályosító falában és a szilárd kéregben uralkodó feszültségek, zsugorodások és alakváltozások nyomon követésére alkalmas, melynek alapján a kristályosító és a szilárd kéreg közötti hőátadási viszonyok becsülhetők. Hasonló célból kapcsolták össze az ABAQUS és a FLUENT szoftvereket. A jelenleg futó "DEFFREE" "Integrated models for defect free casting" című (European Comission, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel) projekt megvalósításában a Helsinki University of Technology (FI), a Centro Sviluppo Materiali SpA (IT), a Betriebsforschungsinstitut (DE), a Cogne Acciai Speciali SpA (IT), a duferco La Louvière S.A. (BE) és az ISD DUNAFERR Dunai Vasmű Zrt. (HU) mellett a Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kara is részt vesz. A projekt szakmai kidolgozásában, ez utóbbi intézményt én képviselem. A tevékenység célja – többek között – a középvonali dúsulás becslésére szolgáló integrált modell kifejlesztése.

2.1 A termikus modell

Az előző fejezetből kitűnik, hogy a folyamatos öntés hőtechnikai modellezésének megbízható matematikai és szoftveres hátterét lényegében teljesen kidolgozták az elmúlt két évtizedben. A dermedési folyamat – mely az alkalmazott primer és szekunder hűtés eredményeként az öntött szál szilárd kérge fokozatosan vastagodik – korrekt matematikai leírása érdekében termikus szempontból az alábbi két kérdéskör matematikai kezelésének megoldása szükséges:

• az olvadt és szilárd állapotú fém termikus viselkedés szempontjából lényeges jellemzőinek és ezek hőmérsékletfüggésének ismerete, valamint

• az öntött szál felületét érő hűtőhatások megfelelő figyelembevétele és ezek alapján a hőmérsékleti mező és a kristályosodás előrehaladásának meghatározása.

A matematikai modellezéshez két – a kívánalmaknak megfelelő – alapszoftvert szereztünk be, mindkettő fejlesztését a Helsinki University of Technology Department of Metallurgy munkatársai koordinálták. Az IDS (Interdendritic Solidification) szoftver az acélok hőmérsékletfüggő fizikai jellemzőinek meghatározására szolgál a kémiai összetétel függvényében, és ez utóbbi tekintetében nagyjából lefedi az ISD DUNAFERR Dunai Vasmű Zrt.-ben gyártott acélok választékát. A számítások elméleti alapjai és a gyakorlati alkalmazás részletei megtalálhatók [2.7,2.8] tanulmányokban. A szoftver az Fe-C-X_i több komponensű rendszerre vonatkozóan, egyensúlyi, közel egyensúlyi, vagy nem egyensúlyi viszonyokra érvényes feltételek között a kristályosodási folyamat részletes elemzését, valamint a fizikai, hőtani jellemzők értékét, illetve azok hőmérsékletfüggését szolgáltatja eredményül.

A folyamatos öntés során a primer és szekunder hűtési viszonyok okozta változások meghatározására a TEMPSIMU szoftvert alkalmaztuk [2.9, 2.10]. Ez a szoftver a folyamatos öntés állandósult állapotára vonatkozóan (amikor az öntési paraméterek az idő függvényében nem változnak) lehetőséget ad az öntött szálban kialakuló hőmérséklet-eloszlás és ennek alapján a kristályosodás előre haladásának meghatározására az öntött acél éppen aktuális termikus jellemzőinek figyelembe vétele mellett. A TEMPSIMU alapszoftver az öntött szálat az öntési irányra merőlegesen két-dimenziós szeletekre osztja és az egyes szeletekre végeselemes módszert alkalmaz a hőmérsékletmező meghatározására. Az [2.1] hivatkozásban foglaltakhoz hasonlóan a TEMPSIMU is elhanyagolja az öntési irányba eső hőtranszportot, de támgörgők és hűtőfúvókák környezetében megkülönbözteti az érintkezési, vízhűtési és sugárzási szakaszt. Időközben elkészült a TEMPS3D szoftver is, mely a két-dimenziós szeletekre adódott megoldáshalmazból megfelelő korrekciókkal három-dimenziós megoldást állít elő. A jelen összefoglalóban ismertetett összes számítás a három-dimenziós korrigált eredményekre épül. Megjegyzendő, hogy a két-dimenziós és a három-dimenziós megoldás szinte minden eredményében nagyon közel áll egymáshoz, vagyis az axiális hőtranszport első közelítésben ténylegesen elhanyagolható. Lényegében egyetlen jellemző értéke változik meg érzékelhetően a korrekció eredményeként: az öntött szálon belül a likvidusz hőmérséklet pozíciója, vagyis a likviduszra értelmezett kristályosodási front helyzete. A TEMPS3D adataira épül a CASIM3D szoftver, ez a nem állandósult viszonyok elemzésére és előre jelzésére szolgál. Az elmúlt évek során kiterjedten foglalkoztam a nem állandósult viszonyok vizsgálatával is, de ennek bemutatására – terjedelmi okok miatt – az értekezésben nem térek ki.

A termikus modellel kapcsolatos saját kutató-fejlesztő tevékenység a fenti kereskedelmi szoftvereknek egy adott öntőgépre, illetve technológiára való adaptálását, illetve a modell által szolgáltatott eredmények ellenőrzését jelentette. A kutatási tevékenység menetét és főbb eredményeit az [S.2.1-S.2.5] publikációkban ismertettük.

A matematikai modellezésből adódó eredmények megbízhatóságának egyik sarokpontja a szoftver megfelelő, az adott öntőgép működését reprezentáló bemeneti adatokkal való feltöltése (a szükséges adattípusok definiálása, az üzemi adatok összegyűjtése, feldolgozása, a szoftverhez illeszkedő input adatstruktúra létrehozása, stb.). A modell alkalmazásának bevezetése, a bemenő adatok előkészítése, rendszerezése, felülvizsgálata alapvetően az én feladatom volt. A következő felsorolás definiálja a modellezéshez szükséges bemeneti adathalmaz műszaki tartalmát.

- Az öntőgép felépítése, a kristályosítók méretei, támgörgők elhelyezkedése, azok típusa, mérete, hűtőfúvókák elhelyezkedése, azok típusa (az üzemi adatok bekérése, ellenőrzése, értelmezése, feldolgozása),
- az egyedi hűtőfúvókák vízeloszlási képe (fellelhető katalógus adatok és vízeloszlás mérések kiértékelése alapján a relatív hűtési vízeloszlási függvények meghatározása minden hűtőfúvóka típusra),
- hűtőfúvóka sorok vízeloszlási képe (az egyedi fúvókák relatív vízeloszlásának megfelelő variációkban történő összegzése),
- zónánkénti és soronkénti vízmennyiség eloszlás, primer köri hűtővíz mennyiség (a szekunder hűtési stratégiák és technológiai megoldások matematikai megfogalmazása),
- egyéb technológiai adatok pl. túlhevítés, öntési sebesség, hűtési intenzitás eloszlás a kristályosítón belül (a öntési gyakorlatban előforduló esetekre vonatkozó alapadatok rendszerezése, elemzése, tipizálása),
- modellezési adatok: lemezbuga méret adatok, hálófelosztás a széles és a keskeny oldal mentén (a gyakorlatban előforduló bugatípusokra az előzetes számítási tapasztalatok alapján az optimális hálóosztás meghatározása),
- tesztfuttatások eredményeinek értelmezése (a számítások elvégzése, szükséges korrekciók elvégzése, stb.).

A valós viszonyokat közelítő bemenő adatsorok pontosítása több lépésben, a tesztfuttatások és a korrekciók egymást követő ciklusaiban alakult ki. E folyamat eredményeképpen végezetül előállt a hétféle lemezbuga méretre vonatkozó bemeneti adatsor halmaz.

A termikus folyamatok matematikai modellezési eredményeit néhány jellegzetes példán keresztül mutatom be. Tekintsük először a 2.1 ábrát, mely definiálja az eredmények értelmezéséhez szükséges megfelelő koordináta tengelyeket. A lemezbuga dermedésének nyomon követéséhez a szimmetriák miatt elegendő a térfogat egynegyed részében történő folyamatok modellezése (sötétszürke tartomány az ábrán).



2.1 ábra Vázlat a lemezbuga modellezéséhez

A szekunder vízhűtés, valamint a geometriai adatok birtokában leírhatóvá vált a szál dermedését alapvetően befolyásoló szekunder hűtővíz eloszlás. A 2.2 ábra a lemezbuga széles oldalának felére, az öntött szálnak a meniszkusztól számított 2 és 4 méter közé eső szakaszára vonatkozóan mutatja be – példaként – a lemezbuga felületére jutó fajlagos szekunder hűtővíz mennyiség eloszlását.



2.2 ábra Hűtővíz eloszlás a széles oldalon 2 és 4 méter között (0 = sarok pozíció, 650 = széles oldal középvonala)

A bemenő adathalmaz birtokában a hétféle bugaméretre és tetszőlegesen – de bizonyos korlátok között – megadott öntési paraméterek mellett meghatározható a lemezbuga teljes (3D-s) hőmérséklet-eloszlása. A hőmérsékleti adatokból közvetlenül az alábbi gyakorlati jellemzők származtathatók:

- felületi hőmérséklet-eloszlás hosszirányban (öntési irányban) a következő pozíciókban: széles oldal középvonala, keskeny oldal középvonala, sarok,
- hőmérséklet-eloszlás hosszirányban a lemezbuga szimmetriatengelyében,
- szilárd kéreg vastagsága (likvidusz és szolidusz hőmérsékletek pozíciója) hosszirányban a széles oldal középvonalának pozíciójában,
- felületi hőmérséklet-eloszlás a meniszkusz szinttől adott távolságra a széles és a keskeny oldalon keresztirányban,
- szilárd kéreg vastagsága (likvidusz és szolidusz hőmérsékletek pozíciója) a lemezbuga keresztmetszetében adott távolságra a meniszkusz szinttől.

A fentiek közül példaként a felületi hőmérséklet-eloszlást és a szilárd kéreg növekedését illusztrálja a 2.3 és a 2.4 ábra.





2.3 ábra Az öntött szál jellegzetes pontjaira számított hőmérsékletek a meniszkusztól számított távolság függvényében



2.4 ábra A szilárd kéreg növekedése a széles oldal szimmetria síkjában a meniszkusztól számított távolság függvényében

A termikus folyamat matematikai modellezésének egyik első eredménye annak felismerése volt, hogy a kristályosodás nem a lemezbuga középvonalában, hanem a keskeny oldalak közelében, szimmetrikusan két zónában fejeződik be. W alakú olvadéktócsa előfordulását a szakirodalom is említi [2.3]. A jelenség azzal magyarázható, hogy a buga középvonalát fajlagosan nagyobb vízmennyiség éri, mint a széles oldal szélső, a keskeny oldalakhoz közelebb fekvő tartományait. Ennek eredményeképpen a szolidusz hőmérséklet (vagyis az

olvadéktócsa alakja) a keresztmetszetben "W" formációt mutat, mely egyenes következménye az ilyen jellegű széles oldali kereszt- és hosszirányú hűtési intenzitás eloszlásnak.

A széles oldal menti és az öntési irányú fajlagos hűtővíz eloszlás tekintetében a fenti okok miatt részletesebb elemzést is végeztünk. A 2.5 ábra az egyedi hűtőfúvóka sorokon a lemezbuga felületére jutó összegzett szekunder hűtővíz eloszlás alakulását ábrázolja. Lényegesen nem változik a hűtővíz eloszlás képe a szélesebb lemezbugák öntése során alkalmazott kiegészítő hűtőkeretek (A és B) működésével sem (2.6 ábra), a hűtővíz zöme a középvonali tartományra jut. Egy tipikus, a lemezbuga hosszirányára meghatározott (öntési irány) szekunder hűtővíz eloszlási kép látható a 2.7 ábrán. Az elemzés és a modellezés egyik hosszútávú célja a bemutatott szekunder hűtővíz eloszlás és az olvadéktócsa alakja közötti kapcsolat feltárása, ezen keresztül az "U" tócsaalak megközelítéséhez szükséges feltételrendszer definiálása. A termikus modell alapján ez a kérdés elvileg megválaszolható, de mint az világosan kiderül a későbbi fejezetekből, emellett egy sor egyéb korlátozó szempont figyelembe vétele is szükséges.



2.5 ábra Az egyedi fúvókasorokon kilépő hűtővíz mennyiségek összegzett eloszlási függvénye

Összefoglalva elmondható, hogy a kristályosodási folyamat termikus modellezésének eredményeként a technológiára vonatkozó ismeretek bővültek, rendszereződtek. A szál belsejében lezajló kristályosodás hőtani jellegzetességei tisztázódtak és lehetőség nyílt az öntési teljesítményt behatároló jellemző, az olvadéktócsa mélységének az eddigieknél pontosabb becslésére. A termikus folyamatok modellezése – azon kívül, hogy az egyéb részfolyamatok modellezésének alapját is jelenti – erőteljesen támogatta az öntési technológia felülvizsgálatát célzó üzemi fejlesztéseket is. Ennek keretében került sor – többek közt a részvételemmel – a teljes öntési spektrum áttekintésére, melynek eredményeképpen átlagosan mintegy 15 %-al növelhetővé vált az öntési teljesítmény [S1.6]. Ugyanakkor a modellezési eremények kijelölték azokat az irányokat és beavatkozási pontokat, amelyeken keresztül további fejlesztések is megvalósíthatók.

dc_24_10



2.6 ábra Összegzett hűtővíz eloszlások a különböző bugaméretekhez tartozó hűtési rendszerekkel



2.7 ábra Öntési irányú hűtővíz mennyiség eloszlások a különböző bugaméretekhez tartozó hűtési rendszerekkel

2.2 A hőtani modell ellenőrzése

A folyamatos öntés technológiájának velejárója, hogy a kristályosodásra vonatkozó, közvetlenül lényegi információt szolgáltató mérési lehetőségek száma – és ezzel együtt a hőtani modell ellenőrzésének lehetősége is – igen korlátozott. Ez a megállapítás elsősorban a szilárd kéreg növekedési ütemének ellenőrizhetőségre vonatkozik, ugyanakkor az összes olyan folyamatra is érvényes, mely a lemezbuga szilárd kéreggel elzárt belsejében zajlik (pl. olvadékáramlás, makrodúsulás, porozitás képződés, belső hibák kialakulása, stb.). A lemezbuga külső felületének hőmérséklet mérése egyszerűbbnek és kivitelezhetőbbnek tűnik, de az öntött szálat támasztó támgörgők, a támgörgők közötti hűtővíz és gőz, valamint a felületi reve jelenléte a gyakorlatban megnehezíti a pontos és megbízható mérést. Ennek következtében minden ilyen jellegű mérés megvalósítása meglehetősen nehézkes és természetesen drága. Ezen a ponton utalunk az [2.2] hivatkozással kapcsolatosan már említett, a támgörgők közötti kihajlás mérésén keresztül végzett validálásra. (Megjegyzendő, hogy a kihajlás üzemi mérése komoly méréstechnikai problémákat vet fel.

A hőtani matematikai modell ellenőrzésére egy izotópos vizsgálatsorozat nyújtott lehetőséget, mely a szilárd kéreg növekedési ütemének meghatározását célozta. A szakirodalomban – ipari körülmények között végzett – hasonló méréssel nem találkoztunk. A mérés lényege, hogy adott időpillanatban a meniszkusz szintjén izotópot (foszfor) adagolnak az olvadéktócsába, melynek burkolata – előre tervezhető mélységben – a kapszula tartalmával együtt az acélolvadékban feloldódik. Az izotóppal szennyezett olvadék a kristályosodási frontig tud eljutni, de a kísérletek előtt nem volt világos, hogy a mushy zónába is be tud e hatolni, vagy sem. A lemezbugák keresztmetszeteinek utólagos vizsgálatával az izotóppal szennyezett és nem szennyezett anyagrész kontúrja, sőt a foszfor, mint nyomjelző használatának eredményeképpen a lemezbugák dendrites szerkezete is megállapítható az izotóppal szennyezett részen.

2001-ben a DUNAFERR Rt. Acélművek Kft.-je izotópos nyomjelzéses olvadéktócsa mélység mérési sorozatot rendelt meg az MTA Izotópkutató Intézetétől. Ezt a lehetőséget igyekeztünk maximálisan kihasználni a modell tesztelésére. A kísérletek során rögzítették az üzemi hőmérsékletmérő egység (line scanner) adatai is, mely – igaz, csak az utolsó támgörgő és az első húzóhenger között, vagyis a dermedési folyamat befejeződése után (11,3 m-re a meniszkusz szintje alatt) – méri a szálak keresztirányú hőmérséklet eloszlását. Ebben a munkában a kísérletre kiválasztott hat adag lemezbugáinak gyártási technológiai adatok alapján történő termikus modellezése, valamint a modellezési és mérési eredmények (elsősorban kéregvastagsági és felületi hőmérsékleti adatok) összevetése és értelmezése volt a feladatom.

Az izotópos vizsgálati adatok és а matematikai modellezés eredményeinek összehasonlításából adódó egyik fontos eldöntendő kérdés arra vonatkozott, hogy az olvadékban feloldódó izotóp milyen mértékben tud bejutni a kétfázisú pépnemű (mushy) zónába. Az izotópos felvételek és az eredmények előzetes elemzése alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy az izotóppal szennyezett olvadék határfelülete alapvetően a likvidusz hőmérsékletnek megfelelő határvonalat jelöli ki. Ennek eredménye az, hogy az izotópos mérések alapján 4-6 m közötti tócsamélység adódott, szemben a valódi, szoliduszra számított tócsamélység 8-11 m közötti értékével.

A termikus modell alapján meghatározott likvidusz hőmérséklet pozíciók jó egyezést mutatnak az izotópos mérési adatokkal. A 2.8 ábrán példaként bemutatjuk a 3. kísérletre vonatkozó eredményeket. Az ábrán a meniszkusz szinttől különböző távolságokban – az izotópos nyomjelzés alapján – meghatározott szilárd kéreg vastagsági adatok láthatók a termikus modell alapján számított – likviduszra és szoliduszra vonatkozó – kéregvastagság növekedési függvényekkel együtt.

Az izotóppal szennyezett lemezbugák keresztmetszetének vizsgálata lehetőséget nyújt a likvidusz felület, azaz a likviduszra számított kéregvastagság keresztirányú (öntési irányra merőleges) ellenőrzésére is. A szimmetriák miatt a modellezést elegendő a lemezbuga egynegyedére végezni (lásd 2.1 ábra), a lemezbuga keresztmetszetén viszont mind a négy negyed vizsgálható volt. Ennek eredményeként a 2.9 ábra egy számítási eredménysort (likvidusz és szolidusz pozíciók) és négy mérési eredménysort (a lemezbuga négy negyedén meghatározott kéregvastagság változása) tartalmaz.



2.8. ábra A termikus modell alapján meghatározott likvidusz és szolidusz görbék, valamint az izotópos méréssel meghatározott likvidusz pozíciók a meniszkusz szinttől való távolság függvényében



2.9 ábra A termikus modell alapján számított és az izotópos mérésekből megállapított likviduszra vonatkozó kéregvastagság az öntési irányra merőlegesen a széles oldal mentén

A kísérleti adagok lemezbugáin mért és a termikus modell segítségével meghatározott átlagos felületi hőmérsékletek összehasonlítását segíti a 2.10 ábra. A hőmérsékleti értékeket az utolsó támgörgő és az első húzóhenger között, a meniszkusz szintjétől 11,3 m-re mértük. A méréssel meghatározott hőmérsékleti átlagértékek általában a számított értékeknél valamivel kisebbek, ez az eltérés a felületi reve jelenlétének tulajdonítható. A 4. mérés közben öntési sebesség megváltozott, ezért ebben az esetben két pont reprezentálja a számított felületi hőmérséklet átlagértéket.

Összességében, a kísérleti körülmények és eredmények kiértékelése alapján az a következtetés volt levonható, hogy a folyamatos öntés termikus folyamatainak matematikai

modellezésével a valós kéregnövekedési viszonyok jó közelítéssel leírhatók. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy az izotópos nyomjelzéses kísérletek és természetesen a modellezés eredményeinek pontosságát is számos tényező befolyásolhatja.



2.10 ábra A lemezbuga mért és számított felületi átlaghőmérsékletének alakulása az izotópos kísérleti öntések esetében

2.3 A termikus modellből származtatott további jellemzők

A lemezbugát jellemző hőmérsékleti adathalmaz feldolgozása egy sor egyéb lényeges paraméter meghatározására és az egyes öntési technológiák összehasonlítására szolgáló értékelő rendszer kidolgozására is lehetőséget adott. Ez utóbbi – kiértékelő és összehasonlító – rendszer keretében olyan függvényeket definiáltunk, melyek támpontot szolgáltatnak a technológia megfelelőségnek eldöntéséhez, illetve a technológiai módosítások irányának kijelöléséhez. Az elemzések elvégzéséhez saját szoftvert készítettem, mely a kiértékelési rendszer alább ismertetett főbb paramétereit határozza meg. A kiértékelési rendszer működését egy konkrét példán keresztül a vonatkozó diagramok bemutatásával teszem szemléletessé.

Felületi hőmérséklet eloszlás jellemzése az X1Z1 és Y1Z1 síkokban

A lemezbuga felületi hőmérséklet eloszlása a hely függvényében folyamatosan változik és ez összetett hőmérsékleti mezőt eredményez. Példaként a 2.11 ábrán egy egyméteres bugaszakasz számított felületi hőmérséklet eloszlását mutatjuk be mind a széles oldal, mind a keskeny oldal felére vonatkozóan (jelölések az 2.1 ábrán). Az összetett hőmérséklet eloszlás jellemzésére olyan paramétereket definiáltunk, melyek a lemezbuga felületi pontjainak termikus történetét reprezentálják. Vegyünk egy pontot a lemezbuga felületén a hűlési folyamat kezdetén, vagyis éppen a meniszkusz szinten. Kövessük végig ennek a pontnak a termikus történetét, ahogy áthalad a kristályosítón, majd a szekunder hűtőzónán, egészen addig, míg el nem jut az öntőgép végéig, ekkor a 2.12 ábrán látható diagramhoz jutunk. Ezen egy pont termikus történetét a 2.13 ábra alapján az alábbi paraméterekkel jellemezhetjük:

- intenzív hűlési ciklusok száma, vagyis az adott alkotó mentén hányszor valósult meg hirtelen hűlés,
- az egyes ciklusokban kialakuló hőmérsékletesések összegzett értéke,
- az egyes ciklusokban kialakuló hőmérsékletesések átlagértéke,
- az egyes ciklusokban kialakuló hőmérsékletesések maximum értéke,
- az egyes ciklusokban kialakuló hűlési sebességek átlagértéke,
- az egyes ciklusokban kialakuló hűlési sebességek maximuma,
- az egyes ciklusokban kialakuló visszamelegedési sebességek átlagértéke,
- az egyes ciklusokban kialakuló visszamelegedési sebességek maximuma,
- keresztirányú hőmérséklet eloszlás X1 és Y1 irányban a hűtőzóna jellegzetes szakaszaiban.



2.11 ábra Felületi hőmérséklet eloszlás egy részlete



2.12 ábra Egy felületi pont hűlését leíró görbe

2.13 ábra A hűlési görbe elemzése

Ha a meniszkusz szint kerületi pontjaira elvégezzük ezt az elemzést, akkor a termikus történet a kerület mentén jellemezhető a fenti paraméterekkel. A következő diagramok (2.14-2.19 ábrák) vízszintes tengelyén tehát a lemezbuga szelet egy negyed kerületét (a negatív értékek – keskeny oldali, a nulla – a sarok, a pozitív értékek – széles oldali pozíciót jelölnek), a függőleges tengelyén pedig a termikus történet fenti jellemző paramétereit adjuk meg. Az egyes jellemzők az acél összetétele a túlhevítés, valamint a hűtési technológia függvényében érzékenyen változnak és a tapasztalatok szerint jól jellemzik a felületi hűlési viszonyokat, például annak homogenitását.







2.16 ábra Maximális és átlagos hőmérséklet esés értékek



2.18 ábra A hűlési és visszamelegedési sebességek átlagai



2.15 ábra Az összegzett hőmérséklet esés megoszlása



2.17 ábra A hűlési és visszamelegedési sebességek maximumai





A fenti diagramok egyértelműen azt jelzik, hogy a vizsgált esetben (az adott összetétel, túlhevítés, hűtési technológia és húzási sebesség) a lemezbugát érő hűtőhatások egyenletesen oszlanak meg a széles oldal felületén (2.14 ábra), de ennek eredményeképpen a sarok részen nagyon drasztikus hőmérséklet esések (2.15-2.16. ábra), hűlési és visszamelegedési sebességek (2.17-2.18 ábra) alakulnak ki. Ez az egyenetlen hűtés tükröződik a felületi hőmérséklet eloszlásokban (2.19 ábra) is.

Olvadéktócsa mélység és alak az X2Z2 síkban

Az olvadéktócsa mélysége és mint említettük, az alakja is meghatározó a folyamatosan öntött gyártástechnológia termék minősége megvalósíthatósága szempontjából. és а Alapkövetelmény, hogy a szolidusz hőmérsékletre meghatározott olvadéktócsa mélység kisebb legyen az öntőgép hasznos hosszánál, vagyis az utolsó támgörgők elérésekor a szál már teljesen megszilárdult állapotban legyen. A 2.20 ábrán a lemezbuga X2Z2 síkjában (lásd. 2.1 ábra) a szolidusz hőmérsékletre meghatározott tócsamélység tehát megfelelőnek látszik, mivel a kristályosodás a középvonalban az utolsó támgörgő elérése előtt befejeződik. A tócsa W (kutyacsont) alakja a széles oldal közepét érő intenzív hűtés eredménye. Ugyanezen az ábrán feltüntettük a likvidusz hőmérsékletre megállapított tócsaalakot, mivel a likvidusz szolidusz felületek távolsága is fontos információ, elsősorban makroszegregációs hajlam szempontjából.

Olvadéktócsa alak az X1Y1 síkban a kristályosítóból való kilépésnél és az utolsó támgörgőnél

Az olvadéktócsa keresztirányú, az öntés irányára merőleges síkban kialakuló alakjának ellenőrzésére két metszetben, éppen a kristályosítóból való kilépésnél, illetve az utolsó támgörgő magasságában kerül sor. A 2.21 ábra együttesen mutatja a két metszetben várható szilárd kéreg vastagságot. Az ábra alapján megítélhető a kristályosítóból kilépő szál szilárd kéreg vastagsága, illetve annak eloszlása, ami jellemzi a kéregnövekedés egyenletességét és kijelölhetők a kéregvastagság szempontjából kritikus részek. Az utolsó támgörgő magasságára számított tócsaalak a kristályosodás utolsó szakaszára, az utoljára dermedő olvadék pozíciójára vonatkozóan nyújt információt.



2.20 ábra Az olvadéktócsa mélysége és alakja az X2Z2 síkban



2.21 ábra Olvadéktócsa alakok az Y2Z3 síkokban

A bemutatott értékelő rendszer lehetővé teszi a lemezbuga öntési technológiák megfelelőségének értékelését, illetve azok összehasonlító elemzését. Ilyen jellegű szisztematikus értékelésre a korábbiakban nem volt lehetőség.

2.4 Összefoglalás

A folyamatosan öntött lemezbuga kristályosodásának leírására szolgáló termikus, illetve az abból származtatott modellek eddigi tapasztalataink szerint a gyakorlati igényeknek megfelelő pontosságot szolgáltatnak. A számítási eredmények alapján megállapítható, hogy az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. szakemberei által korábban kidolgozott folyamatos öntési technológia alapvetően jól illeszkedett az öntőgép műszaki adottságaihoz, a termikus modell által szolgáltatott adatok alapján végzett korrekciók az összhangot – és ezáltal az öntési teljesítményt – tovább javították. A fejezetben ismertetett tevékenység egyéb, járulékos eredményeit az alábbiakban tudom összefoglalni:

- Feltérképeztük és rendszereztük azt az üzemi adathalmazt, mely a termikus modell működéséhez szükséges. A szisztematikus adatgyűjtés, rendszerezés, valamint az input-output adatok elemzése segítette az eddig kevésbé ismert folyamatok lényegének és működésének megértését, azok korrekt adaptálását, illetve a megfelelő megoldások kialakítását.
- Lehetővé vált annak megítélése, hogy az egyes bemenő változók milyen irányban és mértékben befolyásolják a kristályosodás egészét.
- Egyértelművé vált azon problémák köre, amelyek termikus modell segítségével reményteljesen megoldhatók.
- Ismételten igazolódott a matematikai modellezés, mint a gyártástechnológiát hathatósan támogató tevékenység létjogosultsága az üzemi feltételek között. A folyamatos öntés termikus modellezésének gyakorlata meghonosodott és ez, mint eszköz, a szakemberek rendelkezésére áll.

Hivatkozások

[2.1] M. El-Bealy: Fluctuated Cooling conditions and Solid Shell Resistance in Continuously Cast Steel Slabs, Canadian Metallurgical Quaterly, Vol. 36, No. 3, 203-222, 1997

[2.2] J.S. Ha et al.: Numerical Analysis of Secondary Cooling and bulging in the Continuous Casting of Slabs, Journal of Materials Processing Technology Vol. 113, pp. 257-261, 2001

[2.3] F. Kavicka et al.: The Optimization of a Concasting Technology by Two Numerical models, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 185, Iss. 1-3, 30 April 2007, pp. 152-159

[2.4] C.A. Santos et al.: Mathematical Modeling and Optimization Strategies (Genetic Algorithm and Knowledge Base) Applied to the Continuous Castinng of Steel, Engineering Application of Artificial Intelligence, vol. 16, pp. 511-527, 2003

[2.5] Mathematical Description of Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Machines, Final Report, European Comission, Directorate-General for Research, EUR 21930, 2005

[2.6] Extension of Advanced Monitoring and Control Techniques at Continuous Casting process, Final Report, European Comission, Directorate-General for Research, EUR 22815, 2007

[2.7] Miettinen, J.: Calculation of Solidification-related Thermophysical Properties for Steels, Metallurgical and Materials Transactions B, 28B, pp. 281-297, 1997

[2.8] IDS Solidification Analysis Package, User Manual, – Solidification analysis package for steels – User manual, Helsinki University of Technology

[2.9] J. Miettinen, H. Kytönen, S. Louhenkilpi, J. Laine, Proc. of 12th IAS Steelmaking Seminar, Buenos Aires 1999, pp. 488-497

[2.10] TEMPSIMU, User Manual, Helsinki University of Technology

A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk

[S.2.1] Réger M.: Folyamatosan öntött szál belső szerkezetének jellemzése hőtani modell alapján, Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények 2001/4, pp. 171-176

[S.2.2] M. Réger, B. Verő, H. Kytönen, S. Louhenkilpi: Microstructure Characterisation of Continuously Cast Slabs by Using Heat Transfer Model, Proc. of. 4th European Continuous Casting Conference, Oct. 2002, Birmingham, pp. 969-978

[S.2.3] M. Réger, S. Louhenkilpi: Characterising of the Inner Structure of Continuously Cast Sections by Using of Heat Transfer Model, Mat. Sci. Forum, Vol. 414-4, pp. 461-469, 2003

[S.2.4] G. Fehérvári, M. Réger, B. Verő: Analysis of the Effect of Casting Parameters on Continuous Steel Casting, Mat. Sci. Forum, Vol. 414-4, pp. 395-403, 2003

[S.2.5] M. Réger, B. Verő, A. Szelig: 3D Characterization of Continuously Cast Slabs, Mat. Sci. Forum, Vol. 537-538, pp. 555-562, 2007

[S.2.6] Szabó, Z., Gyerák, T., Tar, Gy., Kelemen, T., Verő, B., Réger, M.: A FAM acélöntés intenzifikálásának eredményei az Acélművek Kft.-ben, VIII. Anyag-, Energia- és Környezetgazdálkodás a vaskohászatban Konferencia, Balatonszéplak, szept. 9-10, 1999, pp. 171-193

3. A porozitás szerepe a középvonali dúsulás jelenségében

A lemezbugákban a középvonali dúsulás (középvonali szegregáció) jelensége egyidős a folyamatos öntés technológiájával. Ennek megfelelően számtalan cikk, tanulmány jelent meg az elmúlt évtizedekben a témáról és számos ipari fejlesztés tűzte ki célul a középvonali dúsulás csökkentését. A makrodúsulás jellegzetességeivel, vizsgálati lehetőségeivel korábban hazai kutatási projekt is foglalkozott "Folyamatosan öntött féltermékek makro- és csökkentése" címmel mikrodúsulásának (Miskolci Egyetem Mechatronikai és Anyagtudományi Kooperációs Kutatási Központon, MEAKKK). Többek között az ilyen fejlesztések eredményeként alakultak ki azok a technológiai és gépészeti alapelvek, amelyek a korszerű acélöntőművekben a gyakorlatban is megvalósulnak. A teljesség igénye nélkül itt csak két fontos fejlesztési irányt emelünk ki ebből a sorból:

- Osztott, hűtött támgörgők és csökkentett görgőtáv bevezetése: felismerve a támgörgők méret- és alakstabilitása, valamint a szilárd kéreg deformációja közötti összefüggést, a szál stabilabb megtartása és a kéreg deformációjának csökkentése volt a cél, ezáltal csökken a szál belsejében az olvadék kényszermozgása, így a dúsulások is csökkennek. Mindazonáltal ezek a fejlesztések a felületi hibák csökkenését is eredményezték.
- Olvadékmag redukció bevezetése: célja a szál középvonalában feldúsuló szennyezett olvadék kiszorítása, az olvadéktócsa utolsó szakaszában a szálon létrehozott méterenkénti kb. 1 mm-es vastagsági deformációval.

A lemezbugák porozitása, makrodúsulása, középvonali szegregációja, valamint ezek megjelenési formája és általános okai szinte minden gyakorlatiasabb kézikönyvben megemlítésre kerülnek. Ugyanakkor számos tisztázatlan kérdés merül fel már a definícók kapcsán is. A következőkben az alapfogalmak áttekintése után egy régebbi és három újabb, a középvonali dúsulás szempontjából fontosnak ítélt tanulmány megállapításait ismertetjük.

A szakirodalomban többféle és gyakorta nem teljesen precíz definíció olvasható a dúsulások fogalmáról. A makrodúsulás és középvonali dúsulás fogalmát esetenként egymás alternatívájaként is kezelik. Általánosságban makrodúsulás akkor jön létre, ha kristályosodás során az olvadék a vele (közel) egyensúlyt tartó szilárd fázis közeléből elmozdul, így bizonyos tartományokban szennyezőkben és ötvözőkben kevésbé dúsult, míg más helyeken erőteljesen dúsult olvadék dermedésére kerül sor. Ennek eredményeként a szilárd fázis összetétel szempontjából makroszkópikus (pl. cm-es) méretekben sem lesz homogén. Olvadékáramlás az alábbi fontosabb okok miatt jöhet létre a lemezbuga belsejében:

-Olvadékáramlás a beömlés miatt: az olvadékáramlási számítások és az izotópos kísérletek azt bizonyították, hogy ilyen okból olvadékáramlás zömében csak a szilárd fázist még nem tartalmazó olvadékban jön létre. Ahogy a két oldalról növekedő mushy zóna összeér, a viszkozitás drasztikusan megnő, és a beömlés következtében mushy szakaszban nem alakul ki lényeges olvadékáramlás. A szilárd fázist még nem tartalmazó olvadékban kialakuló áramlási kép jól számítható kereskedelmi szoftverekkel (Calcom, Fluent). A jelen munkában feltételezzük, hogy az ebben a tartományban kialakuló áramlások során az olvadék keveredésére lehetőség van, így maga az olvadékáramlási kép a mushy szakaszban való kristályosodás sajátosságait kevéssé befolyásolja.

Sűrűségkülönbség miatt létrejövő áramlások: a sűrűségkülönbség a hőmérséklet csökkenés és a koncentráció lokális megváltozása miatt alakulhat ki mind az tiszta olvadékban, mind a mushy szakaszban. Az olvadékáramlások számításához számos feltételezés (pl. a mushy zóna geometriai modellje, irányfüggő olvadékáramlási ellenállás a mushy zónában, stb.) és kapcsolt modellek alkalmazása szükséges, melyek miatt a számítási eredmények bizonytalanok lehetnek (lásd a Bevezetésben említett mushy állapotra vonatkozó ismeretek hiánya).

Olvadékáramlás külső kényszerek okozta térfogatváltozások miatt:

-Olvadékáramlás a szilárd kéreg hőmérséklet változása miatt: a szilárd kéreg ciklikus hőmérséklet változása (helyi lehűlés, visszamelegedés) a szilárd fázis ciklikus sűrűségváltozását, térfogatváltozását eredményezi, mely olvadékmozgást okoz.

-*Olvadékáramlás a támgörgők pozíciója miatt:* a támgörgők közötti résgeometriának igazodnia kell a szál zsugorodásához. Az öntőgép hossza mentén a zsugorodás menete alapvetően a kémiai összetételtől, a hűtési intenzitástól, és az öntési sebességtől függ. Rögzített résgeometriájú öntőgépeken a résbeállítás meghatározza a fenti paramétereket. Megjegyzendő, hogy a résméret a támgörgők kopásától is függ.

-*Olvadékáramlás a támgörgők excentricitása miatt:* a gyorsítások, a lassítások, az esetleges megállások folyamán a támgörgők maradó alakváltozást szenvedhetnek (a támgörgőn belüli nem egyenletes hőmérséklet eloszlás miatt), ez az egyedi támgörgő excentricitás kialakulásához vezet. Excentricitást okozhat a támgörgők csapágyazási problémája is. Az excentricitás ciklikus térfogatváltozást eredményez az adott bugaszakaszon.

-*Kihajlásból, azaz a ferrosztatikus nyomásból adódó deformáció és olvadékáramlás:* az egymást követő támgörgő párok között a lefelé mozgó szál szilárd kérge a belső ferrosztatikus nyomás miatt kihasasodik, kihajlik, ha a szál belsejében olvadék is jelen van. A kihajlás fokozatosan megszűnik, ahogy a szál adott keresztmetszete eléri a következő támgörgőt. Egy ciklus alatt, vagyis két egymást követő támgörgő közötti áthaladás során az adott bugaszakaszon olvadék beszívása, illetve az olvadék kiszorítása is megtörténik.

Y. Tsuchida és munkatársai az olvadékmag redukció bevezetése kapcsán üzemi körülmények között öntött, 230 x 1650 - 2300 mm keresztmetszetű lemezbugák középvonali dúsulását vizsgálták [3.1]. A cél az volt, hogy a keresztmetszeten makromaratással megállapítható középvonali dúsulást, annak területét mikroelemzési adatokkal jellemezzék. Ez utóbbi eredményekből megállapították, hogy a mangán és a foszfor dúsulása között hatványfüggvény jellegű összefüggés van. A lemezbuga keresztmetszetek makrovizsgálatához meleg sósavas maratást használtak. A maratott mintákon meghatározott, dúsult területarány és a foszfor dúsulási indexe között – igaz nagy szórással – de szintén hatványfüggvény jellegű kapcsolat volt azonosítható. Az olvadékmag redukciós kísérletek során készült lemezbugákat ezzel a módszerrel értékelték. A túlhevítés növekedésével a dúsult területarány csökkenését tapasztalták valószínűleg azért, mert a nagyobb túlhevítéseknél oszlopos, a kisebbeknél egyenlő tengelyű kristályosodással zárult a dermedés. A középvonali dúsult területarány minimumot mutató görbe szerint változik az olvadékmag redukció mértékének függvényében, a minimum 1 mm/m környékén található (a szál 1 méterén 1 mm-es vastagsági deformáció a szál mushy szakaszán).

A középvonali dúsulás, makrodúsulás jellemzésére – mint a bevezetésben említettük – nem alakult ki egységes vizsgálati módszer. Az acélművek az egyedi gyártási profiljukhoz, a termékek tipikus felhasználási módjához, illetve a vizsgálati, méréstechnikai adottságaiknak megfelelő (pl. automatikus bugaszelet vágás, maratás, értékelés) egyedi vizsgálati módszereket használnak, melyeknek persze sok közös jellemzője lehet (pl. általánosan elterjedt a meleg sósavas maratás alkalmazása), ennek következtében Tsuchida módszerének alkalmazása sem terjedt el. A Mannesmann cégcsoport például a makromaratott mintákat az A0 mellékletben bemutatott etalonképek alapján, a finnországi Rautaruukki Oy vállalat pedig a maratott mintákon képelemzéssel azonosított területarány alapján minősíti.

H. Jacobi a makrodúsulást és a porozitást együttesen vizsgálja a lemezbugák belsejében [3.2]. Részletesen bemutatja az ultrahangos módszerrel végzett porozitás vizsgálat módszerét és eredményeit. A vizsgálatot a felületre merőleges irányból, a bugafelület egy részének lemunkálásával kialakított sík felületen végezte, ennek a módszernek az ipari gyakorlatba való bevezetése megítélésünk szerint közel lehetetlen. Megállapítja, hogy a porozitás a lemezbuga szélessége és hosszúsága mentén egyaránt változik, és a két-dimenziós eredményekhez képest a három-dimenziós megközelítés sokkal több és megbízhatóbb információt közvetít. Ez utóbbi megállapítás azt jelenti, hogy a buga hosszirányában két egymást követő keresztmetszeti síkban nem feltétlenül – sőt a később ismertetett tényezők alapján állítható –, hogy bizonyosan nem azonos mértékű a porozitás (a pórusok mérete, mennyisége, eloszlása).

Hasonló célból, az olvadékmag redukció alkalmazásával kapcsolatban végzett középvonali dúsulás vizsgálatokat H. Presslinger [3.3]. Jacobi fenti cikkére hivatkozva hasonló módszert alkalmazott a makrodúsulás vizsgálatára a széles oldallal párhuzamos középvonali síkban. A optikai emissziós vizsgálatok alapján a maximális és az átlagos ötvöző és szennyező tartalom (Mn, C, S, P) hányadosaként definiált makrodúsulás és a porozitás között gyenge lineáris kapcsolatot talált. Ez utóbbi megállapítás arra utal, hogy a középvonali szegregáció makrodúsulási és porozitás képződési folyamatai csak részben függenek össze. Megjegyzendő, hogy a saját vizsgálatai tapasztalataink is ugyanezt valószínűsítik.

G. Lesoult áttekintő cikket közölt a makrodúsulás témaköréről [3.4]. Japán kísérleti adatokra támaszkodva elemzi az olvadékmag redukció és a karbon középvonali dúsulási indexe közötti kapcsolatot leíró függvényt, mely minimumos jellegű. Ennek alapján az olvadékmag redukció mértéke optimalizálható, értéke mintegy 0,9 mm/m. Megerősíti, hogy a dúsulási index erőteljes, közel 60 %-os ingadozást mutat öntési irányban a vizsgálat helyének függvényében. A makrodúsulás kialakulásával kapcsolatosan megállapítja, hogy meghatározásának egyrészt a kristályosodási folyamatok, másrészt a mushy zónában, mushy szakaszon kialakuló tömegáramlás ismerete a feltétele. Cikkének utolsó szakaszában megjegyzi, hogy a lemezbugák középvonali dúsulásának kézbentartásához mindenképpen szükség van a mushy zóna szilárduláshoz közeli állapotának reálisabb ismeretére.

3.1 Makrodúsulás és középvonali dúsulás

A dúsulási jelenség előfordulását alapvetően meghatározza a kristályosodó ötvözet típusa, összetétele és számos, a dermedésben szerepet játszó paraméter, melyek közül a lényegesebbeket a következőkben fogjuk tárgyalni. A tapasztalatok szerint a kialakult dendrites szövet jellege (oszlopos, egyenlőtengelyű), illetve annak finomsága is (primer, szekunder dendritág távolságok) befolyással van a dúsulási folyamatra.

Makrodúsulásról tehát akkor beszélünk, ha a megszilárdult szilárd fázis összetétele a makroszkópikus lépték tartományban eltér az átlagos összetételtől. Makrodúsult tartomány a technológiától függően elvileg előfordulhat az öntött termék bármely részében, a dúsult rész határfelülete pedig általában nem túl éles, mint az az 3.1.a/ ábra Baumann lenyomatán is látszik. Ezzel szemben a középvonali dúsulás speciális jellegzetessége, hogy az utoljára megdermedő anyagrészben található, pl. a lemeztermék középvonalában és a hibajelenség nagyon élesen határolt keskeny zónában alakul ki. Ugyancsak Baumann lenyomattal, vagy mint az a jelen munkához kapcsolódóan történt, sósavas maratással tehető láthatóvá (3.1.b/ ábra). A felvételek értelmezése során utalnunk kell azokra a bizonytalanságokra, amelyek a vizsgálatok információtartalmával kapcsolatosak. Az ismertetett tanulmányok alapján egyértelmű, hogy a középvonali dúsulás a makrodúsulás és/vagy a fogyási üregek jelenlétének eredménye. A maratásos vizsgálati technikák e két jelenség éles szétválasztására nem alkalmasak. Valószínűsíthető, hogy a sósavas maratás elsősorban a folytonossági hiányok (zsugorodási üregek, porozitás) okozta hibák kimutatására érzékeny.

A következőkben ismertetett kutatási tevékenység a középvonali dúsulás előfordulási feltételeit kívánta pontosítani.



3.1. ábra A két jellegzetes dúsulási jelenség

3.2 A középvonali dúsulás domináns folyamatai

A makrodúsulás szempontjából akkor tekinthetők optimálisnak a kristályosodási viszonyok, ha az olvadék – mely egyensúlyt tart az éppen megszilárduló szilárd fázissal –, nem mozdul el a megszilárdult rész közeléből. Akkor lehet minimális dúsulásra számítani, ha a lemezbuga egy térfogatrészében az az olvadék tud kristályosodni, mely a kristályosodás kezdetén ott jelen volt.

A bevezetésben elmondottak alapján egyértelmű, hogy az öntött szál belső minőségét nagyon erőteljesen befolyásolják azok a deformációs hatások, melyek a szilárd acélkérget érik az öntőgépben. Az öntőgép felső részében, ahol a szál középvonalában a hőmérséklet még meghaladja a likvidusz hőmérsékletet, teljesen más a helyzet. A különböző okokból kialakuló olvadékáramlások (beáramló acél mozgási energiája, hőmérséklet és sűrűség különbségek, a támgörgők beállítás okozta olvadékmozgás, a kihajlás pumpáló hatása, stb.) következtében

folyamatosan keveredik a szál belsejében lévő olvadék és feltételezésünk szerint ebben a tartományban – éppen az állandó olvadék-keveredés miatt – lényeges dúsulás nem alakul ki.

Mire a középvonali hőmérséklet a likviduszt eléri, a kétoldalról növekvő dendritek csúcsai már csaknem összeérnek (oszlopos kristályosodás), illetve az oszlopos dendritek között már egyenlőtengelyű dendrites képződmények is lehetnek (oszlopos – egyenlőtengelyű dendrites kristályosodás). Az öntött szál azon szakaszát, amelyre érvényes, hogy a középvonalban a hőmérséklet a likvidusz és szolidusz közötti, nevezzük el mushy szakasznak. A mushy szakaszban a mushy zóna olvadéktartalma – a folyamatos öntés átlagos technológiai viszonyait feltételezve - az összetételtől szinte függetlenül 65-70 % közötti, aztán ahogy halad tovább a kristályosodás, a mushy olvadék tartalma egyenletesen, majdnem lineárisan csökken. Ezt az állítást támasztja alá 3.2 ábra, amely tíz acéladag kristályosodására vonatkozóan illusztrálja a mushy olvadéktartalmának változását. Az ábrán a mindenkori mushy zónában található olvadék arányát mutatjuk be a meniszkusz szinttől való távolság függvényében. Mint látható, a kristályosodási folyamat elején, a meniszkusz szint környékén 30-40 % közötti a mushy zónában az olvadékarány és ez az érték egészen a kétoldalról növekvő dendritek összeéréséig növekszik (addig, amíg a lemezbuga középvonalában a hőmérséklet a likviduszig nem csökken). A maximum értéket ezek a függvények tehát minden esetben a likviduszra számított tócsamélységnél (Ltócsalig) érik el. A maximum érték 60-70 % olvadéktartalomnál regisztrálható. A másik figyelemre méltó jelenség, hogy a mushy olvadéktartalma egyenletesen, a különböző esetek ellenére egymással párhuzamosan csökken a likviduszra és szoliduszra (Ltócsasol) számított tócsamélység között. Ebben a szakaszban az olvadéktartalom változása a meniszkusztól számított távolság függvényében közel lineáris jellegű.



3.2 ábra A mushy olvadéktartalmának változása tíz különböző öntési esetben

A mushy olvadéktartalmának csökkenésével egyidejűleg a szilárd fázis aránya természetesen nő. Az olvadék áramlására a dendritágak alkotta bonyolult geometriájú alagút-rendszerben kerülhet sor. Ahogy csökken az olvadék mennyisége, egyre nő az olvadékáramlással szemben kialakuló ellenállás, vagyis csökken a mushy zóna permeabilitása. A kristályosodással járó fajtérfogat csökkenés olvadék utánpótlást igényel, de az utánpótlás feltételei folyamatosan romlanak a kristályosodás előrehaladásával. A zsugorodási üregek kialakulása megakadályozható, illetve mérsékelhető az öntött szál deformációjával, ha erre nem kerül sor, akkor több-kevesebb fogyási üreg megjelenésére kell számítani. A következő fejezetben

ismertetett tevékenység fókuszában ennek a – számos paramétertől függő – porozitást eredményező folyamatsornak az elemzése áll.

3.3. A középvonali dúsulás az ipari adatok tükrében

A Helsinki University of Technology partnerintézménnyel való együttműködés keretében az elmúlt időszakban olyan ipari mérési adathalmaz elemzését végeztük el, mely az előzetes várakozásoknak megfelelően lehetőséget adhat az üzemi paraméterek és a középvonali dúsulás közötti kapcsolat feltárásához, vagy legalábbis a főbb befolyásoló tényezők azonosításához. Az adatsor a finn Rautaruukki Oy vállalat egyik ívelt öntőgépre vonatkozik és tartalmazza a – szegregációs szempontból jelentőséggel bíró – üzemi körülmények között mérhető paramétereket. Az üzemi adatgyűjtést, az adatsorok összeállítását és rendszerezését, valamint az összes öntési eset termikus modellezését a finn partner végezte. Ezt követően az adathalmazt – statisztikai feldolgozás céljából – rendelkezésünkre bocsátották. Saját munkámnak tekinthető az elemzés lebonyolítása valamint annak az – alább részletezett – újfajta megközelítésnek, modellnek a kidolgozása, melynek segítségével a lemezbuga középvonalában kialakuló porozitási mérték becsülhető. Megjegyzendő, hogy a statisztikai elemzést – tőlünk függetlenül – a finn partnerek is elvégezték, hasonló eredménnyel.

A statisztikai elemzésbe bevont adathalmaz főbb jellemzőit az alábbi táblázat összesíti.

Adattartomány	különböző adagból készült 400 lemezbuga			
Lemezbugánként				
Összetétel	az acél kémiai összetétele			
	C,Si,Mn,P,S,Cr,Ni,V,Mo,Cu,Sn,Al,Am,Nb,Ti,B,N,As,			
	Ca,Ce,Pb,Zn,H,Sb,Bi,Co,Zr,Mg,W			
Gépészeti adatok	buga szélességi méret			
	öntőgép adatai (97 db támgörgő és fúvóka sor)			
	valódi görgőtávolság adatok (roll checker adatsor)			
Technológiai adatok	öntési sebesség			
	túlhevítés			
	kristályosító hűtővíz mennyiség			
	szekunder hűtőzóna hűtővíz mennyiségek			
Dúsulás	üzemi gyártásközi ellenőrzés során megállapított középvonali szegregációs index*			
	laboratóriumban meghatározott középvonali szegregációs index			

3.1 táblázat Az üzemi adathalmaz információtartalma

Mint említettük, a partner intézmény munkatársai mind a 400 lemezbuga állandósult állapotú öntési esetére vonatkozóan elvégezték a teljes körű termikus modellezést. Az IDS szoftverrel a 400 összetételre meghatározták a kristályosodás jellegzetes hőmérsékleteit és az adott acél fizikai paramétereinek hőmérséklet függését, valamint a Tempsimu szoftverrel modellezték a lemezbuga kristályosodását és meghatározták a tócsamélységet (likviduszra, szoliduszra).

^{*} a szegregációs index meghatározását a lemezbuga hosszirányú szimmetriasíkjába eső csiszolaton mechanikus előkészítés és sósavas maratás (70 °C-on) után, automatikus képelemzés eljárások alkalmazásával végezték mindkét esetben

Meghatározták a szilárd kéregnek a ferrosztatikus nyomásból adódó támgörgők közötti kihajlás értékét is (BOS modell). A statisztikai elemzés célját szolgáló 3.1 táblázat szerinti adathalmaz az állandósult állapotú öntésre vonatkozó matematikai modellezés eredményeivel bővült.

A 3.3. a./ és b./ ábrája a karbon- és a kéneloszlás gyakorisági diagramját mutatja a kémiai összetételre vonatkozó 400 elemzési adatsor alapján. A karbon eloszlásban jól kivehető egy minimum 0,1 % karbontartalom környékén. Ezek az acélok a tapasztalatok szerint leginkább hajlamosak felületi repedésekre, így az acélművek általában kerülik ezt az összetételt. Az adatbázisba bevont adagok mintegy kétharmada ennél kisebb, egyharmada 0,12 és 0,18 % karbontartalom közé esik. A kéntartalom átlagértéke 0,008 % körüli és a maximum nem haladja meg a 0,015 %-ot.



3.3 ábra A karbon- (a./) és a kéntartalom (b./), a kristályosodási hőmérséklet tartományok (c./) és a túlhevítések (d./) előfordulási gyakorisága a 400 adatsorra vonatkozóan

A primer mérési adatokból matematikai modellezéssel származtatott jellemzők gyakorisági eloszlására mutat példát a 3.3 c./ és d./ ábra. Az c./ diagram a kristályosodási hőmérsékletköz szélességét, vagyis minden kémiai összetételre a likvidusz és szolidusz hőmérsékletek

különbségét mutatja. A jobb oldali diagram a folyamatos öntés egyik fontos technológiai paraméterének, a túlhevítésnek az eloszlását ábrázolja. A szinte teljesen szimmetrikus eloszlás átlagértéke 30 °C körüli, a maximum érték nem haladja meg az 55 °C-ot.

Külön figyelmet érdemel a középvonali szegregációs index kérdése. Minden adagra, illetve az adagot reprezentáló lemezbugára vonatkozóan két érték szerepel az adatbázisban, az egyiket üzemi körülmények között, a másikat laboratóriumban határozták meg. Az üzemi ellenőrzéshez a gyártósorba illesztett automata bugavágó és csiszoló berendezésen vágtak ki hosszirányú (öntési irányú) mintát, majd sósavas maratás után képelemzéssel értékelték ki a makrocsiszolaton látható szegregációs zóna geometriáját. A szegregációs indexet egy adott méretű látómezőben az erőteljesen kimaródott és a kevésbé maródott felületrészek területarányából származtatták, értéke egy relatív skálán 0 és 25 közé esik. A laboratóriumi méréseket az adott lemezbugából más helyről kimunkált hasonló helyzetű csiszolatokon végezték. A maratás és mérés menete megegyezett az üzemi eljárással. Az azonos lemezbugákra vonatkozó üzemi és laboratóriumi szegregációs indexek összetartozó értékpárjai láthatók a 3.4. ábrán. A két jellemző között meghatározható korrelációs koefficiens 0,83 körüli, önmagában ez az érték is rávilágít arra, hogy a középvonali dúsulás becslése milyen bizonytalanságokkal jár még egy ilyen, körültekintően elvégzett mintavételezés és értékelés esetében is.



3.4 ábra Az üzemi és a laboratóriumi körülmények között meghatározott középvonali dúsulási index kapcsolat

Az azonos adagra, lemezbugára meghatározott szegregációs indexek eltérését, a mérési bizonytalanságot a következő főbb körülmények magyarázzák:

- Az egy adaghoz tartozó öntött termék hossza a 100 m-es tartományba esik, a teljes szál egy-egy kb. 20 cm-es metszettel történő jellemzése nyilván hibákat tartalmaz.
- A középvonali dúsulás számértéke érzékeny az előkészítési és a kiértékelési technikára.
- Utaltunk rá, hogy a mérés információtartalma nem teljesen egyértelmű (pl. ötvözőkben, szennyezőkben dúsult rész maródik-e, vagy a zárványok?).
- A teljes öntési folyamatra az állandósult öntési viszonyok érvényességét feltételezzük, de nyilván voltak olyan öntési szakaszok, melyekben tranziens viszonyok valósultak meg.

Az adathalmaz statisztikai módszerekkel történő kiértékelésének célja a középvonali szegregációt befolyásoló főbb paraméterek azonosítása volt. Úgy ítéltük meg, hogy bár komoly mérési bizonytalanságok terhelik az adatokat (lásd 3.4 ábra), ennek ellenére a statisztikai megközelítés reményteljesen alkalmazható az alapvető kapcsolatok tisztázására. Ezért volt meglepő az az eredmény, amelyre az – egymástól függetlenül elvégzett – külföldi és hazai számítások alapján jutottunk: a teljes adathalmaz elemeinek bármely ésszerű kombinációja a középvonali dúsulás változását maximum kb. 20-22 %-ban magyarázzák (R²). A 3.2 táblázat a saját számítási eredmények egy részét összegzi. A bal oldalon találhatók a többváltozós lineáris regressziós számításokba független változóként figyelembe vett adat típusok, a jobb oldalon pedig az – üzemi körülmények között meghatározott – középvonali szegregációs index mint függő változó közötti korrelációs együtthatók.

A dúsulási index becslése (400 adat)	Korrelációs együttható	Korrelációs
Többváltozós lineáris regresszió		együttható négyzete
A számításba bevont paraméterek	R	R^2
С	0.316	0,100
S	0.332	0,110
C, S	0.436	0,190
C, Si, Mn, S, P	0.458	0,210
Kémiai összetétel	0.469	0,220
C,S,v _{önt}	0.447	0,200
C,S, tócsamélység	0.447	0,200
C,S, tócsamélység, v _{önt}	0.447	0,200
C,S, v _{önt} , szélesség, túlhevítés	0.447	0,200
C,S, v _{önt} , szélesség, túlhevítés, tócsamélység	0.458	0,210
C,S, v _{önt} , szélesség, túlhevítés,	0.458	0,210
tócsamélység, mushy zóna hossza		
C,S, v _{önt} , szélesség, túlhevítés, tócsamélység,	0.469	0,220
mushy zóna hossza, T _L -T _S		

3.2 táblázat A matematikai statisztikai elemzés néhány – "komolyabb korrelációt" mutató – kapcsolata

A táblázat adatai alapján három megállapítás tehető. Egyrészt az acélt alkotó elemek közül a karbon és a kén szerepe tekinthető lényegesnek, ha e két elem mellett más komponenseket is figyelembe veszünk, a "magyarázó képesség" (a korrelációs együttható négyzete) lényegesen nem javul. Másrészt ugyanilyen kismértékű magyarázó képesség javulás adódott, ha a fenti két elem mellett a technológiai paraméterek adott kombinációit is figyelembe vettük a számítások során. Ez arra utal, hogy az üzemi primer mérési adatok, illetve az állandósult termikus viszonyok matematikai modellezéséből nyert közvetett adatok nem magyarázzák meg a középvonali szegregáció értékének változásait. Harmadsorban a fentiekből arra következtethetünk, hogy a technológiai adatok közül nyilvánvalóan hiányzik, illetve hiányoznak azok az adattípusok, amelyek közvetlen kapcsolatba hozhatók a középvonali szegregáció értékével.

3.4 Az LMI modell és alkalmazása

Felmerül a kérdés, milyen típusú technológiai adat szolgáltathat további magyarázatot a középvonali dúsulás változásaira? A bevezetésben elmondottak alapján egyértelműnek tűnik, hogy a kristályosodási folyamatot kísérő olvadékmozgás, az ebből adódó makroszegregációs folyamatok, illetve a zsugorodást kompenzáló olvadék utánpótlás feltételrendszerének
jellemzői jöhetnek számításba. Mint említettük, a probléma az, hogy a mushy zónában kialakuló olvadékáramlás, a dúsulás, valamint a szilárd kéreg alakváltozásának nyomon követése igen bonyolult, e jelenségek komplex matematikai modellezése jelenleg még várat magára.

A kérdéskör megközelítésére egy korábban általam kidolgozott, fél-empirikus modell alkalmazását kíséreltem meg. A modell lényege, hogy a szilárd kéreg zsugorodásából, és a különböző okokból (metallosztatikus nyomás, támgörgők, kihajlás) létrejövő kényszer alakváltozásokból következtetni lehet a szál belsejében kialakuló olvadékmozgásra (LMI – Liquid Motion Intensity modell). Az olvadékáramlás intenzitásából olyan paraméterek generálhatók, melyeket az öntési folyamatban kialakuló olvadékmozgások jellemzőjeként lehet figyelembe venni. Az LMI modell leírása és annak részletei az A1. sz. mellékletben találhatók.

Tekintsük a 3.5 ábra diagramjait, melyeken a finnországi ívelt öntőgépre vonatkozó folyamatok követhetők nyomon. Az a-c./ diagramok felépítése azonos, a meniszkusz szinttől való távolság függvényében egyrészt különböző bugavastagsági adatokat mutatnak (bal oldali tengely), másrészt a jobb oldalon a kristályosodás adott szakaszra érvényes alapvető részfolyamatainak jellegzetességei követhetők nyomon (a számítások a széles oldal középvonalán áthaladó, arra merőleges síkra vonatkoznak).

Mindhárom diagramon a piros vonal a lemezbuga - külső deformációs hatások nélkül számított "természetes" vastagsági értékét jelzi. A számítás során azt feltételeztük, hogy a kristályosodási és lehűlési folyamatot csak a hőmérsékletmező befolyásolja (megszilárdulást, fajtérfogat változást). A zöld vonalak a támgörgők résméret variációit reprezentálják. Ha a zöld vonallal jelzett támgörgő beállítás teljesen a piros, természetes zsugorodást követő vonalra esne, akkor a hűlésből és dermedésből adódó fajtérfogat változást teljes egészében követné az öntőgép beállítása. Ez esetben a zsugorodás és a támgörgők távolsága teljes összhangban van, vagyis az olvadék nem kényszerül áramlásra. Természetesen egyéb okból, például a sűrűségkülönbségből, vagy a beömlő olvadék kinetikus energiája miatt kialakulhat áramlás. Ez azonban csak egy elméleti lehetőség, a valóságban az öntőművek – az üzemi tapasztalatok alapján – ettől eltérő támgörgő beállítási stratégiát követnek. Az eltérésnek számos oka van, ezek közül csak kettőre hívjuk fel a figyelmet. Egyrészt a szélességi irányban változnak a termikus viszonyok, vagyis a széles oldal középvonalában megfelelő résméret beállítás bizonyosan nem megfelelő a széles oldal egyéb pozícióiban. Másrészt – mint látni fogjuk – a szál kismértékű deformálása a dermedési folyamat vége felé kedvező lehet a belső minőség szempontjából.

Visszatérve a zöld vonallal jelzett támgörgő résméret beállításokra, tekintsük az a./ ábrán látható viszonyokat. A zöld vonal ebben az esetben a névleges, vagyis a megcélzott támgörgő beállítási értékeket reprezentálja. Jól látható, hogy az öntőgép teljes hosszán "bővebb" a támgörgők által biztosított rés, mint amit a lemezbuga kristályosodása kívánna. Ugyanakkor az is látszik, hogy mintegy 13 m-től kezdve a támgörgő rések csökkenési üteme erőteljesebb, mint zsugorodásból fakadó méretcsökkenési ütem. A lemezbuga a tapasztalatok szerint kitölti a számára a támgörgők beállításával biztosított térfogatot, mivel a ferrosztatikus nyomás miatt a már megszilárdult, de lágy kéreg alakváltozásra képes. Az így kialakuló térfogatnövekmény olvadék-beáramlással pótlódik. A jobb oldali skálán értelmezett lila görbe pedig az aktuális szakaszokon lezajló eseményeket (olvadék beszívás, kinyomás, stb.) jelzi azt az esetet feltételezve, hogy a lemezbuga valódi kontúrja a megszilárdulás végéig egybe esik a támgörgők pozíciójával.



a./ Névleges támgörgő beállítás



b./ Valódi támgörgő beállítás ("roll checker" adatok alapján)



c./ Valódi támgörgő beállítás és a kihajlás együtt

3.5 ábra A szál természetes vastagsága, valamint a támgörgők és a kihajlás által meghatározott geometria

Az öntőgépen az öntés közben ténylegesen megvalósuló támgörgő beállítás nem egyezik meg a névleges beállítási értékekkel. Ezt igazolja a b./ ábrán a zöld vonal, mely az un. "roll checker[†]" (résméret ellenőrző) berendezés által – röviddel az adag öntése előtt – rögzített résméret adatok felhasználásával készült. Bár az a./ és b./ diagram zöld vonalai közötti különbség igen durva eltérésnek látszik, ne felejtsük el az ábrázolásból adódó torzítást (vízszintes tengelyen 30 méter, függőleges tengelyen néhány milliméter).

A támgörgők között – a ferrosztatikus nyomásból adódóan – a szilárd kéreg ciklikusan kihajlik, visszahajlik [3.5]. A c./ diagram zöld vonala a valós görgőtávolságok és a kihajlásból adódó értékek egymásra szuperponálásából adódott. A b./ és c./ görbék összehasonlításából kitűnik, hogy ebben az adott esetben kihajlásra elsősorban a szál felső részén, a kicsi kéregvastagságok esetén kell számítani. A c./ ábra zöld görbéje reprezentálja a lemezbuga valós külső kontúrját[‡]. Az előzőekkel összhangban tehát itt is feltételezzük, hogy a belső metallosztatikus nyomás miatt a deformációra képes szilárd kéreg kinyomódik, egészen a támgörgők valós pozíciójáig és megtörténik a kihajlás is. A c./ ábra zöld görbéje tehát azt mutatja, hogy amint halad előre a dermedés folyamata, a szál hol egy kicsit kifelé nyílik, hol egy kicsit összenyomódik, és ez a deformáció kényszeríti mozgásra a szál belsejében lévő olvadékot.

Az 3.5 ábrán bemutatott állapotok mindegyikére meghatározhatók az olvadékmozgás intenzitását jellemző LMI paraméterek. Olvadékáramlás intenzitási paraméterek (LMI) különböző feltételrendszerekben határozhatók meg, pl. csak olvadék beszívásra, kinyomásra, akár a teljes dermedési folyamatra (a meniszkusz szinttől a dermedés befejeződéséig), akár annak csak egy részletére (pl. csak a mushy tartományra, vagy annak egy szakaszára). A valós helyzetet leginkább tükröző c/ esetre vonatkozóan néhány ilyen paramétert ábrázol a 3.6 ábra diagramia. A vastag lila színű vonallal reprezentált LMI 5 paraméter a mushy zónába beszívott olvadék összegzett mennyisége, ez a paraméter a mushy zóna teljes tartományára értelmezett (lásd az ábrán a mushy mennyiségét reprezentáló függvényt). Az LMI 6 paraméter hasonlóan értelmezett, de a mushy zóna kezdetétől csak egy adott szilárd fázis mennyiség eléréséig történt az összegzés. A kettő közötti különbségként definiáltuk az LMI 7 paramétert, melynek fizikai jelentése a kristályosodás szempontjából a következőképpen fogalmazható meg: ez a paraméter jelzi a kristályosodás végén, adott mennyiségű mushy olvadék (pl. 30 %) kristályosodási zsugorodásának kompenzálásához szükséges olvadék mennyiséget. Az LMI paraméterek meghatározása során a külső, térfogat változtató hatásokat (aktuális támgörgő résméret, a már szilárd kéreg hőmérséklet változásából adódó változás) is figyelembe vettük.

Az LMI_7 paraméter tehát adott olvadékmennyiségtől a zéró olvadékmennyiség eléréséig, azaz a teljes dermedésig értelmezett. E paraméter azt is jelzi egyben, hogy ha egy adott szilárd fázis mennyiség elérése után már nincs lehetőség az olvadék áramlására, akkor a lemezbuga középvonalában képződött zsugorodási üregek térfogatának mekkora lesz az összege. A szakirodalomban előfordul az a megfigyelés, feltételezés, hogy a mushy zónában egy adott – általában 20-30 % közötti – olvadékfázis mennyiség alatt megszűnnek az áramlások, vagyis

[†] Roll checker: a lemezbugára jellemző vastagsági és szélességi méreteű mérőberendezés, melyet az öntés szünetében végigvezetnek az öntőgépen. Terhelés alatt méri a támgörgőpárok közötti résméretet értékeit. Egyes típusai a szekunder hűtőzónában az egyes fúvókák, fúvókasorok hűtési intenzításának meghatározására is alkalmas.

^{*} Megjegyzendő, hogy a támgörgők excentricitásából adódó deformációs hatást jelen munkában nem vettük figyelembe, mivel a "roll checker" rendszer ilyen típusú adatot nem mért. Az excentricitás ciklikus deformációt és olvadékmozgást generál, ami az előző hatásokhoz hozzáadódik.

az olvadék már nem tud mozogni a dendrites hálózat üregrendszerében [3.6]. A mozgásra még éppen képes olvadékhányad a dendrites szerkezet jellemzőitől (oszlopos, egyenlőtengelyű, szekunder dendritág távolság) is függhet, de erre vonatkozóan nincsenek megbízható adatok. Ha nincs olvadék utánpótlás és a támgörgőkkel létrehozott alakváltozás sem kompenzálja a térfogatváltozást, akkor zsugorodási üregek képződnek.



3.6 ábra Az olvadék mozgás intenzitását leíró paraméterek

Az LMI_7 paraméter bevezetésével és a statisztikai adatfeldolgozásba való bevonásával a becsült és mért középvonali szegregáció közötti korrelációs kapcsolat lényegesen javult. Az LMI modell szerinti meglehetősen időigényes számítási sorozatot három acélcsoporton belül összesen 38 esetben végeztem el, tehát a statisztikai adathalmaz "eseteinek" mintegy 10 %-ára. A próbaszámítások során világossá vált, hogy a modell alapján becsült és a mért középvonali szegregáció közötti korrelációs együttható erőteljesen függ az LMI_7 paraméter értelmezési tartományának alsó határától, vagyis attól a mushy olvadék tartalom értéktől, mely alatt a zsugorodási üregek képződése a domináns folyamat. A 3.7 ábra a korrelációs együtthatót az LMI_7 paraméter értelmezési tartományának függvényében mutatja.



3.7 ábra A becsült és mért szegregációs index közötti korrelációs tényező az olvadékmennyiség függvényében

A görbe maximumos jellegű, a maximum 25 és 30 % közötti olvadék tartalomnál van, ami jó egyezést mutat a szakirodalmi adatokkal. A maximum értékhez tartozó értelmezési tartományra elvégzett számítások végeredménye a 3.8 ábrán látható. A három acélcsoportra meghatározott LMI_7 paraméter önmagában 69,7 %-ban magyarázza a középvonali szegregációs index változását, ami igen jó érték a korábbi számítási eredmények és a szegregációs index ismert meghatározási bizonytalanságának tükrében. A kéntartalmat is figyelembe véve a magyarázó képesség 71 %-ra nő.

С	Si	Mn	Р	S	Al	Nb	esetek
0.065	0.040	0.506	0.007	0.005	0.036	0.010	1. csoport 12 db
0.128	0.028	0.380	0.008	0.009	0.040	0.003	2. csoport 12 db
0.149	0.195	1.368	0.011	0.008	0.038	0.013	3. csoport 14 db



3.8 ábra A becsült és mért dúsulási index közötti kapcsolat a vizsgálatba bevont három acélcsoportra vonatkozóan (ezek átlagos összetételét a fenti táblázat összesíti)

A támgörgő beállítás és a középvonali dúsulás szoros kapcsolatát jól jelzi a következő néhány eredmény. Ha a 3.5 a/ ábra zöld vonala szerinti névleges támgörgő beállítási értékeket vesszük figyelembe, akkor a fenti feltételek szerint definiált LMI_7 paraméter magyarázó képessége mindössze 20 %. Ha a 3.5 b/ ábra adataira (valós támgörgő rések) támaszkodunk, akkor 69 %-ra nő a magyarázóképesség, és ha a 3.5 c/ ábra szerinti helyzetet (valós támgörgő pozíciók és kihajlás együtt) vizsgáljuk, akkor ugyanez az érték 69,7 %-ra nő. Mindez azt támasztja alá, hogy a támgörgők beállítása a középvonali dúsulás szempontjából nézve kiemelkedő jelentőségű, ehhez képest a kihajlásból adódó hatás lényegesen kisebb^{*}.

3.5 Az eredmények értékelése

A fejezetben bemutatott matematikai modell és az eredmények statisztikai feldolgozása alapján körvonalazható a középvonali dúsulás kialakulásának egyik alapvető mechanizmusa.

^{*} Megjegyzendő, hogy a kihajlásnak a makrodúsulási folyamatokban viszont kiemelkedő szerepe lehet.

A számítási eredményeket a szakirodalom, az üzemi tapasztalatok és az anyagvizsgálati, metallográfiai vizsgálatok tükrében célszerű áttekinteni, értékelni.

megfogalmazni eredmények árnyaltabban makrodúsulás Az alapján lehet a (makroszegregáció) és a középvonali dúsulás közötti különbséget. A kettő sok vonatkozásban összekapcsolódik, de alapvető különbség, hogy a makrodúsulás az oldott elemek, illetve a kiválások (pl. NbC) és a zárványok (pl. MnS) bizonyos térrészekben való felszaporodásával jár és ez a térrész természetesen lehet a lemezbuga középvonala is. A középvonali dúsulás kialakulásához a makrodúsulás jelenléte véleményünk szerint csak az egyik feltétel. Ebben az esetben a számítási eredmények és a metallográfiai vizsgálatok alapján feltételezhető, hogy az olvadék utánpótlás lehetőségének a megszűnése következtében kialakuló mikroüregek képződésének fontos szerep jut. Az eddigi tapasztalatokra és vizsgálatokra támaszkodó feltételezésünk szerint akkor jön létre éles középvonali dúsulás, ha a makrodúsulás mellett mikroüregek képződésére is sor kerül. Megjegyzendő, hogy a fentiek szerint értelmezett makrodúsulás és középvonali dúsulás között folyamatos átmenet tételezhető fel a mikroüregek szaporodásának függvényében.

A zsugorodási üregek kiemelkedő szerepére utal az az általános tapasztalat, hogy a középvonali dúsulást tartalmazó lemezbugákból készült durvalemezekben az ultrahangos vizsgálattal kimutatható folytonossági hiányok kiterjedése, jelenléte a lemez alakváltozásának függvénye. Minél erőteljesebb az alakváltozás, azaz minél vékonyabb a lemez, annál jobban csökken a folytonossági hiányok száma, kiterjedése. A Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézetben és az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. Innovációs Menedzsment laboratóriumában elvégzett metallográfiai vizsgálatok egyik alapvető megfigyelése, hogy a lemezbuga kristályosodása során képződött mikroüregek egy része a lemezbuga hengerlése során nem tűnik el, nem történik meg az összehegedés. Megjegyzendő, hogy a scanning elektronmikroszkópos és mikroelemzéses vizsgálatok alapján a zsugorodási üregek belső felülete fémtiszta, így az összehegedést valószínűleg nem a belső felület szennyezettsége akadályozza meg. A hengerelt termék középvonalában – feltehetően a mikroüregek elnyújtása, deformációja eredményeként – hajszálvékony folytonossági hiány hálózat azonosítható, mely nagyon gyakran a középvonalban található zárványokkal is összeköttetésben van (3.9 ábra). A középvonalban általában mindig több a zárvány, ez természetes és nem is okoz gondot, mivel nem szűnik meg a fémes alapanyag mátrix és így az extrém eseteket kivéve - ultrahangos vizsgálattal nem is mutatható ki. Ha azonban elnyújtott vékony folytonossági hiány (hálózat) jön létre az össze nem hegedő mikroüregek miatt, akkor ez egyrészt ultrahanggal kimutatható hibát okoz, másrészt befolyásolhatja a feldúsult oldott elemek diffúzióval történő kiegvenlítődését. A jövőben célszerű annak tisztázása, hogy a dendritek közötti - meglehetősen bonyolult alakú - zsugorodási üregrendszer összezárás és összehegedése milyen feltételrendszerben, milyen alakváltozási technológia és érték alkalmazásával érhető el.

3.6 Összefoglalás

Az eredmények tükrében érthetővé válik, hogy a gyártóművek miért tesznek komoly erőfeszítéseket a középvonali dúsulás csökkentésére. A középvonali dúsulás drasztikus mértékben, irreverzibilisen tudja rontani az öntött termék felhasználhatóságát. Az elmondottak alapján belátható, hogy a jelenség kialakulásában az acél típusán, minőségén kívül igen lényeges szerepet játszik a támgörgők állapota, az öntőgép beállítása, illetve a beállítás és az adott technológia összhangja. Mindebből következik, hogy a folyamatos öntés

összetett viszonyait csak a maguk komplexitásában, az acéltípus, a technológia és az öntőgép egységeként lehet áttekinteni, minősíteni.



3.9 ábra A középvonali dúsulásban található zárványok és a folytonossági hiány

Az elért eredménnyekkel kapcsolatosan az alábbi körülményekre célszerű felhívni a figyelmet:

- egy modern, rendszeresen karbantartott, állapot-felügyelt öntőgépen is a névleges támgörgő beállítások és valós támgörgő pozíciók között igen nagy eltérés lehet (3.5 ábra),
- a 0,82-es korrelációs tényező egy egyváltozós regresszió számítás eredménye, melyben a független változó önmagában az LMI_7 paraméter, a függő változó a dúsulási index,
- a támgörgők közötti kihajlás figyelembe vétele nagyon kicsi mértékben, de javította a korrelációs együtthatót,
- többváltozós regresszió alkalmazásával (pl. az összetételi jellemzők adatfeldolgozásba történő bevonásával) lényegesen nem módosult a korrelációs együttható,
- a korrelációs együttható az LMI_7 paraméter értelmezési tartománya függvényében maximumos függvény szerint változott.

Mindezek alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a lemezbuga metszeteken makromaratással azonosított dúsulási index elsősorban a lemezbuga belsejében kialakuló fogyási üreg mennyiséggel (a folytonossági hiány kiterjedésével) arányos. Ezt igazolja, hogy csak az LMI 7 paraméter figyelembe vételével (mellőzve pl. az összetételi adatokat) 0,82-es korrelációs együttható adódott. Az LMI 7 paraméter azt a térfogatot jellemzi, amely a szál kialakuló zsugorodási folyamatban dermedése következtében nincs megfelelő olvadékmennyiséggel kompenzálva. Ilyen körülmények akkor fordulhatnak elő, ha a mushy tartományban az olvadék áramlása akadályozott a mushy zóna lecsökkent áteresztő képessége miatt. A számítási eredmények és mérések értékelése alapján erre 30 % körüli mushy olvadék tartalmom környékén kerülhet sor. Ez magyarázza, hogy az LMI 7 paraméter és a dúsulási index között számítható korrelációs együtthatónak 30 % olvadéktartalom esetén maximuma

van. Ha ennél nagyobb, vagy ennél kisebb olvadéktartalomtól értelmezzük az LMI_7 paramétert, akkor mindkét esetben csökken a korrelációs együttható.

Összegezve az elmondottakat az alábbi következtetés adódik: az üzemi és laboratóriumi gyakorlatban alkalmazott sósavas makromaratásos eljárással meghatározott dúsulási index lényegében a lemezbuga belsejében maradó folytonossági hiány kiterjedését jellemzi, vagyis a középvonali dúsulásra megfogalmazott kettős kritérium – szennyező, ötvöző elemek dúsulása + folytonossági hiányok jelenléte – közül elsősorban ez utóbbira jellemző. Az így meghatározott dúsulási index áttételesen az acél kémiai összetételétől is függ, hiszen a zsugorodás mértéke a kémiai összetételnek is függvénye.

Az elvégzett kutatási tevékenység legfőbb eredményeinek az alábbiak tekinthetők:

- egyértelműen tisztázódott, hogy a középvonali dúsulás két részfolyamat, a makrodúsulás és/vagy mikroüregek együttes képződésének eredménye,
- a folyamatos öntés vizsgált viszonyrendszerében a zsugorodást kompenzáló olvadék áramlás 30 % körüli mushy olvadék tartalomnál történő leállása figyelhető meg,
- valószínűsíthető, hogy a középvonali dúsulás minősítésére alkalmazott sósavas makromaratási eljárás elsősorban a folytonossági hiányok jelenlétére érzékeny,
- az LMI modell alkalmazásával a valós öntési viszonyok között várható porozitási mérték becsülhető,
- a kidolgozott módszerrel lehetőség nyílik adott összetételű acél esetén a porozitási mérték csökkentése érdekében a támgörgő résbeállítás és a technológia összhangjának megteremtésére.

Hivatkozások

[3.1] Y. Tsuchida et al.: Behavior of Semi-macroscopic Segregation in Continuously Cast Slabs and Technique for Reducing the Segregation, Transactions ISIJ, Vol. 24, 1984, pp.899-906

[3.2] H. Jacobi: Investigation of Centreline Segregation and Centreline Porosity in CC-Slabs, Steel Research, Vol. 74, No. 11/12, 2003

[3.3] H. Presslinger et al.: Methods for Assessment of Slab Centre Segregation as a Tool to Control Slab Continuous Casting with Soft Reduction, ISIJ International, Vol 46, No. 12, 2006, pp. 1845-1851

[3.4] G. Lesoult: Macrosegregation in Steel Strands and Ingots: Characterisation, Formation and Consequences, Materials Science and Engineering A, Vol. 413-414, 2005, pp. 19-29

[3.5] J. Miettinen, H. Kytönen, S. Louhenkilpi: BOS – Analytical Bulging Model for Continuous Casting Slabs, HUT Publications in Materials Science and Metallurgy, ISSN 1455-2329, Espoo 2001

[3.6] Sivesson, P: On the Control of Centerline Segregation in Continuous Casting, PhD Thesis, Dep. of Mat. Proc., Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1997

A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk

[S.3.1] Réger M., Verő B., Csepeli Zs., Szélig Á.: "Folyamatosan öntött bugák makrodúsulása", BKL Kohászat 2004. 5. szám, pp. 9-13

[S.3.2] M. Réger, B. Verő, Zs. Csepeli, Á. Szélig: Macrosegregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM, Vol. 508 pp. 233-238, 2006

[S.3.3] M. Reger, H. Kytönen, B. Verő, A. Szelig: Estimation and Consequences of Shrinkage of Steel Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM, Vol 589, pp. 43-48, 2008

[S.3.4] M. Reger, H. Kytönen, B. Verő, A. Szelig: Effect of the Casting Machine Condition on the Quality of Cast Slabs, Acta Mechanica Slovaca, 3-A/2008, pp. 373-380

[S.3.5] M. Reger, H. Kytönen, B. Vero, A. Szelig: Centreline Segregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 649: pp. 461-466. (2010)

[S.3.6] M. Reger, H. Kytönen, B. Verő, A. Szelig: On the Centreline Segregation of CC Slabs, 6th European Continuous Casting Conference, 3-6 June, Riccione, Italy, 2008, Associazione italiana di metallurgia, pp. CD1-12.

[S.3.7] M. Reger, H. Kytönen, B. Verő, A. Szelig: Újabb gondolatok a lemezbugák középvonali dúsulásáról, MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK - DUNAFERR DUNAI VASMŰ RT XLVII:(4) pp. 183-190. (2007)

4. Olvadékáramlás a mushy szakaszon

A lemezbuga belső minősége szempontjából meghatározó jelentőségű mindaz, ami az öntött szál mushy szakaszán belül történik. Ebben a tartományban a külső felületen kialakuló hűtési fluktuációk, hirtelen változások kevéssé befolyásolják közvetlenül a kristályosodási front alakját, mivel a hőelvonás a több centiméter vastagságú, már szilárd állapotú acél kérgen keresztül történik. Az öntött szál mushy szakaszának – melyben a középvonal hőmérséklete a likvidusz és szolidusz közé esik – hossza, elhelyezkedése természetesen függ az öntés technológai paramétereitől, ezen belül a szekunder hűtés jellemzőitől is és persze erőteljesen a kémiai összetételtől, hiszen alapvetően ez határozza meg a likvidusz és a szolidusz értékét, illetve a köztük lévő különbséget.

A mushy zónában kialakuló áramlások és a makrodúsulás kapcsolatát vizsgálta B. Barber [4.1], aki a makrodúsulás számítására Miyazawa és Schwerdtfeger 1981-es modelljét bővítette ki. Ismerteti a modell matematikai hátterét, a vonatkozó tömeg-megmaradási törvényeket és a megoldandó Darcy törvényt, illetve ezek kapcsolását. A cikk alapvetően elméleti jellegű, bár néhány, véges differencia módszerrel végzett próbaszámítás eredményei is szerepelnek a dolgozatban. Ugyanakkor a számításokhoz tartozó feltételrendszer, az anyagjellemzők értékei, illetve a dendritvázak alkotta alagút rendszer jellemzői nincsenek definiálva. Ez kutatás is ECSC pályázat [4.2] keretében valósult meg.

Sokkal általánosabb és egyben bonyolultabb megközelítést ismertet G. Lesoult és munkatársai tanulmánya [4.3], melyben a kristályosodás és a szivacsosnak tekintett mushy tartomány alakváltozása következtében kialakuló dúsulás becslésének matematikai módszerét tárgyalják. Egy adott vizsgálati tartományban (domain-ban) egy adott elem tömegarány-megváltozásának jellemzésére bevezették "helyi makroszegregációs sebesség" fogalmát, mely explicit formában meghatározható. Ez az a jellemző, mely az elvárások szerint érzékenyen változik a kristályosodás előre haladása és a szivacsos dendritváz alakváltozása következtében.

A mushy zóna viselkedésére vonatkozó alapmérések megvalósításában – melyek elsősorban az alakváltozás hatására bekövetkező változások nyomon követésére irányulnak – a kutatók gyakran Gleeble termomechanikus szimulátort alkalmaznak [4.4-4.6]. Ezek a kutatások elsősorban a vonatkozó viszonyok között érvényesnek tekinthető anyagjellemzők meghatározására szolgálnak. Az eredmények a fém-mátrixú kompozitok technológiájában is alkalmazhatók.

A vonatkozó szakirodalom alapján – egyenlőre – nem fogalmazható meg egy olyan, gyakorlati viszonyok között alkalmazható modell, melynek segítségével az öntött szál mushy szakaszára nézve megbízható képet alkothatnánk az áramlási és koncentráció viszonyokról. A következőkben részletezett megközelítés, bár teljesen más alapokon nyugszik, ezt a hiányt igyekszik részben pótolni.

Az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. két vertikális öntőgépére vonatkozó adatok szerint átlagosan mintegy 5 méter hosszúságúnak tekinthető az öntött szál azon szakasza, melyre igaz, hogy a középvonalban mushy állapot a jellemző. (Ugyanez a paraméter a finnországi ívelt öntőgépre vonatkozóan 10-15 méter.) Fogadjuk el az előző fejezetben részletezett feltevést, miszerint az olvadék szabad áramlására 30 % körüli mushy olvadék tartalomig lehet számítani és a mushy szakasz legelején a mushy olvadék arány mintegy 60 % (3.2 ábra). Ekkor például a vertikális öntőgépre jellemző 5 méter körüli hosszúságú mushy szakasz két részre bontható, a felső 2,5 méteren az olvadék szabad áramlására még többé-kevésbé van

lehetőség, az alsó 2,5 méteren viszont csak kényszerből, például a támgörgők nyomó hatása miatt jöhet létre olvadékáramlás.

Az alsó 2,5 méteren ennek megfelelően a domináns folyamat a fogyási üregek képződése, de közben az erősen dúsult, így alacsonyabb szolidusz hőmérsékletű olvadéknak a fogyási üregekbe történő részleges beszivárgása is megtörténhet. Ezzel a jelenséggel magyarázható Presslingernek az a megfigyelése, hogy a középvonali dúsulási zónában mérhető maximális dúsulási index korrelál a porozitással [3.3]. Az, hogy milyen mértékben képződnek fogyási üregek, nagyrészt annak a függvénye, hogy a támgörgők beállításából adódó összenyomás és a zsugorodásból adódó térfogatváltozás mennyire van összhangban. Az előző fejezetben ismertetett matematikai statisztikai és olvadék áramlás intenzitási modell alapján kidolgozott számítási eljárás ezt a térfogat különbséget alkalmazza a porozitás jellemzésére a mushy szakasz alsó részén. A felső, szintén mintegy 2,5 méteres mushy szakaszra nézve az öntött szálban nagyobb szerepet játszhat az olvadék áramlása, az ezzel kapcsolatos feltevéseket és számításokat ebben a fejezetben részletezzük.

A makrodúsulás kialakulásához – mint említettük – olvadékáramlás szükséges, melynek eredményeként nem egyensúlyi kristályosodási koncentráció viszonyok alakulnak ki. A következő részekben egyrészt a koncentráció viszonyok szempontjából vizsgáljuk a mushy olvadékot, másrészt megvizsgáljuk a mushyban történő olvadékáramlás kvantitatív jellemzésének lehetőségét.

4.1 A dendritek közötti olvadék jellemzése

Mivel a szilárd dendritvázak között feldúsult olvadék van jelen, ezért a dúsulás mértéke, illetve a mushy olvadék koncentrációja erősen függ a kristályosodás fokától. Ennek illusztrálására két példát mutatunk be. A 4.1 ábra diagram sorozata az A1 elnevezésű preperitektikus összetételű adag ívelt öntőgépen történő gyártására vonatkozik. Az adag átlagos összetétele C=0.06 %, Mn=0.54 %, Si=0.04 %, S=0,005 %, P=0.007 % koncentrációkkal jellemezhető. A kis mennyiségű ötvöző és szennyező tartalom eredményeként ezek az acélok általában nem hajlamosak makrodúsulásra, ugyanakkor a középvonali szegregációs hajlam tekintetében statisztikailag szignifikánsan nem különböznek az előző fejezetben említett 400 adag jellemzőitől.

A 4.1 a./ diagram a szilárduló kéreg jellemzőit mutatja, feltüntettük a likvidusz és szolidusz pozícióját, valamint a mushy zóna vastagságát, illetve azon belül a mushy-ban található olvadék "virtuális vastagságát", melyre vonatkozóan a részletek az A1. mellékletben olvashatók (a mushy-n belül az olvadék nyilvánvalóan a dendritek között található, de definiálható egy mushy olvadék vastagság, mely mushy-ban elhelyezkedő olvadék mennyiségével arányos). Hasonlóan a 3.2 ábrán látott viszonyokhoz, ebben az esetben is a mushy, illetve a mushy olvadék vastagsága maximumos jellegű. Az öntött szál hosszában tehát a kb. 13 és 23 m közötti szakaszon, vagyis mintegy 10 m hosszan található az a tartomány, ahol a középvonalban már a mushy állapot jellemző. Ha például a meniszkusz szinttől 20 m-re vizsgáljuk a lemezbuga mushy zónájában a viszonyokat, a 4.1 a/ ábra alapján megállapítható, hogy a szilárd kéreg vastagsága 91,2 mm (ez a szolidusz hőmérsékletű kristályosodási front helyzete). A likvidusz front már jóval korábban, 13,2 m-nél elérte a lemezbuga középvonalát (109 mm a lemezbuga vastagságának fele). A mushy zóna vastagsága így 109-91,2=17,8 mm-re adódik, ez olvasható le a zöld görbéről 20 m-nél (távolság a szolidusz hőmérsékletű kristályosodási front és a lemezbuga középvonala között). Ugyanakkor az is látszik, hogy mushy-ban csak a 6/17,8=0,337-ed résznyi az olvadék

mennyisége (33,7 %), a maradék (17,8-6)/17,8=0,663-ed rész (66,3 %) már megszilárdult. A mennyiségi viszonyok szemléltetésére – összhangban az A1 mellékletben leírtakkal – és a könnyebb kezelhetőség érdekében azt is mondhatjuk, hogy a 17,8 mm vastagságú mushy zóna két részből áll, tartalmaz egy 17,8-6=11,8 mm vastagságú már megszilárdult részt (mushy szilárd) és egy 6 mm vastagságnyi olvadékot (mushy olvadék). Mivel a mushy kristályosodása még nem fejeződött be, így a mushy szilárd fázis és a mushy olvadék fázis összetétele természetesen eltér az acél átlagos összetételétől, jellemzően úgy, hogy a szilárd fázis kevesebb, az olvadék fázis több ötvözőt, illetve szennyezőt tartalmaz, mint az átlag.

Elemezzük ezek után a mushy olvadékban kialakuló koncentrációs viszonyokat a közelítőleg érvényes átalakulási diagram (1 °C/s hűtési sebességre érvényes többkomponensű átalakulási diagram, IDS) és a mushyban lévő hőmérséklet eloszlás figyelembe vételével meghatározott számszerűsített (mennyiségi) adatok alapján. A mushy olvadék összetételére vonatkozó becslést a 4.1 b-f/ ábra mutatja. A 4.1 b/ ábra a karbontartalom alakulását ábrázolja. A mushy olvadékban előforduló koncentráció legkisebb értékét a piros, legnagyobb értékét a zöld vonal reprezentálja. A mennyiségi viszonyokat is figyelembe vevő átlagos karbontartalmat a fekete görbe jelzi. Az átlagértékek meghatározása numerikus eljárással történt. A lemezbuga egy adott keresztmetszetében a mushy zónát véges számú szakaszra osztottuk, egy-egy szakaszon belül azonos hőmérsékletet feltételeztünk. A többkomponensű, közel egyensúlyi fázisdiagramból (IDS) ismertek az adott hőmérsékleten egymással egyensúlyt tartó fázisok mennyiségi és koncentrációs viszonyai. Ezek egyedi meghatározása és megfelelő átlagolása szolgáltatja a 4.1 b-f./ ábrák koncentrációra vonatkozó adatait. A görbék töredezett jellege a numerikus módszer alkalmazásának szükségszerű következménye.

Ha a koncentráció viszonyokat pl. 20 m távolságban vizsgáljuk a meniszkusz szinttől, azt találjuk, hogy a mushy olvadékban előforduló legkisebb karbonkoncentráció ebben a metszetben 0,073 % (piros vonal), a legnagyobb 0,372 % (zöld vonal), a mennyiségi viszonyokat is figyelembe vevő átlagos karbontartalom pedig 0,176 % (fekete vonal). Tehát a 6 mm-nyi vastagságú mushy olvadék átlagos karbontartalma 0,176 %. Ahogy folytatódik a kristályosodás (haladunk jobbra az x tengely mentén) a mushy olvadék mennyisége csökken (4.1 a/ ábra), miközben az egyre fogyó olvadék karbontartalma nő, egészen a zöld vonal által jelzett maximális értékig (4.1 b./ ábra). Hasonló módon értelmezhetők a 4.1 c-f./ diagramok is sorrendben a mangán, a szilícium, a kén és a foszfor vonatkozásában. Végezetül a 4.1 g./ ábra összefoglalóan bemutatja az öt elemre nézve a mushy olvadékban kialakuló átlagos koncentráció értékek változását az adagra vonatkozó átlagos összetételhez viszonyítva, ez tehát a mushy olvadékra vonatkozó dúsulási viszonyszám. Ez azt jelenti, hogy a szálban jelenlévő mushy olvadék 14-szer annyi ként tartalmaz, mint az eredetileg volt az acélban, továbbá kb. 6-szor annyi karbont, 3-szor annyi foszfort és mintegy 1,5-szer annyi mangánt és szilíciumot, ez utóbbi két ötvözőre vonatkozó vonal nagyjából egybe is esik a diagram szerint. Ha a mushy olvadék nem mozdul el a belőle kristályosodó (vele egyensúlyt tartó) szilárd fázis közeléből, akkor ezek a koncentráció különbségek nagyrészt kiegyenlítődnek, illetve egy részük mikrodúsulás formájában megmarad. Akkor kezdődnek makrodúsulásos problémák, ha áramlás lép fel. Látható, hogy amint halad előre a kristályosodás, egyre kisebb mennyiségű, de egyre dúsabb az olvadék, így az sem közömbös, hogy a szál mely részében, a kristályosodás mely fokánál történik olvadékáramlás.









4.1 b./ A karbontartalom változása a mushy-ban (adag: A1, adag karbon = 0,06 wt%)



4.1 c./ A mangántartalom változása a mushy-ban (adag: A1, adag Mn = 0,54 wt%)





4.1 d./ A szilícium tartalom változása a mushy-ban (adag: A1, adag Si = 0,42 wt%)



4.1 e./ A kéntartalom változása a mushy-ban (adag: A1, adag S = 0,005 wt%)



4.1 f./ A foszfortartalom változása a mushy-ban (adag: A1, adag P = 0,007 wt%)

dc_24_10



4.1 g./ A mushy átlagos összetételének változása az eredeti összetételhez viszonyítva
 4.2 ábra Koncentrációk változása a mushy zónán belül (A1 adag)

A összetétel dúsulásra gyakorolt hatását bemutatandó, vizsgáljunk meg egy másik – a peritektikus tartományba eső – acélban kialakuló viszonyokat. Ezek az acélminőségek a folyamatos öntés viszonyai között makrodúsulásra sokkal hajlamosabbak, mint az A1 adag. A 4.2 ábra sorozat felépítése teljesen megegyezik az előzővel, különbség csak a kémiai összetételben és persze az öntési technológiában van. Az ábrákon bemutatott acéladag (A2) jellemző átlagos összetétele a következő: C=0,153 %, Mn=1,44 %, Si=0,2 %, S=0,003 %, P=0,009 %. Az egyes elemek dúsulásának abszolút értéke a 4.2. b-f./ ábrákon a relatív – adagösszetételhez viszonyított – dúsulási mérték a 4.2 g/ ábrán tekinthető át. A 4.1.g/ és 4.2.g./ ábrát összehasonlítva drasztikus különbség a dúsulási viszonyszámok alakulása tekintetében nem állapítható meg. Ez egyben azt is jelzi, hogy a mikrodúsulási viszonyszám nem feltétlenül jellemzi az illető acél makrodúsulási tulajdonságait, hajlamát.

Itt érdemes megemlíteni, hogy a makrodúsulást tartalmazó, az A2 adagösszetételhez közelálló St 52-es minőségű durvalemezekben hozzávetőlegesen max. 0,3-0,4 % karbont és 1,8-2 % körüli mangánt lehet mérni a középvonal környékén. Ilyen összetételű mushy olvadék a 4.2 b./ és c./ ábra szerint már a mushy tartomány első felében is előfordul.



4.2 a./ A kristályosodó kéreg jellemzői (adag: A2)





4.2 b./ A karbontartalom változása a mushy-ban (adag: A2, adag karbon = 0,153 wt%)



4.2 c./ A mangántartalom változása a mushy-ban (adag: A2, adag Mn = 1,44 wt%)



4.2 d./ A szilícium tartalom változása a mushy-ban (adag: A2, adag Si = 0,208 wt%)





4.2 e./ A kéntartalom változása a mushy-ban (adag: A2, adag S = 0,003 wt%)



4.2 f./ A foszfortartalom változása a mushy-ban (adag: A2, adag P = 0,009 wt%)



4.2 g./ A mushy átlagos összetételének változása az eredeti összetételhez viszonyítva
 4.2 ábra Koncentrációk változása a mushy zónán belül (A2 adag)

4.2 Az áramlási viszonyok jellemzése az öntött szál mushy szakaszában

Az öntött szál mushy szakaszának felső részében tehát lehetőség kínálkozik az olvadék áramlására, így ott az éppen aktuálisan kialakuló kristályosodási, térfogati és deformációs viszonyok függvényében számítani lehet az olvadék erőteljesebb kifelé, vagy befelé irányuló mozgására. Az olvadékáramlás a mushy zónán belül irányt is válthat, attól függően, hogy ezen a tartományon belül az egyes szakaszokban a térfogat növelő, vagy a térfogat csökkentő hatások lesznek a meghatározók. Ennek megfelelően bizonyos helyekre extra mennyiségű feldúsult olvadék áramolhat, ott elkeveredhet a már jelenlévő olvadt acéllal, aztán esetleg a következő fázisban éppen kifelé áramlásra is sor kerülhet.

Az öntött szál és a benne lévő olvadék közötti relatív sebességkülönbség irányának és nagyságának becslésére számítási módszert dolgoztunk ki. A számítási elv és annak részletei az A2 mellékletben találhatók.

A számítás eredményeképpen meghatározható az öntött szálhoz viszonyított relatív olvadékáramlási sebesség, illetve annak eloszlása a mushy zóna figyelembe vett hosszára vonatkozóan. Az utolsónak adódó I_0 érték azon a határfelületen működik, mely éppen az $L_{tócsaliq}$ távolságban található a meniszkusz szinttől számítva, vagyis e fölött a pozíció fölött már nemcsak mushy, hanem a likviduszt meghaladó hőmérsékletű olvadék is jelen van a két oldalról növekedő kristályosodási frontok között. Megjegyzendő, hogy a bemutatott számítási eljárás természetesen csak közelítő megoldást ad, hiszen az egyszerűsítés eredményeként a három-dimenziós feladatot egy síkbeli problémára vezettük vissza. Így pl. feltételeztük, hogy a mushy zónában az olvadék mozgása csak öntési irányú, vagy azzal ellentétes lehet. A modell alkalmazása – a megfogalmazott feltételezések elfogadása mellett – kiterjeszthető a széles oldalra merőleges, de nem a szimmetriasíkban található öntési irányú metszetekre is.

4.3 Összefoglalás: a relatív sebesség alapján történő minősítés lehetőségei

Mint említettük, makrodúsulási szempontból az a legkedvezőbb, ha olvadékáramlásra nem kerül sor, vagyis az olvadék a belőle kristályosodó szilárd fázis környezetéből nem mozdul el. Ennek az a feltétele, hogy az olvadék és a szál relatív sebességkülönbsége zérus legyen. A relatív sebesség-eloszlásából tehát elvileg következtetni lehet a makrodúsulás mértékére, feltéve, ha ismerjük a mushy olvadék koncentrációjának hely szerinti eloszlását, a különböző koncentrációjú olvadékok keveredési szabályait, kinetikáját, az egész rendszer viselkedését, dermedését a dendritágak közötti sűrű alagút rendszerben. Ezekről a folyamatokról jelenleg még nagyon keveset tudunk. A kutatás munka jövőbeni egyik célja az lehet, hogy a dendritközi koncentráció eloszlására, olvadék valamint а mushyban kialakuló olvadékáramlási viszonyokra vonatkozó információkat összekapcsolja egy komplex rendszerré. Az értekezésben ismertetett eredmények arra alkalmasak, hogy az előnyös és hátrányos tendenciákat azonosítani lehessen, illetve a relatív sebesség eloszlás és a mushy zónában valószínűsíthetően kialakuló mushy olvadék koncentráció (4.1 és 4.2 ábrák) alapján dúsulási veszélyesség szempontjából az egyes öntési eseteket rangsoroljuk.

Az öntési esetek összehasonlításának, illetve minősítésének alapja az a két megállapítás, miszerint makrodúsulás szempontjából kedvező, ha

- minél kisebb a dendritközi olvadék ötvöző és szennyező tartalma, és
- minél kisebb a relatív olvadékáramlási sebesség a mushy zónában.

Ez utóbbi kijelentés további kiegészítésre szorul. Az olvadékmag redukció során a támgörgő távolság erőteljes csökkentésével "kiszorítják" a dúsult olvadékot az utoljára kristályosodó középső zónából. Ezzel kapcsolatban a kristályosodás utolsó szakaszára az 1 mm/m-es görgőtávolság csökkentési ütemet szokás ajánlani, mivel e határérték feletti deformációnál is a dúsulási index növekedését mutatják a vizsgálatok. Véleményünk szerint ennek az a magyarázata, hogy a nagyobb mértékű alakítás során a meniszkusz irányába visszaszorított dúsult olvadék is előbb utóbb kristályosodni kényszerül és ez a folyamat is dúsuláshoz vezet. A dúsulási index és az olvadékmag redukció minimumos függvénye [2.1, 2.4] összhangban van ezzel a feltételezéssel, hiszen ha túlzott mértékű a redukció, akkor előállhat a mushy szakaszból kiszorított dúsult olvadék dermedésének esete. Az olvadékmag redukció mértékét felülről tehát a dúsult olvadék visszaáramlásának jelensége szabhatja meg. Ezek alapján feltételezhetjük, hogy a dúsult olvadék kismértékű kiszorítása (kicsi kifelé irányuló, pozitív relatív sebességkülönbség az olvadék és a szál között) kedvezőbb helyzetet eredményez, mint fordítva, ha a dúsult olvadék befelé szívódik a kristályosodás utolsó szakaszában. A mushyból kiszorított, kis mennyiségű olvadéknak esélye van ugyanis az első esetben a "friss" olvadékkal való felhígulásra.

A következő fejezetekben bemutatom, hogy a középvonali dúsulással kapcsolatosan definiált két jellemző, a porozitási mérőszám és a relatív sebesség eloszlás milyen módon változik a kristályosodási, öntési paraméterek, valamint az öntőgép résméret beállításainak függvényében.

Hivatkozások

[4.1] A. Barber, P.A. Emtage, S.A. Moir: Predicition of Segregation in As-Cast Semis, Proceedings of ECCC 2005 - 5th European Continuous Casting Conference, 20-22. June 2005
[4.2] Strand Reduction in Slab Casting and Its Effect on Product Quality", ECSC Research Contract 7210.CA/186/840/187/188, July 1996 – June 2000

[4.3] G. Lesoult, Ch.-A. Gandin, N. T. Niane: Segregation during solidification with spongy deformation of the mushy zone, Acta Materialia, Vol. 51, Iss. 18, 20 October 2003, pp. 5263-5283

[4.4] M. Glowcki, M. Hojny: Computer Modelling of Deformation of Steel Samples with Mushy Zone, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal, 5–8 June 2006

[4.5] M. Glowacki, Z. Malinowski, M. Hojny, D. Jedrzejczyk, The Physical and Mathematical Modeling of Plastic Deformation of Samples with Mushy Zone, Proc. Int. Conf. Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 79-86, 2004

[4.6] D. Ferguson et al.: Acélok folyamatos öntésének fizikai szimulációja, BKL Kohászat, 140. évf. 2. sz., 2007, pp.1-6

A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk

[4.1] Réger M: Válasz Kaptay Györgynek. BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 138:(5) pp. 14-18. (2005)

[4.2] Réger M, Verő B, Csepeli Zs, Szélig Á: Macrosegregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 508: pp. 233-238. (2006)

[4.3] Réger M, Verő B, Szelig Á: 3D Characterization of Continuously Cast Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 537-538: pp. 555-562. (2007)

5. A porozitási és a sebesség-eloszlási függvények alkalmazása

A következőkben néhány példán keresztül azt elemzem, hogy az előzőek szerint meghatározott, a porozitást és az olvadékáramlást jellemző paraméterek hogyan változnak az öntési paraméterek és az öntőgép jellemzői függvényében. Az elemzést az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. öntőgépein megvalósuló viszonyok figyelembe vételével végeztük el.

A vonatkozó két vertikális öntőgép állandó névleges támgörgő beállítási távolságokkal üzemel. Ezek a távolságok a támgörgők meniszkusz szinttől való távolságának függvényében változnak a 5.1 ábrának megfelelő módon. A támgörgő távolságok beállítása a támgörgő szekciók szerelésekor történik, a valós görgőtávolságok időszakos, rendszeres ellenőrzésére nincs lehetőség.

A támgörgő résméret és a belső minőségi jellemzők közötti alapvető kapcsolatok bemutatására tekintsünk egy állandósult állapottal jellemezhető öntési esetet (14-es eset).

Adagszám:	616144
Öntőgép száma:	2
Lemezbuga méret:	B13 mindkét szálon
Minőség:	St 52-3
Öntési osztály:	3
Likvidusz és	1510 °C
szolidusz hőmérsékletek:	1475 °C
Öntési sebesség:	0,57 m/perc
Átlagos túlhevítés:	25 °C
Szekunder hűtővíz mennyiségek	1a: 18,8
hűtőzónánként, m ³ /óra:	1b: 27,4
	2: 18,8
	3: 16,6
	4: 13,2
	5: 12,2

5.1 A résméret csökkenési ütemének hatása

A támgörgő résméret és a belső minőségi jellemzők közötti kapcsolatrendszert 9 féle résméret változtatási variáció modellezésén keresztül térképeztük fel, a fenti állandósult állapotú öntési viszonyok feltételezésével. Minden esetben a 4 m-es meniszkusz szinttől való távolságig a névleges támgörgő beállítást (5.1 ábra), majd attól kezdve különböző mértékű, de egyenletes támgörgő résméret csökkentést alkalmaztunk. (A "támgörgő résméret csökkenés" helyettesítésére a magyar szaknyelvben elterjedt a konicitás kifejezés, a következőkben az egyszerűség érdekében esetenként mi is ezt használjuk, bár az elnevezés több szempontból is megtévesztő). A támgörgő távolság csökkenési ütemét a 4 m-es meniszkusz szinttől 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 mm/m értékűnek tételeztük fel. Természetesen a résméret értékeket csak a dermedés befejeződéséig tekintettük érvényesnek. A vizsgált esetekben adódó résméreteket összefoglalóan mutatja az 5.2 ábra, melyben az üzemszerűen alkalmazott névleges résméret beállítást is feltüntettük.





5.1 ábra A vertikális öntőgép névleges fél résméretei



5.2 ábra A fél résméret szűkítésének vizsgált variációi

A 5.3 ábra diagram sorozata a fenti esetekre vonatkozó eredményeket foglalja össze. A diagramok felépítése hasonló: a vízszintes tengely a meniszkusz szinttől való távolságot mutatja, a bal oldali tengelyen az előző fejezetekben ismertetett két minőségi mérőszám (porozitás, sebesség), a jobb oldali tengelyen pedig az adott esetben feltételezett fél-résméret változás látható. Az olvadék sebessége esetében a könnyebb áttekinthetőség érdekében az eredeti értékek 5000-szeresét ábrázoltuk. A pozitív érték a mushy olvadéknak a meniszkusz irányába történő mozgását jelenti (mushyból való kinyomódás), míg a negatív érték azt jelzi, hogy az adott helyen az olvadék a húzógörgők irányában mozog, azaz olvadék beszívás történik. A diagramokon a fekete vonal mutatja a porozitás, a piros a sebesség változását, a kék pedig a résméretet.

Nézzük a sorozat első – magyarázatokkal kiegészített – 5.3/1 számú ábráját. A támgörgő résméret (kék vonal) ebben az esetben 4 m-ig követi a névleges beállítást, majd attól kezdve 0 mm/m szűkülést mutat, azaz a résméret nem változik 4 m után az öntőgép hossza mentén. Az ábra alsó részén látható a sebességmezőt (5000-szeres léptékben) és a porozitást reprezentáló két függvény, azonos koordináta rendszerben. A sebességfüggvény a szál mushy szakaszának első felében, azaz 60 % és 30 % mushy olvadék tartalom között értelmezett. Az első érték megfelel a likvidusz hőmérsékletnek a második pedig a likvidusz és szolidusz átlagának

(0,3/0,6*(T_{likvidusz}-T_{szolidusz}). A sebességfüggvény első, nem nulla értéke tehát a szál mushy szakaszának első pontjában adódik, amikor a szál középvonali hőmérséklete eléri a likviduszt. Ekkor a sebességi érték negatív, vagyis az olvadék a húzógörgők irányába (öntési irány) áramlik. 6000 mm-es távolságban a meniszkusztól pl. az olvasható le, hogy az áramlás – bár kisebb sebességgel jellemezhető, mint a likviduszra értelmezett tócsamélységnél – még mindig negatív, sőt az egész értelmezési tartományban olvadék beszívás történik. A sebességfüggvény utolsó pontja (30 % mushy olvadék aránynál) nulla értéket mutat, vagyis nincs relatív sebesség különbség a szál és az olvadék között (a kiindulási feltételek szerint itt szűnik meg az áramlás).



5.3/1 ábra A porozitási és sebességi jellemző kialakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0 mm/m)

Ettől a ponttól a szoliduszra számított tócsamélységig értelmezett a porozitás függvény (megszűnik a szabad olvadékáramlás, így porozitás kialakulására lehet számítani). Értelemszerűen ez a függvény csak pozitív (esetleg nulla értékű) lehet. Minél nagyobb az értéke, annál nagyobb arányban alakul ki porozitás. A lemezbugában megmaradó porozitás a függvény utolsó értelmezett pontjának értékével jellemezhető (vagyis amikor a szál középvonalában a hőmérséklet eléri a szolidusz hőmérsékletet).

Dúsulási szempontból kedvező, ha a sebesség függvény zérus (kicsi áramlási sebesség, sem olvadék beszívás, sem kinyomás nem történik) és a porozitási függvény is zérus (a kristályosodás okozta térfogatváltozás a támgörgő távolságok szűkülésével kompenzálódik).

A 5.3/2-5.3/9 ábrákon végig követhető a támgörgő rés csökkenési ütemének hatása a két jellemzőre. Ahogy növekszik a konicitás, a sebességek egyre inkább a pozitív tartományba csúsznak, vagyis az mushy-ból való olvadék kinyomódás (áramlás a meniszkusz irányába) lesz domináns, ezzel párhuzamosan egyre csökken a porozitási érték. Érdekes állapotot tükröz a 5.3/4 ábra, mely szerint 0.15 mm/m-es konicitásnál a szálban egy szakaszon (kb. 6200 és 8200 mm között) az olvadék kifelé, a meniszkusz irányába áramlik, aztán a mushy szakasz elején az áramlási irány megfordul, kb. 5400 és 6200 mm között az olvadék beszívása dominál.

dc_24_10



5.3/2 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,05 mm/m)



5.3/3 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,1 mm/m)



5.3/4 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,15 mm/m)





5.3/5 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m)



5.3/6 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,25 mm/m)



5.3/7 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,3 mm/m)





5.3/8 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,35 mm/m)



5.3/9 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,4 mm/m)

A 5.3/10-es ábra a névleges támgörgő beállítás esetére vonatkozik. A sebességfüggvényben több – a támgörgő rések pillanatnyi helyzetével összefüggő – szakasz azonosítható. Összességében a sebesség végig pozitív, vagyis a meniszkusz irányába történő olvadék kinyomódás a domináns folyamat.

A számítási eredmények könnyebb összehasonlíthatósága céljából készült a 5.4 ábra, mely a vizsgált 10 esetre egy diagramban mutatja a sebességfüggvény alakulását. Kicsit pozitív, de közel zérus értékű sebességek adódnak 0,2 mm/m-es beállításnál, az olvadékáramlás szempontjából ez tűnik a legkedvezőbb esetnek. Az is megállapítható, hogy a névleges beállítás relatíve nagy – igaz kifelé irányuló – olvadékáramlást idéz elő.

A porozitási értékek összehasonlítását mutatja be a 5.5 ábra. Ahogy csökken a konicitás, egyre kisebb a porozitás, de megfigyelhető, hogy még a legnagyobb rés csökkenési ütem (0,4 mm/m) esetén is csak kb. felére csökken a porozitási mérőszám a 0 konicitású helyzethez képest.





5.3/10 ábra A porozitási és sebességi jellemző kialakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás a névleges értékű)



5.4 ábra A sebességi függvény alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában különböző támgörgő rés szűkülések esetén



5.5 ábra A porozitási függvény alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában különböző támgörgő rés szűkülések esetén

Annak megítélésére, hogy milyen résméret szűkítés szükséges a porozitás lényeges csökkenéséhez, további számításokat végeztünk még intenzívebb támgörgő konicitási értékekkel. Ennek eredményét a 5.6 ábra tartalmazza, az összehasonlíthatóság érdekében feltüntettük a 0 és a 0,4 mm/m-es értéket, valamint a névleges beállítás esetét is. A porozitási mérőszám intenzíven csökken a 0,5-1 mm/m-es intervallumban. Ez utóbbi értéknél már közel zérus a porozitás, ami igazolja azt a korábban említett feltételezést, hogy az olvadékmag redukció esetére javasolt 1 mm/m-es szűkítési érték valójában a porozitás drasztikus csökkentését célozza.



5.6 ábra A porozitási függvény alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában növelt támgörgő rés szűkítés esetén

A számításokkal kapcsolatban megjegyezzük azt a korábban még nem említett körülményt, hogy a támgörgő résméret szűkülés üteme mind a likviduszra, mind szoliduszra vonatkozó tócsamélységet befolyásolja. Nagy konicitás esetén csökken a tócsamélység, hiszen a kétoldalról növekvő kéreg hamarabb összeér, mint kicsi konicitás esetén. Ennek figyelembevételére is sor kerül a számítási algoritmusban, így a tócsamélység kismértékben változik a figyelembe vett résbeállítás függvényében. Ez az oka annak, hogy a 5.6 ábrán a tócsamélységek nem teljesen egyformák. Nagyobb nagyításban ábrázolva ezt a tartományt adódik a 5.7 ábra diagramja, mely a szoliduszra számított tócsamélység alakulását mutatja a különböző konicitású esetekre. Az ábra cm-es felbontásban (ez a számításhoz alkalmazott felbontás is) mutatja a szál 10740 és 10880 mm közötti szakaszát. Megfigyelhető, hogy ahogy nő a konicitás értéke a 0-1 mm/m-es tartományban, úgy csökken a szoliduszra számított tócsamélység 10870 mm-ről 10740 mm-re. Hasonló korrekciót végeztünk a likviduszra számított tócsamélységre vonatkozóan is.

5.2 Anomáliák a résméretben

Az előző fejezetben bemutatott esetekben a résméret csökkenési üteme változott ugyan, de a csökkenés üteme minden esetben konstans volt. Célszerűnek tűnt megvizsgálni azt is, hogy a támgörgők beállításának esetleges – a tapasztalatok szerint a valóságban is gyakorta előforduló – anomáliái (kopás, beállítási hiba, csapágyhiba, stb.) hogyan befolyásolhatják a sebességi és a porozitási függvények alakját, illetve azok végső értékeit.

Mint említettük, a 0,2 mm/m-es konicitású beállítás tűnik olvadékáramlási szempontból a leginkább megfelelőnek. (Megjegyezzük, hogy a lemezbuga széles oldalának felező egyenesén, a felületre merőleges síkot vizsgálva optimális a 0,2 mm/m-es érték, feltételezhető, hogy a buga egészére, pl. a "W" alakú tócsa maximum értékeinek pozíciójában nem ez az optimum.) A következőkben néhány szimulációs kísérlet eredményét ismertetjük és elemezzük. Bizonyos kristályosodási szakaszig legyen a konicitás 0,2 mm/m, majd tételezzünk fel valamely támgörgő beállítási hibát, amely megzavarja a rés csökkenési ütemének egyenletességét.



5.7 ábra A tócsamélység változása a különböző támgörgő beállítások esetén

Az első esetben minden támgörgő legyen megfelelő pozícióban (0,2 mm/m), csak kettő, a meniszkusz szinttől 6870, illetve 9320 mm-nél találhatóknál tételezzünk fel beállítási hibát. Legyenek ezek a görgők a névleges helyzetüknél fél mm-el távolabb a lemezbuga felületétől a (számítás kódja: 02var1). A két – hibásan beállított – görgőt úgy választottuk ki, hogy az egyik a sebesség, a másik a porozitás függvény értelmezési tartományába essen. A 14-es számú számításhoz tartozó állandósult állapot fennállását továbbra is feltételezzük. A görgőbeállítás, valamint a sebességi és porozitási függvény a 5.8/1 ábrán látható. Az ábra szerkezete teljesen megegyezik a 5.3 ábrák felépítésével, a sebesség esetében ismét annak 5000-szeres értékét tüntettük fel. Jól látható, hogy egy görgő 0,5 mm-es pozícionálási hibája – elsősorban az olvadékáramlási sebesség tekintetében – drasztikus változást okoz.

A második variációban ugyanezen támgörgőknél, ugyanilyen mértékű, csak ellentétes irányú beállítási hibát tételeztünk fel, vagyis legyenek ezek a görgők a névleges beállításnál fél mmel közelebb a bugafelülethez. Az eredmények a 3.8/2 ábrán láthatók (0,2var2).

A következő két esetben tételezzük fel, hogy 4 m-től 5494 mm-ig 0,2 mm/m, ezt követően zérus konicitás működik. A beállítási helyzet hasonló a 5.3/1 ábrán bemutatotthoz, azzal a különbséggel, hogy 6870 és 9320 mm-nél található görgők legyenek megint hibásan pozícionálva, vagyis az egyik esetben fél mm-el távolabb (5.8/3 ábra, 0,2var3), a másikban fél mm-el közelebb (5.8/4 ábra, 0,2var4) a névleges értékhez viszonyítva.





5.8/1 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m, 1 varáció)



5.8/2 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m, 2 varáció)



5.8/3 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m, 3 varáció)





5.8/4 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m, 4 varáció)

A 5.8/5 ábra az ötödik támgörgő beállítási variációt, illetve annak eredményét ábrázolja. Mint látható, ebben az esetben szintén zéró a konicitás a kritikus tartományban, sőt két görgőpozícióban 0,1 mm-es nyitásra kerül sor (6870 mm-től és 9320 mm-től, 0,2var5).

A hatodik variációban az előzőhöz hasonló a helyzet, de a hibásan pozícionált támgörgők között 0,2 mm/m konicitást tételezünk fel (0,2var6). Az résbeállítás és a számítási eredmény a 5.8/6 ábrán látható.

Végezetül a 5.8/7 ábra mutatja a hetedik variációt (0,2var7), melyben 6870 mm-től egy nagyon enyhe, 0,01 mm/m-es egyenletes nyitást tételeztünk fel a támgörgők beállításában.



5.8/5 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m, 5 varáció)





5.8/6 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m, 6 varáció)



5.8/7 ábra A porozitási és sebességi jellemző alakulása a lemezbuga szimmetria síkjában (14-es állandósult állapot, 4 m-től a résváltozás 0,2 mm/m, 7 varáció)

A hét támgörgő beállítási variációban kialakuló sebesség és porozitási függvény összehasonlítása céljából készült a 5.9 (sebesség) és 5.10 (porozitás) ábra, melyeken a viszonyítás kedvéért vastag vonallal feltüntettük a 0,2 mm/m-es konicitáshoz, valamint a névleges beállításhoz tartozó esetet.

Az ábrák alapján megállapítható, hogy sebességfüggvény, vagyis az olvadékáramlás sebessége és iránya nagyon érzékenyen reagál a támgörgő beállításra, egy-egy támgörgő hibás helyzete extrém áramlási képet hoz létre. A porozitási függvény végső értéke minden egyéb esetben rosszabb, mint a 0,02 mm/m alapesetében, függetlenül attól, hogy kifelé, vagy befelé van-e a hibásan pozícionált támgörgő. Porozitási szempontból nincs lényeges különbség az 1-es és 2-es variáció között (5.8/1-2 ábra), mindegy, hogy közelebb, vagy távolabb vannak a támgörgők, egyformán káros a hatásuk.





5.9 ábra A 5.8 ábrán bemutatott esetekben kialakuló olvadékáramlási sebességek összehasonlítása



5.10 ábra A 5.8 ábrán bemutatott esetekben kialakuló porozitási értékek összehasonlítása

5.3 A támgörgők excentricitásának hatása

A tapasztalatok és a szakirodalom utalásai szerint a támgörgők excentricitására osztatlan támgörgő konstrukció esetén mindenképpen számítani kell. Az excentricitás miatt periodikusan változik a résméret, mely egy támgörgő esetében periodikusan változó sebesség és porozitás függvényt generál. A terhelés (öntés) alatt kialakuló excentricitás mértékére vonatkozóan igen kevés a megbízható adat. A múlt félév során egy kiválasztott, a hétgörgős szekcióba tartozó támgörgőn végzett, mintegy 2 órás mérési sorozat kétféle excentricitást mutatott ki. Egyrészt – feltehetően az egyik oldali csapágy hibája miatt – létrejött egy 0,3 mm körüli résméret ingadozás, mely a támgörgő egy körülfordulása alatt kilencszer ismétlődött. Másrészt azonosítható volt a támgörgő saját excentricitása is, ennek mértéke 0,08-0,1 mm. Az előző fejezet alapján az ilyen mértékű támgörgő beállítási hibák is erőteljesen módosítják a sebesség és porozitás alakulását.

Ha feltételezzük, hogy mindegyik támgörgő esetében van bizonyos periodikus résméret változás, akkor az egyedi támgörgő hatások bizonyosan egymásra szuperponálódnak. Ennek

eredményeként nemcsak egy sebesség és porozitási függvény definiálható, hanem azoknak egy valószínűsíthető csoportja, melyek értéke egy várható tartományon belül marad. A következőkben néhány számítási példán keresztül bemutatjuk az excentricitás várható hatásait.

Tételezzük fel, hogy a már eddig is vizsgált két támgörgő (6870 és 9320 mm-re a meniszkusztól) fordulatonként +/-0,2 mm-es excentricitást mutat. Legyen a meniszkusz szint alatt 4 m-es távolságtól kezdve 0,2 mm/m a résbeállítás konicitása. Egy adott véletlenszerűen definiált pozícióból indulva a támgörgők periodikusan változtatják a szál külső kontúrját ezekben a pontokban. Egy adott 0 időpillanatban a 5.11/1 ábra szerinti helyzetet tételezzük fel. Mindkét támgörgő esetében a névlegesnél egy kicsit nagyobb a görgőrés, ennek következtében változik a relatív sebesség és a porozitás függvény is a 0 excentricitású állapothoz képest (vö.a 5.8 és 5.9-es ábrák 0,2 mm/m-re vonatkozó függvényeivel).

Ahogy a támgörgők körbe fordulnak, változik az excentricitásból adódó hatás. 24 másodperc múlva pl. a 5.11/2 ábra szerinti helyzet áll elő, ebben a pillanatban az excentricitásból adódó hatás alig észrevehető. A támgörgők további fordulása eredményeképpen a szál külső kérge befelé nyomódik, ezzel ismét változnak a függvények. A sebesség eloszlás a kiinduló helyzettel kb. ellentétes értelmű lesz, a porozitás függvényben viszont a kiinduló helyzet irányába változik (5.11/3 ábra).



5.11/1 ábra Két támgörgő pillanatnyi excentricitásának hatása a porozitásra és a sebességfüggvényre (0 időpillanat)





5.11/2 ábra Két támgörgő pillanatnyi excentricitásának hatása a porozitásra és a sebességfüggvényre (24-ik időpillanat)



5.11/3 ábra Két támgörgő pillanatnyi excentricitásának hatása a porozitásra és a sebességfüggvényre (40-ik időpillanat)

Ha excentrikusak a támgörgők, akkor az idő függvényében kialakuló résméretek folyamatosan változnak az öntés során. Az 5.12-5.13 ábrák azt mutatják be, hogy a két kiválasztott támgörgő +/-0,2 mm-es excentricitása eredményeképpen a résméret milyen területet "söpör" végig. Az olvadékáramlás intenzitás is pillanatonként változik a 6870 mm-nél pozícionált támgörgő környezetében (5.14 ábra), és ez a változás visszahat a támgörgőt megelőző szakaszon (a támgörgőtől a meniszkusz irányában) kialakuló olvadékáramlás nagyságára is (5.15 ábra). Csupán egy támgörgő excentricitása tehát alapvetően meg tudja változtatni az olvadékáramlási viszonyokat.

A porozitás várható értékét is módosítja egy excentrikus támgörgő jelenléte. A 9320 mm-nél pozícionált támgörgő a mushy zónának azon szakaszában van, melyben a porozitás képződés a domináns folyamat. A hatás a 5.16 ábra alapján ítélhető meg. Ahogy az excentrikus támgörgő körbefordul, a porozitási függvény is bejár egy területet, vagyis ilyen helyzetben nem egy konkrét érték, hanem egy definiálható értéktartományba eső porozitási jellemző kialakulása várható a lemezbugában.





5.12 ábra Két támgörgő +/-0,2 mm-es excentricitásából adódó résméret változás



5.13 ábra A 5.12 ábra részlete (az egyes vonalak a különböző időpontokhoz tartozó résméretet jelölik)



5.14 ábra Egy támgörgő +/- 0,2 mm-es excentricitásának hatása az olvadékáramlás sebesség eloszlására





5.15 ábra Az excentricitás befolyásolja a meniszkusz irányába eső tartományban lévő olvadék sebességeloszlását is



5.16 ábra Egy támgörgő +/- 0,2 mm-es excentricitásának hatása az porozitási mérőszámra

Az egyedi támgörgők hatásának megismerése alapján még összetettebb viszonyok kialakulására lehet számolni, ha minden támgörgő esetében feltételezünk bizonyos excentricitást. A 5.17/1 ábra egy ilyen esetben kialakuló résméret halmazt mutat be. Ebben az estben a 4 m-es meniszkusztól számított távolságtól kezdve 0,2 mm/m-es konicitást és támgörgőnként +/-0,2 mm-es excentricitást tételeztünk fel. A támgörgők véletlenszerű indulási pozíciókból kezdik a forgásukat, így végtelen sok kiindulási állapot, ennek megfelelően végtelen sok résméret sorozat kialakulhat, vagyis a sebesség és porozitás függvények és végtelen sokféleképpen alakulhatnak. Kellő számú eset vizsgálatával azonban jó közelítéssel megállapítható az az értéktartomány, melynek értékeit a függvények felvehetik. A 5.17/2, 5.17/3 ábrák 17 időpillanatra nézve mutatják a függvényeket, ennek alapján közelítőleg megállapítható a függvények által "súrolt" terület, illetve annak határai. Az olvadékáramlási sebesség esetében igen drasztikus a változás. Az excentricitás nélküli helyzetben a várható olvadékáramlási sebesség 0,0005 mm/mm körüli (lásd 5.4 ábra), ezzel szemben ha támgörgőnként +/-0,2 mm-es excentricitást feltételezünk, akkor a várható érték tartomány -0,0025 és +0,003 mm/mm között mozog. A porozitás szempontjából várható érték 4,7 és 7,2 közötti, szemben az excentricitás nélküli 5,3 körüli fix értékkel.








5.17/2 ábra Az összes támgörgő +/-0,2 mm-es excentricitásából adódó relatív olvadék áramlási sebesség ingadozás



5.17/3 ábra Az összes támgörgő +/-0,2 mm-es excentricitásából adódó porozitási mérőszám ingadozás

A támgörgők +/-0,2 mm-es excentricitását és azok névleges beállítását feltételeztük abban a számításban, melynek eredményei a 5.18 ábrán láthatók. Az olvadék áramlási sebességének szélső értékei ebben az esetben -0,0027 és 0,0044 mm/mm, az excentricitás nélküli eset maximuma 0,0025 mm/mm körüli (lásd 5.4 ábra). Az olvadékáramlási sebességfüggvény szemléletesebb áttekintése céljából készült a 5.18/3 ábra diagramja. Ez az idő függvényében, 17 időpillanatra vonatkozóan mutat négy sebességi jellemzőt. A fekete vonal a meniszkusztól L_{likvidusz} távolságban ábrázolja a sebesség aktuális értékét. Ez a paraméter tehát a szál mushy tartományának felső (a meniszkusz irányában lévő) határfelületén kialakuló sebességet jellemzi, vagyis megmutatja, hogy a szál mushy zónájába milyen sebességű olvadék áramlik be, illetve onnan milyen sebességű olvadék áramlik ki. Ez a függvény ebben az esetben minden időpillanatra pozitív, vagyis az olvadék a mushy-ból kifelé, a meniszkusz irányában mozog. A szál mushy tartományának azt a részét, melyben az olvadék szabad áramlása a domináns folyamat (60% és 30% mushy olvadéktartalom között) három egyenlő szakaszra osztottuk. Minden szakaszra meghatároztuk az adott időpillanatban működő sebesség eloszlásnak az átlagértékét. Az ábrán a piros vonal jelzi az első szakaszban (a szál mushy tartományának legfelső részén) az idő függvényében kialakuló olvadékáramlás átlagértékét. Értelemszerűen a zöld, illetve kék vonalak a 2. és 3. szakaszban kialakuló átlagsebességet jelentik. A 3. szakasz legalján az olvadékáramlás sebessége zérus. Mind a négy jellemző értéke az excentrikus görgőbeállításból adódó, szinusz függvény elemekből felépíthető görbe szerint változik az idő függvényében. Ennek a diagramnak a szélső értékei az átlagolás miatt természetesen lényegesen kisebbek, mint az eredeti, 3.20/2 ábrán látható függvény halmaznak.

A porozitási mérőszám excentricitás nélkül 5,5 mm² körüli, +/-0,2 mm-es excentricitás esetén 4,5-7 mm² közötti értékek várhatók 5.18/4 ábra. A 5.18/5 ábra az idő függvényében mutatja a porozitás változását.1



5.18/1 ábra A valódi résméret ingadozása a névleges beállítás és támgörgőnként +/-0,2 mm-es excentricitás figyelembe vétele esetén



5.18/2 ábra A relatív olvadékáramlási sebesség ingadozása a névleges beállítás és támgörgőnként +/-0,2 mm-es excentricitás figyelembe vétele esetén



5.18/3 ábra A relatív olvadékáramlási sebesség ingadozása az idő függvényében a mushy zóna olvadékáramlási tartományán belül (névleges beállítás és támgörgőnként +/-0,2 mm-es excentricitás figyelembe vétele esetén)



5.18/4 ábra A porozitási mérőszám ingadozása a névleges beállítás és támgörgőnként +/-0,2 mm-es excentricitás figyelembe vétele esetén







5.4 Kihajlás a támgörgők között

A szilárd kéreg támgörgők közötti kihajlása szintén befolyásolhatja az olvadékáramlási és porozitási viszonyokat, mivel a kihajlás következtében a szál belsejében az olvadék rendelkezésére álló hely, térfogat megváltozik. A számításokhoz szintén a 14-es öntési eset állandósult állapotú szakaszának adatait használtuk.

A 5.19 ábra a 0,2 mm/m-es konocitás esetére mutatja a résméret viszonyokat, a piros vonal már a kihajlással együtt ábrázolja a résméretet, illetve a lemezbuga külső kontúrját.

Az olvadékáramlási sebességre gyakorolt hatás ebben az esetben is elég drasztikus, a 5.19/2 ábra szerint közel megduplázódik a maximális sebesség, illetve a sebesség ingadozás is nagyon erőteljes. A dermedés utolsó szakaszában a kihajlás már nem túl nagy mértékű, így a porozitási függvényre gyakorolt hatás nem túl erős.



5.19/1 ábra A kihajlás hatása a támgörgők közötti látszólagos résméret alakulására (14-es jelű számítás, 0,2 mm/m, állandósult állapot)



5.19/2 ábra A kihajlás hatása a relatív olvadékáramlási sebességre (14-es jelű számítás, 0,2 mm/m, állandósult állapot)



5.19/3 ábra A kihajlás hatása a porozitási jellemzőre (14-es jelű számítás, 0,2 mm/m állandósult állapot)

Az 5.20 ábrán a névleges görgőrés beállítás esetén kialakuló viszonyok láthatók. A sebességfüggvényben kicsi módosító hatása van a kihajlásnak (5.20/2 ábra), az előző esethez viszonyított kisebb hatás azzal magyarázható, hogy a névleges beállításnál már eleve nagy az olvadék kifelé irányuló sebessége, így az arra szuperponálódó, az előzővel nagyságrendileg megegyező hatás relatíve kisebb befolyást gyakorol a sebesség eloszlására. Mindamellett a sebesség ingadozása így is jelentős. A porozitás kismértékben növekszik a kihajlás következtében (5.20/3 ábra).



5.20/1 ábra A kihajlás hatása a támgörgők közötti látszólagos résméret alakulására (14-es jelű számítás, névleges beállítás, állandósult állapot)



5.20/2 ábra A kihajlás hatása a relatív olvadékáramlási sebességre (14-es jelű számítás, névleges beállítás, állandósult állapot)



5.20/2 ábra A kihajlás hatása a porozitási mérőszámra (14-es jelű számítás, névleges beállítás, állandósult állapot)

5.5 Összetett, kombinált helyzetek vizsgálata

Az előző fejezetek alapján nyilvánvaló, hogy a végső olvadékáramlási függvényt, illetve porozitási mérőszámot állandósult öntési viszonyok között is az – acél kémiai összetételén és a jól szabályozható öntési technológiai jellemzők (öntési sebesség, túlhevítés, hűtési intenzitások, stb.) értékén túl – a következő paraméterek befolyásolják a legerőteljesebben:

- támgörgők valódi pozíciója (beállítás, beállítási hiba, üzem közbeni pozíció változás, kopás, támgörgő kihajlása a terhelés alatt, stb.),
- támgörgők körülfordulása során a szál helyzetét változtató tényezők (excentricitás, a támgörgő üzem közbeni maradó deformációja, csapágyazási hiba, stb.),
- kihajlás a támgörgők között.

A három csoportba sorolható tényezők egyedi hatásait az előző fejezetekben megvizsgáltuk, most olyan esetekre térünk rá, amikor az említett tényezők együttesen hatnak. A továbbiakban is a 14-es öntési eset állandósult állapotának paramétereit vesszük alapul a számítások során. A kihajlás állandósult állapotban konstansnak vehető, így azt minden esetben a 5.20 ábrának megfelelő értékűre választjuk.

A következő hat példa olyan eseteket mutat be, melyekhez hasonló viszonyok véleményünk szerint a valóságban is előfordulhatnak. A résbeállítás, kopás és az excentricitás értékeit az üzemi mérések tapasztalatai, valamint a finnországi üzemben alkalmazott "roll checker" adatainak jellegzetességei alapján választottuk ki. Természetesen a modellezett esetek éppen ezekkel a konkrét paraméterekkel a valóságban csak véletlenül fordulhatnak elő. Ellenőrzésre nincs is lehetőség, mivel az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt.-ben nincs mód a támgörgő résméretek üzem közbeni meghatározására. A következőkben részletezett vizsgálatok közös jellemzője, hogy azokban összetett, reális, üzemszerű viszonyokat közelítő feltételeket igyekeztünk megfogalmazni.

A támgörgő résbeállítás tekintetében a C1 esetben a névleges értékeket, a C2 és C3 esetekben pedig minden páros számú támgörgőn 0,1, illetve 0,2 mm-es pozitív beállítási hibát (a névlegesnél tágabb támgörgőrést) tételeztünk fel. A C4, C5 és C6 esetben a támgörgők kopásából, beállítási hibájából és az esetleges deformációból adódó komplex helyzeteket igyekeztünk definiálni. A kiindulási alap a "roll checker" adathalmaz volt, melynek alapján egyrészt az egyedi görgőknél mutatkozó hibák nagyságrendjét lehetett megítélni, másrészt megfigyelhető az a tény, hogy az öntőgép hosszának kb. harmadik harmadában lényegesen nagyobb beállítási, kopási hibák tapasztalhatók, mint az azt megelőző szakaszokon (lásd. 3.5 ábra). Megjegyezzük, hogy általában éppen ezen öntőgép tartományra esik az öntött szál mushy szakasza. Feltételezhető, hogy a megnövekedett résméret hibák éppen a szál alacsonyabb hőmérsékletével (nagyobb szilárdságával) magyarázhatóak és ezek a szál és a támgörgők kölcsönhatásában alakulnak ki. A "roll checker" adatok osztott támgörgős ívelt öntőgépre vonatkoznak, feltételezhető, hogy egy vertikális, osztatlan támgörgős gépen ennél nagyobb résbeállítási hibák fordulnak elő. A C4, C5 és C6 esetekhez tartozó résbeállításokat tehát önkényesen, de a fent leírtak figyelembe vételével adtuk meg. Hangsúlyozzuk, hogy mindhárom eset virtuális, de nagyságrendileg a valósághoz közel álló viszonyokat tükröz. A támgörgők excentricitását minden esetben egységesen +/- 0,1 mm-es-nek tételeztük fel.

A számítás	Résbeállítás	Excentricitás	Ábra száma
kódja	4 m-től	+/ - mm	
Cl	névleges	minden görgőn 0,1	4.26
C2	névleges, páros támgörgőkön 0,1	minden görgőn 0,1	4.27
C3	névleges, páros támgörgőkön 0,2	minden görgőn 0,1	4.28
C4	kopás1	minden görgőn 0,1	4.29
C5	kopás2	minden görgőn 0,1	4.30
C6	kopás3	minden görgőn 0,1	4.31

A következő táblázat a számítások alapvető jellegzetességeit definiálja.

A számítási eredményeket a 5.21-5.26 ábrákon mutatjuk be. Mindegyik ábra három részből áll. A felső részen a fél résméret alakulása látható összesen 17 időpillanatra vonatkozóan. A középső diagram a mushy szakasz elején várható olvadékáramlási viszonyokat, valamint a várható végső porozitási értékét mutatja, szintén 17 időpillanatra nézve. Az alsó diagram az idő függvényében mutatja az olvadékáramlási és porozitási jellemzők alakulását. A olvadékáramlási tartományban kialakuló viszonyok a hely függvényében is változnak. Ha ezt a tartomány három egyenlő részre osztjuk, akkor ezekre a zónákra az átlagos olvadékáramlási sebesség meghatároztható. Az alsó diagram ezeket a sebességi értékeket is bemutatja.





5.21 ábra Olvadékáramlási és porozitási számítások eredménye, kód: C1



5.22 ábra Olvadékáramlási és porozitási számítások eredménye, kód: C2



5.23 ábra Olvadékáramlási és porozitási számítások eredménye, kód: C3



5.24 ábra Olvadékáramlási és porozitási számítások eredménye, kód: C4



5.25 ábra Olvadékáramlási és porozitási számítások eredménye, kód: C5



5.26 ábra Olvadékáramlási és porozitási számítások eredménye, kód: C6

5.6 Összefoglalás: a modellezési eredmények alapján megfogalmazható következtetések

Az öntési viszonyok, támgörgő beállítások és azok hibái, valamint a belső minőség jellemzésére meghatározott paraméterek közötti kapcsolatrendszer további tisztázásához a következő években részletes és szisztematikus elemzés szükséges. A bemutatott számítási eljárás állandósult állapotú viszonyok között kiterjeszthető a lemezbuga több, hosszirányú (öntési irányú) metszetére, ez a porozitási és áramlási viszonyok három-dimenziós jellegű vizsgálatát teszi lehetővé. Ugyanakkor a belső minőséget jellemző paraméterek nem állandósult öntési viszonyok feltételezése esetén is meghatározhatók, így a tranziens öntési viszonyok, gyorsítások, lassítások és az un. végszál kiadás speciális esetei is jellemezhetővé válnak. A bemutatott modell alkalmazásának mindkét irányú kiterjesztése megtörtént.

A következőkben – annak illusztrálására, hogy a matematikai modell alkalmazásával milyen szempontokból ítélhető meg az öntési technológia – néhány, a bemutatott kutatási tevékenység alapján megfogalmazott felismerést ismertetünk az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. vertikális öntőgépeinek működésével kapcsolatosan.

Az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt.-ben – a technológiai adottságok miatt – a különböző bugaméreteknél még állandósult állapotban sincs mindig azonos pozícióban az olvadéktócsa. Nagyobb bugaméreteknél általában nincs kihasználva az öntőgép teljes hossza, kisebb méreteknél pedig a szoliduszra számított olvadéktócsa alja az utolsó támgörgő és az első húzógörgő közé esik (megjegyezzük, hogy a sebesség az öntési osztálynak is függvénye).

A hűtési elvekkel kapcsolatosan összességében kijelenthető, hogy a vertikális öntés rendszeréből és sajátosságaiból adódóan nem is lehet és nem is célszerű a különböző öntési esetekben (bugaméret, minőség, nem állandósult viszonyok) a folyamatokat állandó felületi hőmérséklet eloszlásra, vagyis közel állandó tócsamélység értékre szabályozni. Ívelt öntőgépeknél, ha az egyéb technológiai háttér adott, célszerű ez a szabályozási elv. Nagy előnye ez utóbbi rendszernek, hogy az öntőgépen alkalmazott résbeállításhoz képest a szoliduszra és likviduszra számított tócsamélység közel állandó pozícióban van, vagyis a kristályosodás egyes szakaszaihoz optimalizálható a résbeállítás. Hozzá kell tenni azonban azt is, hogy a korszerű öntőművekben a támgörgők közötti résméret öntés közben is változtatható.

A technológiai adottságok miatt el kell fogadni azt a tényt, hogy a különböző szelvények állandósult állapotú öntése, valamint a tranziens öntési viszonyok között a tócsa pozíciója változik az öntőgépen belül, így a pillanatnyi minőségi jellemzők értéke jórészt attól függ, hogy a kristályosodás kritikus tartományaiban (dominánsan olvadékáramlásos, vagy porozitás képződéses) éppen milyen résbeállítás működik, vagyis, hogy az öntőgép mely részére esik az olvadéktócsa kritikus szakasza.

Ha az olvadéktócsa helyzete öntési esetenként változhat, akkor a számítási tapasztalatok alapján a lemezbugák belső minőségének, illetve a minőség stabilitásának és tervezhetőségének javítása érdekében az alábbiak megfontolása javasolható:

A./ A lemezbugák belső minősége szempontjából nagyon nem szerencsés a jelenlegi névleges görgőbeállítás. Az első észrevételünk, hogy egy szekció utolsó és a rákövetkező szekció első támgörgőjének résmérete azonos, ami azonnal négy "töréspontot" eredményez a résméret változásában. A 5.27 ábrán bekarikázott vízszintes szakaszoknak technológiai szempontból

tudomásunk szerint nincs jelentősége, dúsulási szempontból viszont kifejezetten káros a jelenlétük.

Természetesen az ábrán az egyes vízszintes szakaszoknak eltérő a jelentősége és a szerepe. Az ábrán I.-el jelölt szakasz bizonyosan abban a tartományban van, ahol még vékony a kéreg és a lemezbuga belsejében nemcsak mushy, hanem tiszta olvadék van, így ez különösebben nem befolyásolja a belső minőséget. Ugyanakkor az indítószál öntésénél ez a törés – ha csak rövid időre is – dúsulási szempontból káros hatású. Ez a vízszintes szakasz fölösleges deformációt okoz a szilárd kéregben, mely nemcsak olvadékáramlási, de a felületi minőség szempontjából sem kívánatos.

A II., III. és IV.-es szakaszok az öntési viszonyoktól függően már állandósult állapotban is komoly zavarokat okozhatnak. Ezek – az ábrán vízszintes vonallal jelzett – részek akár az olvadékáramlás, akár a porozitás képződéses kritikus kristályosodási tartományba esnek, mindenképpen a kristályosodás menetének megzavarását okozzák. Az olvadékáramlás szempontjából kritikus tartományban egy ilyen vízszintes szakasz előfordulása bizonyosan az olvadékbeszívás irányába módosítja a sebességi viszonyokat, ha pedig a porozitás képződés a domináns folyamat, akkor bizonyosan növeli a porozitás mértékét.



5.27 ábra A jelenlegi támgörgő beállítás jellegzetes tartományai

B./ A másik lényeges észrevétel, hogy a támgörgő beállítás konicitása nem következetes. Az 5.27 ábrán 0-5-ig beszámozott szakaszokban a konicitás a következőképpen változik:

Szakasz jele		Félrés	Delta rés	Delta táv.	Résméret szűkülés üteme	Résméret szűkülés üteme
	Távolság					
	mm	mm	mm	mm	mm/mm	mm/m
0	0	120	0,2	600	0,000333333	0,33333
	600	119,8				
1	600	119,8	0,3	442	0,000678733	0,67873
	1042	119,5				
I.	1042	119,5	0	222	0	0
	1264	119,5				

```
dc_24_10
```

2	1264 3464	119,5 118,5	1	2200	0,000454545	0,45455
II.	3464 3994	118,5 118,5	0	530	0	0
3.	3994 5494	118,5 118	0,5	1500	0,000333333	0,33333
III.	5494 5820	118 118	0	326	0	0
4.	5820 7220	118 117	1	1400	0,000714286	0,71429
IV.	7220 7570	117 117	0	350	0	0
5.	7570 10020	117 116,5	0,5	2450	0,000204082	0,20408

Mint a fenti táblázat adatai alapján megállapítható, az 1, 2, 3 és 4. szakaszban a konicitásban nincs következetesség, az értékük nagyon változatos, pl. a 4. szakasz nagyon erőteljes, 0,7 mm/m-es konicitású, majd ezt követi egy igen enyhe, 0,2 mm/m-es konicitású szakasz (5. szakasz). A makrodúsulás és a belső minőség szempontjából a számítások alapján célszerű, ha a konicitás vagy konstans a kristályosodás szempontjából kritikus tartományban, vagy enyhén növekszik az öntőgép hossza mentén.

Hasonló elgondolás érvényesül a külföldi, ívelt öntőgép résbeállítás elvében. A 3.5 a/ ábrán látható névleges beállításban három szakasz különböztethető meg. Egyrészt mintegy 3 m-ig a gyors hűlés miatt erőteljes a támgörgők zárása, majd 3 m-től mintegy 13 m-ig nagyon enyhe. Ebben a szakaszban még tiszta olvadék van a szál belsejében. Ezt követően, 13 m-től mintegy 25 m-ig lényegesen erőteljesebb a támgörgő rések szűkülése és ez nagyjából egyenletes is. Az esetek döntő többségében ebben a tartományban történik a középvonali mushy zóna dermedése. Természetesen az ívelt öntőgép 30 m-es hasznos hosszán egészen más konkrét konicitási értékek tekinthetők optimálisnak, mint egy vertikális gépen, itt csak a résállítás elveire hívtuk fel a figyelmet.

C./ A Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. vertikális öntőgépeinek névleges rés beállítása a konkrét konicitási értékek alapján a következők szerint ítélhető meg. A 5.3 ábra diagram sorozatát, valamint a számítási eseteket tanulmányozva megállapítható, hogy a névleges beállítás esetén (5.3/10 ábra) általában pozitív, azaz a mushy zónából kifelé (fölfelé) irányuló olvadékáramlásra kerül sor. Ennek intenzitása viszonylag nagy, némileg csökkentett konicitás mellett meg lehetne közelíteni az optimálisnak ítélt kicsi, a zérushoz közeli pozitív értéket. Ugyanakkor a porozitási érték csökkentéséhez még a névleges beállításnál is nagyobb konicitás lenne szükséges (5.3 ábra sorozata), vagyis a két követelmény (olvadékáramlás, porozitás) szempontjából nézve nem azonosak az optimális konicitási értékek. Ez azt jelenti, hogy ha mindkét követelményt (az olvadéktócsa helyzetének vándorlása során optimális konicitást kell biztosítani az olvadékáramlás és a porozitás létezhet. (Kedvezőbb lenne a helyzet az esetek többségére nézve például, ha az 5.27 ábrán a 4-es és 5-ös jelzésű szakaszok

konicitását felcserélnénk.) Az A./ és B./ pontokban elmondottak figyelembe vételéhez a jelenleg beállított átlagos konicitási érték mindamellett jó kiindulási alap lehet.

D./ A támgörgők résméretében a beállítási hibák erőteljesen, de nem egyértelműen befolyásolják a lemezbugák belső minőségének jellemzőit. A 5.8 ábra diagram sorozata alapján megállapítható, hogy egy-egy támgörgő hibás beállítása elsősorban az olvadékáramlási képet befolyásolja nagyon drasztikusan. Az ilyen fajta ingadozó olvadékáramlási kép bizonyosan makrodúsulást elősegítő hatású. Egy-egy támgörgő hibás beállításának hatás a porozitás mértékére szintén megfigyelhető, de kevésbé markáns.

A támgörgők hibás beállítása, a kopás, valamint üzem közben a támgörgők esetleges (nem ciklikus hibát okozó) elállítódása azonos jelenségnek tekinthető a belső hibák szempontjából. Ezek a hibák – állandósult öntési viszonyok mellett – az időtől (a lemezbuga elmozdulásától) független jelenségeket okoznak. Az 5.21-5.26 ábrákon vázolt esetek tehát támgörgő beállítási hibáknak is tekinthetők.

Ezekben az esetekben az olvadékáramlás mértéke és a porozitás nagysága attól függ, hogy a kritikus kristályosodási szakasz melyik (milyen helyzetű) támgörgő szakaszra esik. Az esetek részletesen vizsgálhatók a számítógépes modellel. Bár nehéz kvantitatív következtetéseket levonni (elsősorban a tranziens viszonyok miatt), az kijelenthető, hogy ha az egyenletesebb támgörgő beállítás irányában változik pl. a kopások miatt a résméret sorozat, akkor általában kedvezőbb olvadékáramlási és porozitási viszonyok jönnek létre. Ez a tapasztalás megerősíti a C./ pontban említett elvek alkalmazhatóságát.

E./ A ciklikus beállítási hibák (excentricitás, csapágyhiba) előfordulásának valószínűsége véleményünk szerint számottevő. A ciklikus jellegű hibák drasztikusan és a hatások összegződése miatt aperiodikusan változtatják mind az olvadékáramlás, mind a porozitás képződési feltételeit. A ciklikus és nem ciklikus beállítási hibák okozta dúsulási jellemző változás meghaladhatja, de legalábbis ugyanabban a nagyságrendben lehet, mint a technológiai paramléterek (pl. szekunder vízhűtési stratégia módosítása) változtatásából adódó hatás. Mindezek alapján hangsúlyozzuk, hogy a belső minőség kézbentartása és tervezhetősége szempontjából a támgörgők pontos és a körülményekhez képest (ciklikus és nem ciklikus) hibamentes beállítása elsődleges fontosságú.

A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk

[5.1] Réger M, Szélig Á, Verő B, Magyar I, Králik Gy: Elméleti megfontolások az acélok folyamatos öntését kísérő térfogatváltozásokkal kapcsolatban, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 133:(1) pp. 2-6. (2000)

[5.2] Réger M: Practical Method for Macrostructure Characterisation of CC Slabs, In: Sarler B, Gobin D (szerk.), Proc. Of the Seminar EUROTHERM 69, Heat and Mass Transfer in Solid-Liquid Phase Change Processes. Ljubljana, Szlovénia, 2003.06.25, Ljubljana: pp. 171-179.(ISBN:961-6311-15-8)

[5.3] Réger M, Verő B, Csepeli Zs, Szélig Á: Folyamatosan öntött bugák makrodúsulása, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 137:(5) pp. 9-13. (2004)

[5.4] Réger M, Louhenkilpi S: Effect of Some Technological Parameters on the Macrosegregation of CC Slab, In: Int. Jubilee Conference Budapest Poytechnic. Budapest, Magyarország, 2004.09.04, pp. 131-138.

[5.5] Réger M, Verő B, Csepeli Zs, Szélig Á: Macrosegregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 508: pp. 233-238. (2006)

[5.6] Réger M, Verő B, Szelig Á: 3D Characterization of Continuously Cast Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 537-538: pp. 555-562. (2007)

[5.7] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig Á: Újabb gondolatok a lemezbugák középvonali dúsulásáról, MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK - DUNAFERR DUNAI VASMŰ RT XLVII:(4) pp. 183-190. (2007)

[5.8] Szabó Z, Réger M, Verő B, Szabados O, Csepeli Zs, Kelemen T: A folyamatos acélöntés technológiai és technikai felülvizsgálata, az öntött szál minőségének javítása érdekében, ISD DUNAFERR MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK (ISSN: 1789-6606) XLIX: (3) pp. 120-147. (2010)

6. A középvonali dúsulás stabilitása

Ez a fejezet a már létrejött középvonali dúsulás természetével, illetve a dúsulás csökkentésének lehetőségével foglalkozik. A középvonali szegregáció a lemezbuga hengerlése során elnyúlik, a durvalemezek és sokszor a tekercselt szalagok középvonalában is kimutatható. Ez a jelenség a feldolgozás során elsősorban a durvalemezek esetében jelent problémát (rétegesség, hegesztési, alakítási nehézségek). Általános tapasztalat, hogy a lemezbugában kialakult középvonali szegregáció a hengerlést követően a durvalemezek utólagos hőkezelésével alig mérsékelhető. A kutatási munka során arra a kérdésre kerestük a választ, hogy milyen tényezők, milyen mechanizmussal befolyásolják a középvonali szegregáció stabilitását.

6.1 Előzmények

Az előző fejezetek alapján belátható, hogy a lemezbugák középvonali szegregációja részben a makrodúsulással, részben a megszilárduló olvadék zsugorodásának eredményeként kialakuló porozitással kapcsolatos jelenség (az öntött szálban a középvonali szegregációt tartalmazó anyagrészben az átlagostól eltérő összetételű acél és gyakorta dendritközi zsugorodási üregek vannak).

A kristályosodást követő meleghengerlés során a bonyolult alakú, dendritközi fogyási üregek záródásának mértéke az alakváltozás függvénye, de a tapasztalatok szerint a kémiai összetételben megmutatkozó különbség megmarad. Az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. Innovációs Menedzsment laboratóriumában kísérleti hőkezelés sorozatot végeztek a középvonali dúsulást tartalmazó St 52 minőségű durvalemezek homogenizálása céljából. A dúsult tartomány 0,35 % karbont, és 1,95 % mangánt tartalmazott, az alapanyag karbontartalma 0,14 %, mangántartalma 1,4 % volt. Az 1000 °C környékén végzett több órás hőkezelések eredményeként a mangántartalom gyakorlatilag nem változott, de a karbontartalom sem egyenlítődött ki.

Felmerül a kérdés, hogy a durvalemezek középvonali dúsulásának csökkentése, illetve a karbontartalom homogenizálódása miért nem érhető el utólagos hőkezeléssel, diffúziós izzítással (megjegyzendő, hogy a lemezbugák, hengerlés előtti tolókemencei izzítása sem okoz lényegi változást a középvonali dúsulás tekintetében). Az egyik magyarázat az lehet, hogy a középvonali dúsulást tartalmazó zónában az alakváltozásra kényszerített, bonyolult alakú fogyási üregek maradványai is mint folytonossági hiányok jelen vannak, ezek a hajszálvékony "repedések" akadályozzák a diffúziót (lásd 3.9 ábra). Ugyanakkor azt is tapasztaltuk, hogy a bizonyítottan folytonossági hiány mentes középvonali dúsulás ugyancsak hasonlóképpen viselkedik. Egyes szerző a mangán karbonaktivitást csökkentő hatását tartják felelősnek ezért [6.1], mások a foszfor és egyéb elemek hatását is lényegesnek vélik. A jelenséget megnyugtató módon magyarázó elmélet ezidáig nem született.

A kérdéskör részletesebb vizsgálatát tűzte ki célul a következőkben ismertetett kutatási munka. A kísérletek nagyrészt Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézetben dr. Verő Balázs vezetésével történtek, a meleghengerlést a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszéke végezte. Saját munkámnak a mérési eredmények értelmezése, valamint a karbon aktivitási értékének elemzésén nyugvó modell kidolgozása tekinthető, melyhez sok szakmai támogatást kaptam a dr. Kaptay Györgytől. A kutatási tevékenység eredményeit az [S.6.1-S.6.5.] publikációk tartalmazzák.

6.2 Kísérleti munka

A kísérleti munka célja annak feltérképezése volt, hogy a mangán – mint a karbon aktivitását befolyásoló, a dúsult zónában általában a legnagyobb mennyiségben jelenlévő elem – milyen hatást fejt ki a karbon diffúziójára vonatkozóan. Ennek érdekében mesterséges középvonali szegregációt tartalmazó minták készültek és ezeken vizsgáltuk a diffúziós hőkezelés hatásait.

A kísérleti munka alapötlete, az un. szendvics minták készítése ARB (accumulative roll bonding) eljárással dr. Verő Balázs nevéhez fűződik. Ezt a – lényegében a plattírozás technológiáján alapuló – módszert irányított szerkezetű, esetenként nanoszerkezetű minták előállítására is használják [6.2], de ezzel a módszerrel a melegen hengerelt lemezek – mesterséges – soros szövete is modellezhető, vizsgálható [6.3]. Célunk olyan többrégetű minták előállítása volt, amelyek kiterjedésükben és összetételükben megbízható és reprodukálható módon reprezentálják a lemezbugák középvonalában kialakuló karbon és mangán dúsulást, valamint kísérleti, méréstechnikai szempontból is megfelelőek (kezelhetőség, edzhetőség, stb.). A szendvics minta középső eleme (a továbbiakban Betét) reprezentálja a dúsulást, a két külső réteg (a továbbiakban Alap) pedig a lemez átlagos összetételét.

Szendvics minták előkészítési, gyártási módszere a következő lépésekből állt. Először a melegen hengerelt, 4 mm vastagságú lemezből (Alap) 2 db 70x100 mm darabot vágtunk ki CO_2 lézerrel, majd ugyanilyen méretű mintákat munkáltunk ki a betétlemez anyagból. A lemezek felülete köszörülésen és gondos felülettisztításon esett át. A betét mintát az alap lemezek közé helyeztük és a CO_2 lézerrel a három mintát összehegesztettük. A hegesztett, meleghengerlésre kész szendvics mintát mutatja a 6.1 ábra fotója. A hegesztésnek kettős célja volt: egyrészt mechanikusan összefogta a három darabot, másrészt a belső lemez mindkét és a külső lemezek belső oldalát ezzel a módszerrel sikerült az oxidációtól megvédeni.

Az összehegesztett mintákat tokos kemencében 1020–1050 °C-ra hevítettük, majd duó hengerállványon több szúrással és egyszeri közbenső visszahevítéssel 50%-os összfogyással kihengereltük. A szendvicsminták metallográfiai vizsgálata bizonyította, hogy a lemezek között fémes kapcsolat jött létre. A szendvicsminta szerkezet a 6.2 ábrán látható.



6.1 ábra Összehegesztett szendvics minta a hengerlés előtt



6.2 ábra A szendvicsminták szerkezete

A minták többféle összetételi és vastagsági variációban készültek, ezek közül a következő táblázat csak azt a két esetet ismerteti, mely a modellalkotáshoz és ellenőrzéséhez szükséges volt.

A minták jellemzői	C jelű minta	E jelű minta
Alap karbontartalom, wt%	0,05	0,05
Alap acél mangántartalom, wt%	0,3	0,3
Betét acél karbontartalom, wt%	0,47	1,1
Betét acél mangántartalom, wt%	0,4	1,7
Alap acél vastagsága - hengerlés előtt, mm	4	4
Betét acél vastagsága – hengerlés előtt, mm	1	2
Szendvics minta félvastagsága – hengerlés után, mm	2	3
Alap acél fél-vastagsága- hengerlés után, mm	1,8	2,4
Betét acél fél-vastagsága – hengerlés után, mm	0,2	0,6

Mint látható, a C jelű minta Alap és Betét rétege között nincs lényeges eltérés a mangántartalom tekintetében, így a két réteg közötti összetételi különbség csak a karbontartalom különbözőségében rejlik. Ez a minta szolgált annak eldöntésére, hogy az Alap és a Betét réteg közötti határfelület a karbon diffúziója szempontjából jelent-e akadályt vagy sem (a kérdéssel a 6.3 fejezet foglalkozik). Az E jelű minta esetében a rétegek között nemcsak a karbontartalomban, hanem a mangán értékében is nagy különbség van. Ezen a mintán a terveztük a mangánnak a karbon diffúziójára kifejtett hatását felmérni abban az esetben, ha a C minta vizsgálati eredményei bizonyítják: a rétegek közötti határfelület nem jelent akadályt a karbon diffúziójára nézve. A két mintában a kezdeti, azaz a diffúziós kísérleteket megelőző meleghengerelt állapotban kialakított koncentrációviszonyokat szemléletesen mutatja a 6.3 és 6.4-es ábra.



6.3 ábra A C jelű mintára jellemző karbon és mangán eloszlás



6.4 ábra Az E jelű mintára jellemző karbon és mangán eloszlás

A melegen hengerelt, mesterséges dúsulást tartalmazó lemezekből lézeres vágással a diffúziós kísérletekhez alkalmas méretű minták (szélesség 10 mm) készültek. A kicsi próbatesteket lágyacél lemezek közé csomagoltuk majd lézeresen körbehegesztettük. A csomagolás célja a minta és a kemence atmoszféra közötti kölcsönhatás megakadályozása volt a hőkezelési kísérletek során. A diffúziós hőkezeléseket laboratóriumi kemencében 1000 és 1150 °C közötti hőmérsékleteken 10 és 120 perc közötti hőntartási időkkel végeztük. A kezelést követően kicsomagolt minták felülete fémtiszta volt, jelezve, hogy nem történt oxidációs folyamat a minta felülete és a kemence atmoszféra között. A diffúziós hőkezelésen átesett

minták csiszolatain metallográfiai vizsgálatot végeztünk. A minták egy részét ezt követően 950 °C-ról vízben leedzettük, ezeken a vastagság irányban mért keménység alapján meghatároztuk a keménység eloszlást.

6.3 A kísérleti módszer alkalmazhatóságának ellenőrzése

A szendvics minták diffúziós kísérletekre való alkalmasságának megítéléséhez – vagyis annak ellenőrzésére, hogy a meleghengerlés során kialakult fém-fém határfelület a karbon diffúziója szempontjából nem jelent akadályt –, a C jelű minta 1000 °C-on izzított mintáira (10, 30, 60 és 120 perces hőntartások) vonatkozóan részletes elemzést végeztünk.

A karbondiffúziós folyamat ellenőrzését a diffúziós kezelések után a magrészben maradó karbon keménységnövelő hatása alapján végeztük. A diffúziós hőkezelés után a mintákat 950 °C-on ausztenitesítettük 10 percig, majd vízben leedzettük. Feltételeztük, hogy az karboneloszlás az edzést megelőző rövid ausztenitesítés során lényegesen nem változik meg. Az edzett minták metallográfiai csiszolatán mikrokeménységméréssel határoztuk meg a magrész maximális keménységét.

A C jelű mintában a diffúziós izzítás hőmérsékletén csak a karbon diffúziójára lehet számítani. A mangántartalomban ebben az esetben minimális az eltérés, ugyanakkor a mangán diffúziós tényezője nagyságrendekkel kisebb, mint a karboné. A szendvics minta magrészének kémiai összetétele így lényegében csak a karbontartalom vonatkozásában változik meg a diffúziós kezelések során. A magrész keménységének változása így csak a betét részen visszamaradó karbontartalom függvényében változik, vagyis a karbontartalom visszaszámítható az edzett keménységi értékből.

A magrész várható – karbontartalomtól függő – keménységét, valamint a minta keresztmetszetében karbon, illetve keménység és szövetszerkezet eloszlását kereskedelmi szoftverek megfelelő adaptálásával becsültük az alábbi két lépésben:

- karbontartalom eloszlás meghatározása kereskedelmi szoftverrel (COMSOL végeselemes szoftver, diffúziós modul [6.4]) az adott homogenizálási hőmérséklet és időtartam figyelembe vételével,
- a karbontartalom eloszlás és lokális kémiai összetétel alapján megfelelő hűlési sebesség alkalmazásával a keménység és a szövetszerkezet becslése az ADC (Austenite Decomposition), szintén finn fejlesztésű kereskedelmi szoftver felhasználásával [6.5].

A 6.5 ábra bemutatja a méréssel és számítással meghatározott keménységi értékeket. A betét acél kémiai összetételében a karbontartalmat, mint változót vettük figyelembe és meghatároztuk az edzés után várható keménységet, ezt reprezentálja ábra folytonos vonala. A számítások során 150 °C/sec hűlési sebességeket vettünk figyelembe az átalakulási folyamat kritikus hőmérsékleti tartományában. Ez az érték reprezentálja a próbatest geometriájából adódó hűtési viszonyokat az edzés során. A 6.5 ábra azt igazolja, hogy a mért és számított eredmények jól illeszkednek egymáshoz, vagyis megállapítható, hogy a Betét és az Alap közötti fém-fém határfelület nem gátolja a karbon diffúzióját. A C sorozat mintáinak metallográfiai eredményei összhangban vannak ez utóbbi kijelentéssel.





Hasonló eredményt hoztak az 1070 °C-on homogenizált mintákon végzett keménység eloszlási vizsgálatok. A 6.6 ábra a mért és számított keménységi értékek szintén kielégítő egyezése figyelhető meg.



6.6 ábra A mért és számított betét maximális keménységi értékek a C mintaanyagú próbatestek esetén (homogenizálás 1070 °C-on, lassú hűtés szobahőmérsékletre, majd edzés 950 °C-ról vízbe)

6.4 A mangán koncentráció különbség hatása: az "E" jelű minta vizsgálati eredményei

A kísérleti minták metallográfiai vizsgálata alapján megállapítható, hogy az E jelű mintaanyagban a diffúziós hőkezelés után lényegesen nagyobb a magrész és az alaplemez

közötti szövetszerkezeti különbség, mint a C jelű minták esetében. Ezt a betét rész megnövelt mangántartalma is eredményezi, hiszen a mangán csökkenti az eutektoid karbontartalmát és stabilizálja az ausztenitet, vagyis elősegíti a perlit képződést. Az E jelű mintákon végzett kísérletek annak eldöntésére szolgáltak, hogy a nem egyenletes mangán eloszlás, vagyis a keresztmetszetben kialakított "mangán lépcső" befolyásolja e és ha igen, milyen mértékben a karbon diffúzióját.

A számított keménység és szövetszerkezet eloszlás meghatározása a 6.3 pontban leírt két lépésnek megfelelően történt. Az 1150 °C-on két órát homogenizált mintára vonatkozó mérési és számítási eredmények láthatók a 6.7 ábrán.



6.7 ábra A számított és méréssel meghatározott keménység eloszlás az E jelű minta fél vastagságában

A Betét részben a mért keménység valamivel nagyobb, mint a számított érték, ez arra utal, hogy a valós karbontartalom nagyobb, mint az a diffúziós számításból adódott. Ugyanakkor a Betét/Alap határfelület Alap felöli oldalán a számítottnál lényegesen kisebb a mért keménységi érték, vagyis itt fordított a helyzet, a diffúziós számítással meghatározott karbontartalom nagyobb, mint a valóságos. A 6.7 ábra azt igazolja, hogy ha nem egyenletes a mangán eloszlás a minta keresztmetszetében, akkor a karbon koncentráció-különbségen, mint hajtóerőn alapuló tradicionális diffúziós számítások eredménye komoly hibával terhelt.

6.5 Az eredmények értelmezése, az "effektív" diffúziós tényező bevezetése

Az E jelű mintában a mért és számított értékek eltérése feltételezhetően a mangán és a karbon kölcsönhatására vezethető vissza. A mangán csökkenti a karbon aktivitását ezen keresztül befolyásolja a diffúziós folyamat menetét és eredményét. A mangán koncentráció eloszlását tekintsük változatlannak az egész hőkezelési folyamatban, hiszen a mangán diffúziós tényezője négy nagyságrenddel kisebb a karbon diffúziós együtthatójánál. Ekkor a karbon diffúzióját a karbonaktivitás mintán belüli különbsége, mint hajtóerő irányítja és a folyamat addig tart, míg a karbonaktivitás ki nem egyenlítődnek. A karbonaktivitás kiegyenlítődése ugyanakkor nem jelenti a karbon koncentráció kiegyenlítődését, ha valamilyen hatás – jelen esetben pl. a mangán nem egyenletes eloszlása – lokálisan módosítja a karbon aktivitását, akkor eredményül nem egyenletes karboneloszlás adódik. Természetesen, ha figyelembe

vesszük a mangán diffúzióját is, akkor – megfelelő idejű hőkezelést követően – a végeredmény a mangán és karbontartalom teljes kiegyenlítődése lesz.

A nem egyenletes mangán eloszlás karbon diffúzióra gyakorolt hatásának és e hatás mértékének meghatározására a karbon aktivitásán alapuló diffúziós modellt (ausztenitben) dolgoztam ki, ennek részletes leírása az A3 mellékletben található.

A Fe-C-Mn rendszerben a karbon aktivitásának meghatározására vonatkozóan három modellt vizsgáltam meg, ezek értelmezéséhez és a számítások lebonyolításához dr. Kaptay György nyújtott segítséget [6.6]. Wyss a számítási módszerét a 60-as években dolgozta ki a cementálással kapcsolatos jelenségek leírása céljából [6.7]. Hillert modellje [6.8] a korábbi termodinamikai kísérleti adatokat elemzésén alapul, ezt a későbbiekben Huang fejlesztette tovább [6.9]. A modellek elméleti hátterének és matematikai leírásának mellőzésével nézzük a konkrét eredményeket. Az Fe-C binér rendszerben az aktivitás a karbontartalom és a hőmérséklet függvénye. A 6.8 ábra a karbontartalom függvényében két hőmérsékletre meghatározott aktivitási értékeket mutatja. A három modell által szolgáltatott eredmények jó egyezést mutatnak.

Eltérő eredmények adódnak, ha a modellekben a mangántartalom hatását is figyelembe kívánjuk venni. A 6.9 ábra a három modell alapján az 1150 °C-ra becsült karbon aktivitási értékeket ábrázolja szintén karbontartalom függvényében. A mangán karbonaktivitást befolyásoló hatásának iránya megegyezik (mindhárom modellben a növekvő mangántartalom csökkenti a karbon aktivitását), de a hatás mértéke különbözik. A modellek megbízhatóságának megítéléséhez a továbbiakban mindhárom eljárás alkalmazásával kapott eredményt ismertetem.









A karbon aktivitáson alapuló diffúziós modellben nem alkalmazható az a diffúziós együttható, melyet a karbon koncentráció különbség alapján történő számításoknál vettünk figyelembe. A karbon aktivitásán alapuló modellben szereplő diffúziós tényezőt nevezzük el "effektív" diffúziós tényezőnek. A következőkben bemutatom az "effektív" diffúziós tényező meghatározási módját.

Tekintsük a 6.10 ábra diagramjait. Az ábra a C jelű minta (vagyis a mangántartalom szempontjából homogén minta, lásd 6.3 ábra) 1000 °C-on lezajló homogenizálódási

folyamatát, azaz a karbontartalom kiegyenlítődését mutatja a minta fél vastagságában négy hőntartási időre vonatkozóan. Az 1_vonal a kereskedelmi COMSOL végeselemes szoftver diffúziós moduljával számolt eredményeket mutatja. Természetesen a négy hőntartási időnek megfelelően négy ilyen számítási eredmény található az ábrán. A 6.3 fejezetben leírtak szerint ezen karbontartalom eloszlások realitását a keménységi vizsgálatok közvetve bizonyították.

A 2_vonal sorozat az A3 mellékletben ismertetett véges differencia modellel végzett számítások eredményét mutatja. Ezekben az esetekben a számítás a karbontartalom eloszlás és a hagyományos karbon diffúziós együttható alkalmazásával történt. A véges elemes és véges differencia módszerrel végzett számítások gyakorlatilag azonos eredményeket szolgáltattak.

Az A3 mellékletben bemutatott véges differencia modellben a karbon aktivitási értékek figyelembe vételével adódtak a 6.10 ábra 3 vonal elnevezésű görbéi. A számítások során a karbon aktivitásának becslésére Hillert modelljét választottuk (a 6.8 ábra szerint a modellek a Fe-C binér rendszerben közel azonos eredményeket szolgáltatnak). A véges differencia modellben először a "hagyományos" karbon diffúziós együtthatót vettük figyelembe és generáltuk a négy homogenizációs időre vonatkozó karboneloszlást, ezek a görbék természetesen nem estek egybe az 1_vonal és 2_vonal (vagyis a karbonkoncentráció számításán alapuló eljárások) által reprezentált eredményekkel. A diffúziós tényezőt számítási ciklusonként szisztematikusan változtattuk (kézi optimalizálás) egészen addig, míg a 6.10 ábra 2_vonal és 3_vonal sorozata különbségeként definiált függvény értéke egy megadott határérték alá nem csökkent. Az így meghatározott – a négy hőntartási időre együttesen jó közelítést adó – diffúziós tényezőt fogadtuk el "effektív diffúziós tényezőként.



6.10 ábra A három módszerrel meghatározott karbon eloszlás diagramok

Numerikus optimalizációs eljárással meghatároztuk az "effektív" diffúziós tényező értékét 1000 és 1250 °C között öt különböző hőmérsékleten. Az eredményeket a 6.11 ábra tartalmazza. Az "effektív" diffúziós tényező a tradicionális diffúziós tényező értékének mintegy háromszorosa, a kettő közötti arány a hőmérsékletnek közel lineáris függvénye.



dc 24 10

6.11 ábra Az "effektív" és tradicionális diffúziós tényező hányadosa a hőmérséklet függvényében

Feltételezhetjük, hogy a mangántartalom kevéssé befolyásolja az "effektív" diffúziós tényező értékét, hiszen a hagyományos diffúziós tényező is csak kismértékben függ a mangántartalomtól. Ekkor az "effektív" diffúziós tényező birtokában az A3 mellékletben bemutatott karbon aktivitási diffúziós számítási eljárással meghatározható a mangán nem egyenletes eloszlását – ezen keresztül a karbonra gyakorolt aktivitást módosító hatását is – figyelembe vevő karboneloszlás.

Visszatérve a 6.7 ábrán bemutatott, az E jelű, tehát inhomogén mangán eloszlást tartalmazó minta keménységi anomáliájára, az ismertetett módszerrel megkísérelhető a karbon és ezen keresztül keménység és a várható szövetszerkezet eloszlásának becslése. A vizsgált esethez tartozó hőkezelési viszonyokra meghatároztuk a karboneloszlást a minta fél vastagságára vonatkozóan, ezt mutatjuk be a 6.12 ábrán. A számítási eredmény annak is függvénye, hogy melyik aktivitás számítási módszert alkalmazzuk. A Wyss modell alapján a karboneloszlás gyakorlatilag folytonos, mivel ebben a modellben a mangán alig befolyásolja a karbon aktivitását (lásd 6.9 ábra). Hillert és Huang modelljét alkalmazva a karboneloszlás folytonos jellege megszűnik, a Betét és az Alap , vagyis a mangántartalom változás határán szakadás jött létre (az aktivitás eloszlás természetesen folytonos). A karbontartalom értékében a határ két oldalán 0,07-0,12 % különbség adódott.

A 6.12 ábrán látható karboneloszlási adatok alapján újraszámolható a 6.7 ábra keménység eloszlása. A három aktivitás számítási modellel meghatározott adatokat a 6.13 ábra tartalmazza. Az aktivitáson alapuló diffúziós modell alkalmazásával a mért és számított eredmények közötti különbség csökkent. A legjobb egyezést a határfelülettől balra, a Betét anyagában Huang modellje, a határfelülettől jobbra, az Alapban inkább a Hillert féle modell adja. A vizsgált esetben a valós karboneloszlás ez utóbbi két modell által előrejelzett értékek között valószínűsíthető.





6.12 ábra A karbon aktivitási diffúziós modellel meghatározott karboneloszlás az E jelű minta fél vastagságában



6.13 ábra Az aktivitások alapján számított és méréssel meghatározott keménység eloszlás az E jelű minta fél vastagságában

6.6 Karbon, keménység és szövetelem eloszlások nem egyenletes mangáneloszlás esetén

A Hillert féle karbon aktivitás számítási módszer és az A1 melléklet szerinti eljárás, valamint az ADC szoftver alkalmazásával az E jelű minta viszonyainak megfelelő feltételekkel számítási sorozatot végeztünk, melynek eredményeit a 6.14/1-4 ábra sorozat tartalmazza. A homogenizálás hőmérsékletének az 1150 °C-ot választottuk. A 6.14/1 ábra fél órás, a 6.14/2 egy órás, a 6.14/3 két órás, míg a 6.14/4 ábra 10 órás homogenizálási idő után kialakult viszonyokat tükröz. Minden lapon három diagram szerepel, mégpedig három különböző, ausztenitesítés utáni lehűtési sebességnek megfelelően. A választott sebességek – 0.1, 1, 10 °C/s - felölelik a durvalemezek hűlési sebesség tartományát.

Az ábrákon a vízszintes tengely az E jelű minta félvastagságának felel meg. A vékony fekete függőleges vonal jelzi a Betét/Alap határfelületet, illetve a mangántartalom változását (a kezdeti feltételek megfelelnek a 6.4 ábrán látható viszonyoknak). A piros vonal jelzi az adott homogenizálás eredményeként kialakult karboneloszlást, ez nyilván független a hűlési sebességtől (vagyis laponként azonos). A függőleges tengelyen, a karbontartalom mellett a szövetelem arányok is leolvashatók, mivel az egyes szövetelemek színkódokkal vannak ellátva (világoskék – proeutektoidos ferrit, zöld – perlit, sárga – bénit, sötétkék – martenzit). A becsült keménységeloszlás értékét lila vonal jelzi, adott pozícióban értéke a jobb oldali függőleges skálán olvasható le.

Az ábrákon nyomon követhető, hogy a homogenizálódási mérték és a hűlési sebesség függvényében hogyan változnak a várható tulajdonságok. Például egy félórás homogenizálódás majd azt követően egy 10 °C/s sebességű hűtés után a Betét és az Alap határfelületének két oldalán mintegy 300 HV keménység-különbség alakul ki (6.14/1, alsó ábra). Az is megfigyelhető, hogy egy 10 órás homogenizálás után is a karbontartalomban mintegy 0,1 %-os különbség marad a határ két oldalán. Ugyanezen ábrákon megfigyelhető, hogy a karbontartalom már szinte vízszintes vonalakkal jellemezhető, vagyis a folyamat gyakorlatilag leállt, mert megszűnt az aktivitások különbségeként definiált hajtóerő (feltételeztük, hogy a mangán eloszlása nem változik a hőkezelés során). Szinte minden szövetelem ábrán jól látható, hogy a mangán az átalakulás során növeli a perlit mennyiségét és elősegíti a nem egyensúlyi szövetelemek képződését.



6.14/1 ábra Az E jelű mintára vonatkozó karbon és keménység, valamint szövetelem eloszlási számítások eredményei (Homogenizálás 1150°C, fél óra)



6.14/1 ábra Az E jelű mintára vonatkozó karbon és keménység, valamint szövetelem eloszlási számítások eredményei (Homogenizálás 1150°C, egy óra)



6.14/1 ábra Az E jelű mintára vonatkozó karbon és keménység, valamint szövetelem eloszlási számítások eredményei (Homogenizálás 1150°C, két óra)



6.14/1 ábra Az E jelű mintára vonatkozó karbon és keménység, valamint szövetelem eloszlási számítások eredményei (Homogenizálás 1150°C, tíz óra)

6.7 Összefoglalás

A ausztenit diffúziós homogenizáló hőkezelése során a karbon és a mangán között kialakult kölcsönhatás és annak következményei a bemutatott modellel leírhatók, ezt bizonyítja a számított és mért keménység adatok jó egyezése. Az eredmények összhangban vannak az gyakorlati tapasztalatokkal is.

A mangán kettős szerepet játszik a középvonali dúsulások stabilitásában. Mivel nagyon lassan diffundál, így a hagyományos homogenizáló hőkezelési eljárások alkalmazásával a mangántartalom kiegyenlítődésére nem kerül sor, vagyis a nem egyenletes mangáneloszlás megmarad. Ez a nem egyenletes mangáneloszlás befolyásolja egyrészt a karbontartalom homogenizálódását a bemutatott mechanizmuson keresztül, másrészt – ahogy az a 6.14 ábra képsorozatából is nyilvánvaló – a Betét oldali mangán a perlit mennyiség növekedését és esetenként nem egyensúlyi szövetelemek megjelenését eredményezi. A viszonylag kicsi karbontartalom különbség erőteljesen hozzájárulhat a mangántartalom különbség okozta szövetszerkezeti eltérések kialakulásához és nagyobb mennyiségű perlit, és/vagy akár nem egyensúlyi szövetelemek (bénit, martenzit) megjelenését is eredményezheti a normalizáló jellegű hőkezelés során. Az ilyen jellegű és mértékű szövetszerkezeti és keménységi inhomogenitás okozhatja a bevezetésben is említett lemezfeldolgozási problémákat.

Hivatkozások

[6.1] G. Krauss: Steels: Heat Treatment and Processing , ASM Int. Metals Park Ohio, USA, 1990

[6.2] N. Tsuji, R. Ueji, Y. Minamino, Y. Saito: Scripta Materialia 46 (2002) 305-310

[6.3] T.F. Majka, D.K. Matlock, G. Krauss: Metal. and Mat. Trans. A, 2002, Vol.33A pp. 1627-1637

- [6.4] www.comsol.com
- [6.5] J. Miettinen: Metal. and Mat. Trans. B, 28B (1997), pp. 281-297
- [6.6] Kaptay György személyes információi és számításai

[6.7] Wyss, U.: Grundlagen der Gasaufkohlung und Schutzgasglühung nach einem neuen Eintropfverfahren, HTM 17, 1962, 3, pp. 160-171

- [6.8] M.Hillert, M.Waldenström: Metal. Trans. A, 1977, vol.8A, pp.5-13
- [6.9] W.Huang: Metal. Trans. A, 1991, vol.22A, pp. 1911-1920

A fejezetben ismertetett tevékenységhez kapcsolódó saját publikációk

[S.6.1] M. Réger, B. Verő, I. Felde, I. Kardos: Lemezbugák középvonali dúsulásának csökkentési lehetőségei hőkezeléssel, XXIII. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban országos Konferencia és Szakkiállítás, Balatonfüred, 1-3 Október, 2008, pp.195-200

[S.6.2] M. Reger, B. Vero, I. Felde, I. Kardos, R.Colas, D.Y. Ju: Stability Examinations of Centerline Segregation of Slabs.: Journal of The Japan Society fo Heat Treatment, Netsu Shori ISSN 0288-0490, JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY OF HEAT TREATMENT 49: pp. 741-744. Paper 2C13. (2009)

[S.6.3] M. Réger, B. Verő, I. Kardos, P. Varga: The Effect of Alloying Elements on the Stability of Centerline Segregation, DEFECT AND DIFFUSION FORUM 297-301: pp. 148-153. (2010)

[S.6.4] Reger M, Vero B, Felde I, Kardos I: The Effect of Heat Treatment on the Stability of Centerline Segregation, JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING 56:(2) pp. 143-149. (2010)

[S.6.5] Reger M, Vero B, Kardos I, Fábián E R, Kaptay Gy: Diffusion of Carbon in the Centerline Region of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM (ISSN: 0255-5476) 659: pp. 441-446. (2010)
7. Összefoglalás

Az értekezésben ismertetett kutatási tevékenység a folyamatosan öntött lemezbugákban kialakuló középvonali dúsulás természetének feltárására, a kialakulás feltételrendszerének pontosítására és a már létrejött középvonali dúsulás utólagos homogenizálási lehetőségeinek tisztázására irányult. A fenti célok eléréséhez nagymértékben támaszkodtunk az ipari folyamatos öntőművek és hengerművek tapasztalataira, üzemi méréseire, melyek értelmezését és feldolgozását – empirikus elemeket is tartalmazó – matematikai modellek segítségével végeztük. A következőkben – az egyes fejezetekhez tartozó értékelések alapján – összefoglaljuk a lemezbugák középvonali dúsulásával kapcsolatos kutatómunka főbb eredményeit, megállapításait.

Termikus modell

A folyamatosan öntött lemezbuga kristályosodásának nyomon követésére szolgáló termikus modellt az öntéstechnológiai paraméterek figyelembe vételével adaptáltuk a reális üzemi viszonyok leírására. A modell által szolgáltatott eredmények validálása az izotópos kéregvastagságmérési kísérletek és felületihőmérséklet-mérések elemzése alapján történt. A számítási eredmények azt igazolták, hogy az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. szakemberei által korábban kidolgozott folyamatos öntési technológia alapvetően jól illeszkedett az öntőgép műszaki adottságaihoz. A termikus modell által szolgáltatott adatok felhasználásával az üzemi technológiában bevezetett korrekciók az öntési teljesítmény növekedését eredményezték úgy, hogy közben a technológia megbízhatósága, átláthatósága is javult. A termikus modell bevezetésének egyéb, járulékos eredményei az alábbiakban összegezhetők:

- Feltérképeztük, rendszereztük és elemeztük azt az üzemi adathalmazt, mely a termikus modell működéséhez szükséges. A szisztematikus adatgyűjtés, rendszerezés, valamint az input-output adatok elemzése segítette az eddig kevésbé ismert folyamatok lényegének és működésének megértését, azok korrekt adaptálását, illetve a megfelelő megoldások kialakítását.
- Lehetővé vált annak megítélése, hogy az egyes bemenő változók milyen irányban és mértékben befolyásolják az öntött szál kristályosodási folyamatait.
- Egyértelművé vált azon műszaki-technológiai problémák köre, amelyek termikus modell segítségével várhatóan megoldhatók.
- Ismételten igazolódott a matematikai modellezés, mint a gyártástechnológiát hathatósan támogató tevékenység létjogosultsága az üzemi feltételek között. A folyamatos öntés termikus modellezésének gyakorlata meghonosodott és ez, mint eszköz, a szakemberek rendelkezésére áll. Ezt meggyőzően bizonyítja egy új szelvényméretű buga (B08) gyártásának sikeres bevezetése.

Porozitási függvény

A középvonali dúsulás kialakulási mechanizmusainak tisztázásához a folyamatos öntés viszonyainak összetett elemzése, vagyis az acéltípus, a technológia és az öntőgép – mint komplex rendszer – együttes kezelése szükséges. A 400 adagra vonatkozó, acélminőségi és öntéstechnológiai információkat reprezentáló adathalmaz és a középvonali dúsulási mérőszám közötti gyenge korrelációs kapcsolat messzemenően igazolta ezt a megállapítást. Az öntőgép felépítésére és beállításaira vonatkozó információkat is magában hordozó LMI (Liquid Motion Intensity) modell bevezetésével a korrelációs kapcsolatok nagymértékben javultak, ennek alapján kijelenthető, hogy az öntőgép jellemzői alapvetően meghatározzák a

középvonali dúsulás mértékét. Hozzá kell tennünk, hogy egy modern, rendszeresen karbantartott, állapotfelügyelt öntőgépen is a névleges támgörgő-beállítások és valós támgörgő-pozíciók között igen nagy eltérés lehet, vagyis a modellben a valós támgörgő-résméretek figyelembe vétele szükséges. A középvonali dúsulás kialakulásában tehát az acél típusán, minőségén kívül nagyon lényeges szerepet játszik a valós támgörgő-résméret, a támgörgők állapota, az öntőgép beállítása, illetve a beállítás és az adott technológia összhangja.

A korrelációs számításba bevont, un. LMI 7 paraméter azt a térfogatot jellemzi, amely a szál következtében kialakuló zsugorodási folyamatban dermedése nincs megfelelő olvadékmennyiséggel kompenzálva, vagyis a kialakuló porozitási mértékkel tekinthető arányosnak. Ilyen körülmények akkor fordulhatnak elő, ha a mushy tartományban az olvadék áramlása akadályozott a mushy zóna lecsökkent permeabilitása miatt, illetve a külső kényszerekből (támgörgő-résméret) adódó hatás nincs összhangban a térfogatcsökkenéssel. Az LMI 7 paraméter a mushy szakasz különböző tartományaira értelmezhető. A számítások legfontosabb eredménye az, hogy az értelmezési tartomány alsó határának függvényében az LMI 7 paraméter és a dúsulási index közötti kapcsolat korrelációs tényezője maximumos jellegű függvény. A korrelációs együttható maximuma 30% körnvéki mushv olvadéktartalomhoz rendelhető, ha ennél nagyobb, vagy ennél kisebb olvadéktartalomtól értelmezzük az LMI 7 paramétert, akkor mindkét esetben csökken a korrelációs együttható. Ez a számítási eredmény a dermedésre vonatkozóan úgy értelmezhető, hogy a mushy olvadéktartalom 30 % körüli értékre csökkenése környékén az öntött szálon belüli szabad olvadékáramlás, olvadék utánpótlás leállása detektálható. A 0,82-es korrelációs tényező egy egyváltozós regressziószámítás eredménye, melyben a "független változó" az LMI 7 paraméter, a "függő változó" pedig a dúsulási index. A támgörgők közötti kihajlás figyelembe vétele alig javította a korrelációs együtthatót. Többváltozós regresszió alkalmazásával (pl. az összetételi jellemzők adatfeldolgozásba történő bevonásával) lényegesen nem változott a korrelációs együttható.

Az üzemi adatok statisztikai feldolgozása, illetve az LMI-paraméter számításba történő bevonása eredményeként az a következtetés is levonható volt, hogy az üzemi és laboratóriumi gyakorlatban alkalmazott sósavas makromaratásos eljárással meghatározott dúsulási index lényegében a lemezbuga belsejében maradó folytonossági hiány kiterjedését jellemzi. A középvonali dúsulásra megfogalmazott kettős kritérium – szennyező, ötvöző elemek dúsulása és folytonossági hiányok jelenléte – közül elsősorban ez utóbbi mutatható ki ezzel a maratási eljárással. Az így meghatározott dúsulási index áttételesen az acél kémiai összetételétől is függ, hiszen a zsugorodás mértéke, a mushy permeabilitása is függvénye a kémiai összetételnek.

Relatív olvadékáramlási sebesség eloszlás

Makrodúsulási szempontból kedvező, ha olvadékáramlásra nem kerül sor, vagyis az olvadék a belőle kristályosodó szilárd fázis környezetéből nem mozdul el. Ennek az a feltétele, hogy az olvadék és a szál relatív sebességkülönbsége zérus legyen. A relatív sebesség eloszlásból tehát elvileg következtetni lehet a makrodúsulás mértékére, feltéve, ha ismerjük a mushy olvadék koncentrációjának hely szerinti eloszlását, a különböző koncentrációjú olvadékok keveredési szabályait, kinetikáját, az egész rendszer viselkedését, dermedését a dendritágak közötti zegzugos alagútrendszerben. Az öntési esetek összehasonlításakor, illetve minősítéskor alapvető az a felismerés, hogy a makrodúsulás szempontjából kedvező, ha:

- minél kisebb a dendritközi olvadék ötvöző és szennyező tartalma, és
- minél kisebb a relatív olvadékáramlási sebesség a mushy zónában.

A relatív olvadékáramlási sebességeloszlás becslésére számítási módszert dolgoztam ki. Ennek segítségével meghatározható, hogy a szál mushy szakaszán belül, a szabad olvadékáramlás leállása előtti tartományban, várhatóan milyen irányú és nagyságú olvadékáramlás kialakulására lehet számítani. A tapasztalatok és számítások szerint a dúsulás kialakulása szempontjából kedvező, ha a mushy szakaszban kismértékű, egyenletes, a meniszkusz szint irányába mutató áramlás alakul ki. A relatív olvadékáramlási sebesség elemzése alapján az előnyös és hátrányos tendenciákat azonosítani lehet, illetve a relatív sebességeloszlás és a mushy zónában kialakuló mushy olvadék koncentrációja ismeretében a dúsulási veszélyesség szempontjából az egyes öntési esetek rangsorolhatók.

Valós öntési esetek vizsgálatának tanulságai

Részletesen elemeztük, hogy a középvonali dúsulással kapcsolatosan definiált két jellemző, a porozitási mérőszám és a relatív sebesség-eloszlás milyen módon változik a kristályosodási, öntési paraméterek, valamint az öntőgép résméret beállításainak függvényében. A bemutatott számítási eljárás állandósult állapotú viszonyok között kiterjeszthető a lemezbuga több, hosszirányú (öntési irányú) metszetére, ez a porozitási és áramlási viszonyok háromdimenziós jellegű vizsgálatát teszi lehetővé. Ugyanakkor a "belső minőséget" jellemző paraméterek nem állandósult öntési viszonyok feltételezése esetén is becsülhetők, így a tranziens öntési viszonyok, gyorsítások, lassítások és az un. végszálkiadás speciális esetei is jellemezhetővé válnak.

A matematikai modell alkalmazásával, vagyis porozitási mérőszám és a relatív sebességeloszlás értékelésével lehetőség nyílik az acélminőség, az öntési technológia és az öntőgép gépészeti beállítása és állapota közötti "összhang" minősítésére. Az értekezésben részletesen bemutattuk és elemeztük ezt a kapcsolatrendszert az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. vertikális öntőgépeire vonatkozóan. A vertikális öntés rendszeréből és sajátosságaiból adódóan nem lehet és nem is célszerű a különböző öntési esetekben (bugaméret, minőség, nem állandósult viszonyok) a folyamatokat állandó felületi hőmérséklet eloszlásra, vagyis közel állandó tócsamélység értékre szabályozni. A bemutatott esetek elemzése alapján nagyon konkrét javaslatok tehetők a támgörgő-beállítási stratégiára vonatkozóan, figyelembe véve a vertikális öntés technológiai adottságait, vagyis azt, hogy a különböző szelvények állandósult állapotú öntése, valamint a tranziens öntési viszonyok között a tócsa pozíciója változik az öntőgépen belül.

A középvonali dúsulás stabilitása

Az értekezésben a már létrejött középvonali dúsulás természetével, illetve a dúsulás csökkentési lehetőségével is foglalkoztam. A középvonali szegregáció a lemezbuga hengerlése során elnyúlik, ez a durvalemezek és gyakra a tekercselt szalagok középvonalában is kimutatható. A középvonali dúsulás a feldolgozás során elsősorban a durvalemezek esetében jelent problémát (rétegesség, hegesztési, alakítási nehézségek). Általános tapasztalat, hogy a lemezbugában kialakult középvonali szegregáció a hengerlést követően a durvalemezek utólagos hőkezelésével alig mérsékelhető. A kutatási munka kiterjedt annak a kérdésnek a megválaszolására is, hogy milyen tényezők, milyen mechanizmussal befolyásolják a középvonali szegregáció stabilitását.

Mesterségesen középvonali dúsulást tartalmazó szendvicsmintákat állítottunk elő, ezek kísérleti hőkezelése és vizsgálata lehetőséget adott a diffúziós folyamatokban az egyes elemek (pl. karbon és mangán) kölcsönhatásának figyelembe vételére is. Ennek alapján újfajta, a karbon aktivitásának elemzésén alapuló számítási modellt dolgoztunk ki. Az ausztenit diffúziós homogenizáló hőkezelése során a karbon és a mangán között kialakult kölcsönhatás és annak következményei a bemutatott modellel leírhatók, ezt bizonyítja a számított és mért keménységi adatok jó egyezése. Az eredmények összhangban vannak a gyakorlati tapasztalatokkal is.

A mangán kettős szerepet játszik a középvonali dúsulások stabilitásában. Mivel nagyon lassan diffundál, így ipari körülmények között a mangántartalom kiegyenlítődésére nem kerül sor, vagyis a nem egyenletes mangáneloszlás megmarad. Ez a nem egyenletes mangáneloszlás befolyásolja egyrészt a karbontartalom "homogenizálódását", másrészt a mangán a perlitmennyiség növekedését és esetenként nemegyensúlyi szövetelemek megjelenését eredményezi. A mangán nem egyenletes eloszlása következtében a stabilan megmaradó karbontartalom-különbség felerősíti a mangántartalom-különbség okozta szövetszerkezeti eltérések (inhomogenitás) kialakulását, ezért nagyobb mennyiségű perlit, és/vagy akár nemegyensúlyi szövetelemek (bénit, martenzit) megjelenésére lehet számítani a normalizáló jellegű hőkezelés alkalmazását követően. Az ilyen jellegű és mértékű szövetszerkezeti és keménységi inhomogenitás okozhatja a bevezetésben is említett lemezfeldolgozási problémákat.

8. A kutatási munka eredményeként megfogalmazható új tudományos eredmények, tézisek

A folyamatosan öntött acél lemezbugák kristályosodásával és annak középvonali dúsulásával kapcsolatos elméleti és gyakorlati kutató munkám során a következő, új tudományos eredményekre jutottam:

1. Módszert dolgoztam ki az öntött szálnak az öntőgépben kialakuló vastagsági méretének meghatározására. Az eddig alkalmazott megközelítésekkel szemben az új modell az ipari körülmények között az öntött szálra ható külső deformációs kényszerekből (nevezetesen a támgörgő résméret csökkentésből, támgörgők pozícionálási hibájából, kopásából, excentricitásából, valamint a támgörgők közötti kihajlásból) adódó vastagsági méretváltozást is figyelembe veszi. Az ipari körülmények között öntött lemezbugának a meniszkusz szinttől számított h(i) távolságban érvényes vastagsági értékének számítása céljából bevezettem a

 $r^{i} = r^{i}_{n\acute{v}l} + \Delta r^{i}_{poz} + \Delta r^{i}_{exc} + \Delta r^{i}_{bulg}$ (1.1)

összefüggést, ahol

- $r_{n\acute{e}vl}^i = f_{n\acute{e}vl}(h(i))$ a névleges támgörgő fél résméret a meniszkusz szinttől számított h(i) távolságban, a

- $\Delta r_{poz}^{i} = f_{poz}(h(i))$ a beállítási hibák és kopás miatt,

- $\Delta r_{exc}^i = f_{exc}(h(i))$ az excentricitás és csapágyhibák okozta,

- $\Delta r_{bulg}^i = f_{bulg}(h(i))$ pedig a kihajlásból adódó fél résméret eltérést reprezentálja a meniszkusz szinttől mért h(i) távolságban.

Az (1.1) szerint definiált r^i függvény megadja az öntőgépben lévő lemezbuga minden vizsgált metszetében a külső deformációs kényszereket is magában foglaló realisztikus fél vastagsági méretet. [T1, T2, T10, T11, T15, T17]

2. Számítási eljárást dolgoztam ki a folyamatosan öntött lemezbuga kristályosodásából és lehűléséből adódó (külső deformációs kényszerek nélküli) kéregvastagsági jellemzőinek meghatározására. A szál kényszer alakváltozás nélküli $d_{tot,term}^i$ fél vastagságát a meniszkusz szinttől egy adott távolságban a

 $d_{tot,term}^{i} = d_{sol,term}^{i} + d_{mush,sol,term}^{i} + d_{mush,liq,term}^{i} + d_{liq,term}^{i}$ (2.1) összefüggéssel számítottam, ahol

- *d*^{*i*}_{*sol.term*} a teljesen szilárd kéreg,

- d^{*i*}_{*mush_sol_term*} a mushy szilárd fázisának,
- *dⁱ_{mush,lia,term}* a mushy olvadék fázisának,

- $d_{liq,term}^{i}$ pedig a tiszta olvadékfázisnak a fajtérfogat változással korrigált vastagsági értéke. A (2.1) összefüggéssel definiált $d_{tot,term}^{i}$ megadja az öntött lemezbuga külső deformációs kényszerek nélküli, fajtérfogat változással korrigált fél vastagságát minden vizsgált metszetben. [T1, T2, T5, T10, T11, T15, T17]

3. Módszert dolgoztam ki a lemezbuga belsejében kialakuló olvadékmennyiségi viszonyok általános jellemzésére. A számítási eljárás azon a koncepción alapszik, hogy az öntési irányra merőleges irányban véges vastagságú szeletekre osztott lemezbugának a meniszkusz szinttől h(i) távolságban lévő keresztmetszetében a várható Δd^i olvadékhiány, illetve olvadék felesleg számszerű értékét az r^i (a reális fél vastagságot megadó, külső deformációs kényszereket figyelembe vevő függvény) és a $d^i_{tot,term}$ (külső alakváltozási kényszerek nélkül számított) függvény

$$\Delta d^{i} = r^{i} - d^{i}_{tot,term} \tag{3.1}$$

különbsége jellemzi. A Δd^i mennyiség felhasználásával definiáltam azt a síkban értelmezett és a

$$\Delta V^{i} = \Delta p_{korr}^{i} \cdot (h(i) - h(i-1))/2$$
(3.2)

összefüggéssel számítható olvadékmennyiség változást, mely a lemezbuga egy vizsgált szeletében bekövetkezik, miközben a szelet az öntés során a meniszkusz szinttől számított h(i-1) távolságból a h(i) távolságig halad. A (3.2) összefüggésben

 $\Delta p_{korr}^i = C_3 \cdot \Delta p^i$, ahol *C3* konstans és

 $\Delta p^i = \Delta d^{i-1} - \Delta d^i \, .$

Bevezettem az *LMI* függvényeket és azokat a paramétereket, melyek a ΔV^i jellemző felhasználásával különböző tartományokban (szálszakaszokban) és feltételrendszerben kumulatív módon generálhatók. Az összegzés a szál egészére, bizonyos tartományaira, előjeltől függetlenül, vagy az azonos előjelűeket szeparáltan kezelve is elvégezhető. Eredményesen alkalmaztam az *LMI* függvényeket az öntött szál belsejében kialakuló olvadékmennyiségi viszonyok számszerű jellemzésére. [T1, T2, T5, T10, T11, T15, T17]

4. A folyamatosan öntött acél lemezbuga mushy szakaszának kristályosodásával kapcsolatosan az *LMI* matematikai modellel végzett olvadékmennyiség számítási, valamint az üzemi kísérletek statisztikai elemzési eredményei, illetve ezek összevetése alapján megállapítottam: az öntött szál mushy szakaszán belül azonosítható egy olyan mushy-olvadék / mushy-szilárd térfogatarány, melynek elérését követően a szál belsejében – a zsugorodás kompenzálásához szükséges – olvadék utánpótlás leállása detektálható. A folyamatos öntés vizsgált viszonyai között a szabad olvadékáramlás akkor áll le, ha a mushy olvadéktartalom 30% alá csökken. Ez a mushy olvadéktartalom általában az öntött szál mushy szakaszának mintegy felénél található. [T17, T19, T20, T24]

5. Megállapítottam, hogy a mushy szakasz első felében (meniszkusz irányába eső részben, ahol a mushy olvadéktartalom >30 %) az olvadék kényszeráramlása a domináns folyamat. A mushy szakasz második részén (vágó szint irányába eső részben, ahol a mushy olvadéktartalom <30 %) a kristályosodási zsugorodásból adódó térfogatcsökkenés olvadékáramlással már nem tud kompenzálódni. Ebben a szakaszban a dendritek között a zsugorodási mikroüregek (porozitás) képződése a meghatározó folyamat. [T17, T18, T19, T20, T24, T25]

6. A matematikai modell alkalmazásával az öntött szál középvonali dúsulásában szerepet játszó mikroüregek kialakulási folyamatát és mennyiségét kvantitatív módon jellemeztem a "porozitási függvénnyel". A számításhoz az öntési irányra merőleges irányban véges vastagságú szeletekre osztott lemezbuga modellt alkalmaztam. A "porozitási függvény" a

mushy szakasz második részén, azaz a meniszkusz szinttől számított h(g) és h(z) távolságok között értelmezett. A g és z értéke a következőképpen definiált: g a 30 % mushy olvadéktartalomhoz tartozó, a meniszkusz szinttől h(g) távolságban lévő szelet sorszáma, z az első olyan szelet sorszáma, melyben a mushy olvadéktartalom zérus, vagyis h(z) megegyezik a szoliduszra számított tócsamélységgel.

A "porozitási függvény" értéke a meniszkusz szinttől számított h(n) távolságban (azaz az *n*-edik szeletben) az

$$LMI7(n) = \sum_{i=g}^{n} \Delta V^{i} \quad (\Delta V^{i} < 0)$$
(6.1)

paraméter értékével azonos, ahol ΔV^i az *i-1* és *i*-edik szelet közötti, síkban értelmezett olvadékmennyiség-különbség, melyre teljesül a $g \le n \le z$ feltétel.

Az *LMI7(n)* függvény a teljes értelmezési tartományra meghatározható, ha *n* tart *z*-hez. A "porozitási függvénynek" a teljes kristályosodási folyamat végére kialakuló végső értéke (n = z eset) jellemzi a szál középvonali dúsult részén a dermedés utáni végső porozitást. Minél kisebb a "porozitási függvény" végső értéke, annál kisebb porozitás várható a folyamatosan öntött lemezbugában. [T17, T19, T20, T24, T25]

7. Gyakorlatban előforduló öntési esetek (technológiai és technikai változatok) szisztematikus számítógépes szimulációja alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a "porozitási függvénnyel" kvantitatív, az "olvadékáramlási függvénnyel" pedig kvalitatív (olvadékáramlás iránya, nagyságrendje) módon elemezhető az öntési paramétereknek (pl. öntési sebesség, túlhevítés, szekunder hűtési intenzitás, stb.) és az ipari körülmények között működő, külső kényszerből adódó deformációs jelenségeknek (résméret csökkenés, támgörgők beállítási hibája, kopása, excentricitása, a támgörgők közötti kihajlás) a középvonali dúsulásra gyakorolt befolyása. A kidolgozott számítási módszer alkalmas az öntési paraméterek és a résméret csökkentési stratégia optimalizálására a várható középvonali dúsulás szempontjából. [T17, T19, T20, T22, T25]

8. A komplex matematikai modellel végzett számítások eredményeire alapozva kimutattam, hogy a lemezbuga végső porozitása alapvetően a támgörgők résméretének célszerű csökkentési ütemével befolyásolható. A támgörgők közötti kihajlás a porozitás szempontjából másodlagos szerepet játszik. Ugyanakkor a lemezbuga mushy szakaszának felső részén kialakuló olvadékáramlás iránya és nagysága, így várhatóan a makrodúsulás mértéke is érzékenyen függ mind a támgörgő résméret csökkentési ütemtől, a pozícionálási hibától, a támgörgők excentricitástól, mind pedig a támgörgők közötti kihajlás mértékétől. [T17, T19, T20, T22, T25]

9. Szisztematikus számítási sorozat elvégzésével bizonyítottam, hogy az összes támgörgő beállítási hibája, excentricitása, kopása és a támgörgők közötti kihajlások szuperponálódott hatásának eredményeként a porozitás – és várhatóan a makrodúsulás mértéke is – az öntött szál hossza mentén még állandósult öntési viszonyok között is változik. A porozitás ingadozásának alsó és felső határát a gépészeti paraméterek (támgörgő beállítás és annak hibái) ismeretében becsültem. Egy szokásos méretű vertikális lemezbuga öntőgép esetén a támgörgők +/-0,2 mm-es excentricitása a középvonalban várható porozitás értékében mintegy +/- 25 %-os relatív ingadozást okoz. Az ingadozás véletlenszerűnek tekinthető, mivel az egyedi támgörgőkből adódó hatások aszinkron módon összegződnek. [T17, T19, T20, T22, T25]

10. A középvonali dúsulás utólagos hőkezeléssel (homogenizálással) történő csökkentési lehetőségeinek elemzésére matematikai modellt dolgoztam ki, melynek jellemzője, hogy a karbon diffúzióját az ötvöző elemeknek a karbon aktivitásra kifejtett hatását is figyelembe véve írja le. A modellel a szerkezeti acélokban kialakuló jellegzetes középvonali dúsulás (melyekben Mn és C dúsulási értéke általában 2-4-szeres) homogenizálási hőkezeléssel való megváltoztatásának lehetőségeit vizsgáltam. Megállapítottam, hogy a középvonali dúsulás homogenizálással történő utólagos csökkentését a mangántartalom nem egyenletes eloszlása gátolja. A mangántartalom kiegyenlítődésére – a vonatkozó diffúziós tényező alacsony értéke miatt – sem a lemezbuga meleghengerlés előtti újrahevítése, sem a hengerlést követő homogenizálás során nincs számottevő lehetőség. Ha a mangántartalom nem egyenletes, akkor a karbontartalom sem egyenlítődik ki, így a dúsult és nem dúsult tartományok között mind a karbon-, mind a mangántartalom tekintetében – még több órás homogenizálás után is – számottevő koncentráció különbség detektálható. [T21, T23, T26-28]

11. Kísérleti és számítási eredmények alapján megállapítottam, hogy a mangánnak a karbon diffúzióra kifejtett fékező hatását Wyss cementálási kísérleteken nyugvó modellje alul-, a Hillert által kidolgozott, a Fe-Mn-C rendszerre felírt két alrács bevezetésén alapuló megközelítés pedig túlbecsüli. A fékező hatás a Hillert féle modell és annak Huang által továbbfejlesztett változatából becsülhető mérték közé esik. [T21, T23, T26-28]]

9. Az új tudományos eredmények hasznosítása

A kutatási eredmények hasznosítására közvetlenül az üzemi technológiatervezés és ellenőrzés területén került, illetve kerül sor jelenleg is. A folyamatosan öntött lemezbuga kristályosodási folyamataival kapcsolatos elméleti megfontolások, illetve számítási módszerek két különböző szimulációs szoftver formájában realizált komplex modellrendszerbe épültek be.

Az egyik szoftver a folyamatos öntés állandósult állapotának matematikai leírására szolgál. Jellegzetessége, hogy a lemezbuga hosszirányú alkotói mentén elvégzett két-dimenziós számítási módszer eredményeiből a lemezbuga kristályosodási sajátosságainak háromdimenziós leírását adja.

A másik szoftver a nem állandósult öntési viszonyok, eredményeként kialakuló jellemzők becslésére hivatott. A modell a lemezbuga széles oldalának középvonalára merőleges síkra vonatkozó eredményeket szolgáltatja az idő, illetve az időben változó öntési paraméterek függvényében.

Mindkét szoftver alkalmas a gyakorlati öntési viszonyok nevezetesen a támgörgő résméret csökkentés, támgörgők pozícionálási hibája, kopása, excentricitása, támgörgők közötti kihajlás széleskörű figyelembevételével a várható "porozitási" és "olvadékáramlási sebesség függvények" meghatározására.

A szoftvereket gyakorlati alkalmazására az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. folyamatos öntőművében ipari körülmények között került sor. Az elmúlt időszakban ezzel a szoftver rendszerrel ellenőrizték az újonnan bevezetett B08-as jelű lemezbuga öntési paramétereit. Többek között e két szoftverre támaszkodva végzik azokat az újabb fejlesztéseket, melyek célja a folyamatosan öntött lemezbugák belső minőségének javítása a folyamatos öntőmű támgörgő beállítási stratégiájának felülvizsgálatával.

Az új tudományos eredményeket tartalmazó publikációk:

[T1] Réger M, Szélig Á, Verő B, Magyar I, Králik Gy: Elméleti megfontolások az acélok folyamatos öntését kísérő térfogatváltozásokkal kapcsolatban, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 133:(1) pp. 2-6. (2000)

[T2] Fehérvári G, Verő B, Réger M: Az acélok folyamatos öntésének termikus modellezése TEMPSIMU-programmal, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 134:(11-12) pp. 382-386. (2001)

[T3] Réger M: Folyamatosan öntött szál belső szerkezetének jellemzése hőtani modell alapján, MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK - DUNAFERR DUNAI VASMŰ RT XLI:(4) pp. 171-176. (2001)

[T4] Réger M, Verő B, Fehérvári G, Szélig Á, H Kytönen, S Louhenkilpi: Folyamatosan öntött lemezbugák oszlopos és egytengelyű kristályosodása közötti átmenet, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 135:(4-5) pp. 109-114. (2002)

[T5] Réger M, Verő B, Kytönen H, Louhenkilpi S: Microstructure Characterisation of Continuously Cast Stabs by Using Heat Transfer Model, In: Proc. of 4th European Continuous Casting Conference. Birmingham, Anglia, 2002.10.14-2002.10.15., Birmingham: Institute of Materials, pp. 969-978.

[T6] Fehérvári G, Réger M, Verő B: Analysis of the Effect of Casting Parameters on Continuous Steel Casting, MATERIALS SCIENCE FORUM 414-415: pp. 395-404. (2003)

[T7] Réger M, Louhenkilpi S: Characterising of the Inner Structure of Continuously Cast Sections by Using of Heat Transfer Model, MATERIALS SCIENCE FORUM 414-5: pp. 461-469. (2003)

[T8] Réger M: Practical Method for Macrostructure Characterisation of CC Slabs, In: Sarler B, Gobin D (szerk.), Proc. Of the Seminar EUROTHERM 69, Heat and Mass Transfer in Solid-Liquid Phase Change Processes. Ljubljana, Szlovénia, 2003.06.25, Ljubljana: pp. 171-179.(ISBN:961-6311-15-8)

[T9] Réger M, Louhenkilpi S: Effect of Some Technological Parameters on the Macrosegregation of CC Slab, In: Int. Jubilee Conference Budapest Poytechnic. Budapest, Magyarország, 2004.09.04, pp. 131-138.

[T10] Réger M, Verő B, Csepeli Zs, Szélig Á: Folyamatosan öntött bugák makrodúsulása, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 137:(5) pp. 9-13. (2004)

[T11] Reger M, Vero B, Kytonen H, Louhenkilpi S, Szelig A: Macrostructure prediction of CC slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 473-474: pp. 375-380. (2005)

[T12] Réger M: Válasz Kaptay Györgynek. BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 138:(5) pp. 14-18. (2005)

[T13] Fehervari G, Reger M, Szelig A, Vero B: A folyamatos öntőgép kristályosítójában lejátszódó folyamatok fémtani vonatkozásai, BÁNYÁSZATI KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT 139:(5) pp. 1-6. (2006)

[T14] Réger M, Verő B, Szélig Á, Szabó Z: Folyamatosan öntött lemezbugák 3D-s jellemzése, MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK - DUNAFERR DUNAI VASMŰ RT XLVI:(1) pp. 21-26. (2006)

[T15] Réger M, Verő B, Csepeli Zs, Szélig Á: Macrosegregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 508: pp. 233-238. (2006)

[T16] Réger M, Verő B, Szelig Á: 3D Characterization of Continuously Cast Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 537-538: pp. 555-562. (2007)

[T17] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig Á: Újabb gondolatok a lemezbugák középvonali dúsulásáról, MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK - DUNAFERR DUNAI VASMŰ RT XLVII:(4) pp. 183-190. (2007)

[T18] Kardos I, Verö B, Csepeli Zs, Reger M: Systemetic examination of metallographic methods for detection of primary steel texture, MATERIALS SCIENCE FORUM 589: pp. 25-30. (2008)

[T19] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig A: Effect of the Casting Machine Condition on the Quality of Cast Slabs, ACTA MECHANIKA SLOVAKA 12:(3A) pp. 373-380. (2008)

[T20] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig A: Estimation and Consequences of Shrinkage of Steel Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 589: pp. 43-48. (2008)

[T21] Reger M, Vero B, Felde I, Kardos I: Lemezbugák középvonali dúsulásának csökkentési lehetőségei hőkezeléssel.In: Tóth T (szerk.), XXIII. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás. Balatonfüred, Magyarország, 2008.10.01-2008.10.03, Dunaújváros: pp. 195-200.(ISBN:963-86533-2-9)

[T22] Reger M, Kytönen H, Verő B, Szelig A: On the Centreline Segregation of CC Slabs, In: 6th European Conference on Continuous Casting 2008. Riccione, Olaszország, 2008.06.03-2008.06.06, Associazione italiana di metallurgia, pp. CD1-CD12.

[T23] Reger M, Vero B, Felde I, Kardos I, Colas R, Yu DY: Stability Examinations of Centerline Segregation of Slabs, JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY OF HEAT TREATMENT - NETSU SHORI 49, ISSN 0288-0490, pp. 741-744 (2009)

[T24] Reger M, Kytönen H, Vero B, Szelig A: Centerline Segregation of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM 649: pp. 461-466. (2010)

[T25] Szabó Z, Réger M, Verő B, Szabados O, Csepeli Zs, Kelemen T: A folyamatos acélöntés technológiai és technikai felülvizsgálata, az öntött szál minőségének javítása érdekében, ISD DUNAFERR MŰSZAKI GAZDASÁGI KÖZLEMÉNYEK (ISSN: 1789-6606) XLIX: (3) pp. 120-147. (2010)

[T26] Reger M, Vero B, Kardos I, Varga P: The Effect of Alloying Elements on the Stability of Centerline Segregation, DEFECT AND DIFFUSION FORUM 297-301: pp. 148-153. (2010)

[T27] Reger M, Vero B, Felde I, Kardos I: The Effect of Heat Treatment on the Stability of Centerline Segregation, JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING 56:(2) pp. 143-149. (2010)

[T28] Reger M, Vero B, Kardos I, Fábián E R, Kaptay Gy: Diffusion of Carbon in the Centerline Region of CC Slabs, MATERIALS SCIENCE FORUM (ISSN: 0255-5476) 659: pp. 441-446. (2010)

Jelölések listája

Az A1. sz. melle	ékletben alkalmazott jelölések	
a_{mush}	mushy zónában az olvadék aránya	-
C_1	konstans	-
C_2	konstans	-
C_3	konstans	-
d_{sol}	szilárd kéreg névleges vastagsága	mm
d_{mush}	mushy zóna névleges vastagsága	mm
d_{lia}	olvadék zóna névleges vastagsága	mm
d _{szilárd}	a kristályosodó kéreg szilárd állapotú virtuális vastagsága	mm
dolvadék	a kristályosodó kéreg olvadékának virtuális vastagsága	mm
d _{mush sol}	a mushy zóna szilárd fázis mennyiségének megfelelő névleges	mm
	vastagság	
d _{mush lia}	a mushy zóna olvadék fázis mennyiségének megfelelő	mm
musn,nq	névleges vastagság	
d _{sol term}	a szilárd kéreg faitérfogat változással korrigált vastagsága	mm
dmush tarm	a mushy zóna faitérfogat változással korrigált vastagsága	mm
dlia tarm	az olyadék faitérfogat változással korrigált vastagsága	mm
d _{tot}	a szál névleges félvastagsága	mm
dtat tam	a szál faitérfogat változással korrigált félyastagsága	mm
dininglan lin tom	a mushyban található olyadék faitérfogat változással korrigált	mm
<i>amusny,11q,term</i>	vastaosága	
d	a mushyban található szilárd fázis faitérfogat változással	mm
<i>amusny</i> ,soi,term	korrigált vastagsága	
f(h)	mushy zónában lévő olyadék arányt $(a - i)$ szolgáltató	
Jmush(11)	függyány	
f(h)	luggvelly a návlagos támgörgő haállításhál adádá rágmárat függvány.	
$\int n evl(n)$	a nevieges tamgoigo beamtasoor adodo resineret ruggveny	
$J_{poz}(n)$	a tamgorgok pozicionalasabol (bealiftasi nibak, kopas) adodo	
(1)	resmeret eitereseket dennialo iuggveny	
$J_{exc}(h)$	a tamgorgok excentricitasabol es a csapagynibakbol adodo	
(A)	resmeret eitereseket definialo fuggveny	
f _{bulg} (h)	a tamgorgok kozotti kihajlasbol adodo resmeret eltereseket	
,	definialo függveny	
h	meniszkusz szinttől mért távolság	тт
h(w)	az öntögép teljes hossza	тт
h(f)	a mushy szakasz kezdetének a meniszkusz szinttől számított	тт
	távolsága	
h(g)	a 30 % mushy olvadéktartalomhoz tartozó meniszkusz szinttől	тт
	számított távolság	
h(z)	az első olyan metszet meniszkusz szinttől számított távolsága,	тт
	melyben a mushy olvadéktartalom zérus (szoliduszra számított	
	tócsamélység)	2
LMI(1-7)	olvadékáramlás intenzitási paraméterek	mm^2
q(összetétel, T)	lineáris zsugorodási arány a $T \leq T_{lia}$ és a T_{liq} hőmérséklet között	-
r uml	a támgörgőnárok közötti távolság fele névleges beállítás	mm
- 11011	esetén	
r	a szál külső kontúriából adódó vastagság fele	mm
, Slia	likviduszhoz tartozó névleges kéregyastagság	mm
S iiq	lemezhiga névleges félyastagsága	mm
~101	10111020454 110 1 10500 101 1 401450454	

Tsurf	a lemezbuga felületi hőmérséklete	^{o}C
T_{sol}	szolidusz hőmérséklet	^{o}C
T_{lia}	likvidusz hőmérséklet	^{o}C
Tcentr	hőmérséklet a lemezbuga középyonalában	^{o}C
Taur sol	a szilárd kéreg átlagos hőmérséklete	°Č
Tayr much	a mushy átlagos hőmérséklete	^{o}C
- uvr,musn		C
Δd	olvadékhiányt vagy olvadékfelesleget jellemző vastagság	mm
Δd_{lia}	az olvadék zóna vastagságának változása	mm
Δd_{mush}	a mushy zóna vastagságának változása	mm
Δd_{sol}	a szilárd kéreg vastagság változása	mm
Δp	olvadékréteg vastagság különbség	mm
Δp_{korr}	olvadékréteg vastagság különbség korrigált értéke	mm
Δr_{poz}	a támgörgők beállításából adódó eltérés	mm
Δr_{exc}	az excentricitásból adódó eltérés	mm
Δr_{bulg}	a kihajlásból adódó eltérés	mm
ΔV	síkban értelmezett olvadékmennyiség változás	mm^2
Az A2. sz. m	ellékletben bevezetett új fogalmak jelölése	
$D_{mushvlig}$	mushy olvadék csökkenési üteme	tf%/mm
Ι	olvadékáramlás intenzitás, egységnyi olvadékvastagságra eső	mm/mm
	olvadék elmozdulás	
L_i	az <i>i</i> -edik felosztási elem húzóhengerek felé eső	mm
	határfelületének meniszkusz szinttől számított távolsága	
L _{tócsaliq}	likviduszra számított tócsamélység	mm
Ltócsasol	szoliduszra számított tócsamélység	mm
Ltócsazero	az olvadékutánpótlás mgszűnéséhez tartozó meniszkusz	mm
	szinttől számított távolság	
<i>R</i> _{tócsazero}	mushy olvadéktartalom, melynek elérésekor megszűnik a	tf%
	szabad olvadékáramlás	, i i i i i i i i i i i i i i i i i i i
R _{tócsaliq}	mushy olvadéktartalom a likviduszra számított	tf%
1	tócsamélységnél	Ū.
X	a szál azon részének félvastagsága, melyen keresztül	mm
	olvadékáramlás alakulhat ki	
AZ A3. SZ. M	ellekietben alkalmazott jelolesek	
b	szendvics minta "Betet" reszenek vastagsaga	m
C	karbon koncentracio	%
CA	karbon aktivitas	- 2 /
D	diffuziós tenyező	m^2/s
Mn	mangan koncentracio	%
S T	szendvics minta vastagsága	m
T	homerseklet	K
x	osztáspontok helyzete a szendvicsminta vastagsága mentén	т
Δt	időlépés	S
Δx	hely szerinti felosztás	т
	-	

dc_24_10

A0 sz. Melléklet A Mannesmann cégcsoportnál a középvonali dúsuslás mértékének besorolására szolgáló mintakép sorozat



A1 sz. melléklet A Liquid Motion Intensity (LMI) modell leírása

Az LMI modell a lemezbuga belsejében, elsősorban az un. külső kényszerek miatt kialakuló olvadékmozgás jellegének, irányának és a nagyságának a becslésére szolgál.

A folyamatosan öntött lemezbuga kristályosodása, illetve az azt kísérő jelenségek leírására kifejlesztett matematikai modell két-dimenziós, a széles oldal felületére merőleges, öntési irányú síkban lezajló viszonyok elemzésére alkalmas. Az LMI modell az olvadék mozgást síkban vizsgálja, bár maga jelenség nyilvánvalóan térbeli probléma.

A szimmetria miatt elegendő a lemezbuga felszíne és a szimmetriatengely közötti tartomány vizsgálata. A lemezbugában általános esetben kialakuló viszonyokat az A1. ábra szemlélteti.



A1. ábra A lemezbuga keresztmetszete

Definiáljuk elsőként a névleges bugamérethez tartozó jellemzőket. Névleges jelzővel ebben az esetben azokat a méreteket illetjük, melyek a hőtani modell (TEMPSIMU) számításaihoz mint bemenő, illetve mint output adatok kapcsolódnak. A hőtani modellben a névleges félbuga vastagság az ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. öntőgépére 120, a finnországi Rautaruukki Oy ívelt öntőgépére 109 mm. A valóságban ezek a méretek a kristályosító meniszkusz szintjéhez tartozó adatok. A leöntött lemezbugák meleg és hideg készmérete természetesen ennél kisebb.

Általános esetben a lemezbuga s_{tot} névleges félvastagsága három részre osztható. A felülettől jobbra haladva található a d_{sol} vastagságú szilárd kéreg, ezt követően a d_{mush} vastagságú mushy zóna, majd a d_{liq} vastagságú tisztán olvadékot tartalmazó zóna. A felület a T_{surf} , helytől függő hőmérsékletmezővel, míg a szilárd mushy határfelület a T_{sol} , a mushy olvadék határfelület a T_{liq} hőmérséklettel jellemezhető. A hőtani modell alapján a d_{sol} és az s_{liq} – a szoliduszhoz és a likviduszhoz tartozó – fajtérfogat változással nem korrigált kéregvastagsági adatai közvetlenül meghatározhatók. Osszuk fel a teljes bugametszetet öntési irányban véges darabszámú, azonos vastagságú szeletre. Legyen h(i) a meniszkusz szinttől számított távolság, ahol i = 0, 1, 2, ... w. A lemezbuga vizsgált hossza, azaz a h(w) értéke a ISD Dunaferr Dunai Vasmű Zrt. vertikális gépeire 14000 mm a finnországi ívelt gépre 30000 mm. Az *i*-edik metszetre igaz a

$$d_{tot}^{i} = d_{sol}^{i} + d_{mush}^{i} + d_{liq}^{i}$$
(A1.1)

ahol *i*-re teljesül a $0 \le i \le w$ feltétel. A kétfázisú mushy zóna tartalmazza a T_{liq} és T_{sol} közé eső hőmérsékletű anyagrészeket: az egyik fázis a dendritek már szilárd állapotú váza, a másik a dendritek közötti olvadék. A könnyebb kezelhetőség érdekében osszuk fel ezt a kétfázisú zónát az A2 ábrának megfelelő módon két résztartományra, ahol

$$d^{i}_{mush,liq} = a^{i}_{mush} \cdot d^{i}_{mush}, \text{ illetve}$$
(A1.2)

$$d^{i}_{mush,sol} = (1 - a^{i}_{mush}) \cdot d^{i}_{mush}.$$
(A1.3)

A képletekben a_{mush}^i az i-edik metszetben a mushy zónában lévő olvadék arányát jelenti a mushy egészéhez képest. Az a_{mush}^i értéke az öntött acél kémiai összetételének, valamint a teljes öntési technológiának függvénye, a hőtani modell eredményeiből, vagyis a mushy zónában kialakuló hőmérsékletmezőből, valamint az IDS szoftver számítási eredményeiből (közel egyensúlyi viszonyok között az adott kémiai összetétel esetén a mushy zóna hőmérsékletközében egyensúlyt tartó olvadék és szilárd fázis mennyisége) meghatározható (lásd 3.2 ábra). Ennek alapján a

$$a_{mush}^{i} = f_{mush}(h(i)) \tag{A1.4}$$

függvény ismertnek tekinthető.



A2 ábra A mushy zóna szerkezete az LMI modellben

Az A1 és A2 ábrán bemutatott viszonyok némileg módosulnak, ha a szimmetriatengelyben a hőmérséklet a T_{liq} alá csökken. Egyrészt a $T_{sol} \leq T_{centr} \leq T_{liq}$ feltétel esetén $d_{liq} = 0$, azaz csak szilárd és mushy található a keresztmetszetben, másrészt $T_{centr} < T_{sol}$ esetén $d_{liq} = 0$ és $d_{mush} =$ 0, vagyis a kristályosodás befejeződött.

Áttérve a kristályosodás és a hőmérsékletváltozás okozta méretváltozások figyelembe vételére, szintén az A2 ábra szerinti felosztását használjuk. Vezessük be a

$q = f(\ddot{o}sszet \acute{e}tel, T)$

függvényt, mely tetszőlegesen választott $T \le T_{liq}$ hőmérsékletre megadja az olvadékállapot $T = T_{liq}$ és a *T* hőmérséklet között kialakuló lineáris zsugorodás nagyságát. Ezt a kémiai összetétel alapján meghatározható függvényt az IDS szoftver szolgáltatja.

Ha az öntött szál fent definiált síkjában egy adott, a meniszkusz szinttől h(i) távolságban lévő metszetet megvizsgálunk, megállapíthatjuk, hogy a már megszilárdult kéreg teljesen, a mushy zóna pedig részben átesett a kristályosodáson, illetve az ebből adódó fajtérfogat változáson. Ebben az adott metszetben – a vizsgált síkban két-dimenziósan értelmezett – térfogatcsökkenést a beömlő olvadék kompenzálja. A szilárd kéreg átlaghőmérséklete a

$$T_{avr,sol}^{i} = C_1 \cdot (T_{sol} + T_{surf}^{i})$$
(A1.6)

kifejezéssel írható le. Amennyiben a szilárd kéregben a hőmérsékletváltozást lineáris jellegűnek tételezzük fel, akkor a C_1 konstans értéke 0,5. A szilárd kéregben azonban nem lineáris a hőmérséklet változása. A szilárd kéregre jellemző hőmérsékleti átlagérték numerikusan határozható meg, például a kéreg vastagság irányú véges számú részre osztásával, majd ez egyes részek átlaghőmérsékleteinek átlagolásával. Az öntött szál hőmérsékleti adatainak figyelembe vételével végzett előzetes számítások tapasztalata alapján a C_1 konstans jó közelítéssel 0,7-re választható, íly módon a számítás egyszerűsödik és a számítási idő mérséklődik.

A szilárd kéreg szolidusz hőmérséklethez viszonyított méretcsökkenése a

$$\Delta d_{sol}^{i} = d_{sol}^{i} \cdot \left(q(T_{avr,sol}^{i}) - q(T_{sol})\right), \tag{A1.7}$$

összefüggéssel számítható, így a szilárd kéreg reálisan feltételezhető, fajtérfogat változással korrigált, "természetes" vastagsága:

$$d_{sol,term}^{i} = d_{sol}^{i} - \Delta d_{sol}^{i}.$$
(A1.8)

A d_{mush}^{i} vastagságú mushy zóna átlagos hőmérséklete

$$T_{avr,mush}^{i} = C_2 \cdot (T_{liq} + T_{sol}), \tag{A1.9}$$

ahol C_2 az előzetes számítások szerint megközelítőleg 0,5 (vagyis a mushy zónán belüli hőmérsékletváltozás a hely függvényében lineárisnak tekinthető). Ebből a mushy zóna "természetes" vastagsága hasonló gondolatmenet alapján számítható

$$d^{i}_{mush,term} = d^{i}_{mush} - \Delta d^{i}_{mush}$$
(A1.10)

$$\Delta d_{mush}^{i} = d_{mush}^{i} \cdot (q(T_{avr,mush}^{i}) - q(T_{liq}))$$
(A1.11)

A mushy "természetes" vastagsága az (A1.4) szerinti függvény ismeretében felbontható az A2 ábra szerinti két részre:

(A1.5)

$$d^{i}_{mush,liq,term} = a^{i}_{mush} \cdot d^{i}_{mush,term}, \text{ illetve}$$
(A1.12)

$$d^{i}_{mush,sol,term} = (1 - a^{i}_{mush}) \cdot d^{i}_{mush,term} .$$
(A1.13)

Tekintettel arra, hogy az öntési hőmérséklet és a T_{liq} között az olvadék minimális térfogatváltozást szenved, feltételezhetjük, hogy

$$\Delta d_{liq}^i = 0 , \, \text{igy}$$
(A1.14)

$$d_{liq,term}^{i} = d_{liq}^{i} \tag{A1.15}$$

adódik. A szál természetes félvastagsága az *i*-edik metszetben, azaz a meniszkusz szinttől h(i) távolságban

$$d_{tot,term}^{i} = d_{sol,term}^{i} + d_{mush,term}^{i} + d_{liq,term}^{i}$$
(A1.16)

ahol

$$d^{i}_{mush,term} = d^{i}_{mush,sol,term} + d^{i}_{mush,liq,term}$$
(A1.17)

A fenti összefüggések némileg módosulnak, ha a szál középvonalában a hőmérséklet a T_{liq} alá csökken. $T_{sol} \leq T_{centr} \leq T_{liq}$ esetén a mushy átlagos hőmérséklete az A1.9 összefüggést figyelembe véve a

$$T_{avr,mush}^{i} = (T_{centr} + T_{sol})/2,$$
 (A1.18)

képlettel számítható, illetve $T_{centr} < T_{sol}$ esetén a szilárd kéreg átlagos hőmérséklete az (A1.6) képlet helyett a

$$T_{avr,sol}^{i} = C_{1} \cdot (T_{centr} + T_{surf}^{i})$$
(A1.19)

kifejezéssel becsülhető, ugyancsak $C_1 = 0,7$ feltételezéssel.

Jelölje $r_{n\acute{e}vl}$ a támgörgők által megszabott fél résméretet. Az öntőgép gépészeti adatainak, a névleges résméret adatok ismeretében a meniszkusz szinttől számított h(i) távolságban a támgörgők között rendelkezésre álló fél résméret az

$$r_{n\acute{e}vl}^{i} = f_{n\acute{e}vl}(h(i)) \tag{A1.20}$$

képlettel meghatározható. Ezt a függvényt a lemezbuga teljes hosszára értelmezzük, függetlenül attól, hogy egy adott h(i) távolságban a meniszkusztól számítva van-e támgörgő, vagy nincs. Ilyen értelemben az $r_{névl}$ a lemezbuga külső kontúr pontjainak helyzetét leíró függvényként értelmezhető. A lemezbuga külső kontúrja, vagyis a mindenkori résméret pillanatnyi értéke a bevezetésben említett okok miatt eltérhet az $r_{névl}$ névleges értéktől, így definiálhatók az alábbi, a névleges résmérettől való eltérést jellemző függvények:

$\Delta r_{poz}^i = f_{poz}(h(i))$	(beállítási hibák, kopás miatti eltérés),	(A1.21)
$\Delta r_{exc}^i = f_{exc}(h(i))$	(excentricitás, csapágyhiba okozta eltérés),	(A1.22)
$\Delta r_{bulg}^i = f_{bulg}(h(i))$	(kihajlásból fakadó eltérés).	(A1.23)

A beállításból, kopásból, excentricitásból, csapágyhibából származó eltérések nagysága az öntőgépen és a kiszerelt támgörgő szekciókon való mérésekkel közelítőleg, a gép terhelelten állapotára meghatározható. (Az öntés közben, terhelt állapotban kialakuló eltérések méréséhez "roll checker" berendezés üzemeltetése lenne szükséges.) A kihajlásból adódó eltérés a Tempsimu szoftver BOS (Bulging of Strand) moduljával becsülhető.

Az öntött szál rendelkezésére álló hely a meniszkusztól h(i) távolságban tehát az

$$r^{i} = r^{i}_{n\acute{v}l} + \Delta r^{i}_{poz} + \Delta r^{i}_{exc} + \Delta r^{i}_{bulg}$$
(A1.24)

kifejezéssel jellemezhető. Öntés közben a szál szilárd, de nagyhőmérsékletű kérge a belső ferrosztatikus nyomás hatására deformálódik. Az üzemi tapasztalatok szerint a szilárd kéreg, ha a szál belsejében olvadék is jelen van, mindig hozzáér a támgörgőkhöz még extrém beállítási hiba, vagy kopás esetén is. Ennek alapján kijelenthető, hogy az öntött szál külső kontúrja az r^i függvénnyel leírható.

A szál belsejében kialakuló olvadék mozgása az r^i és a $d^i_{tot,term}$ függvények viszonyától függ. Ha $r^i = d^i_{tot,term}$, akkor a zsugorodásból adódó változás és a lemezbuga külső kontúrja összhangban van. Ha $r^i > d^i_{tot,term}$, akkor a szükségesnél nagyobb a lemezbuga rendelkezésére álló hely, így annak középső részében a $d^i_{liq,term}$ értékén túl bizonyosan extra olvadék is jelen van. Ellenkező esetben, ha $r^i < d^i_{tot,term}$, a szál belsejében a $d^i_{liq,term}$ értékénél kevesebb az olvadék. Bonyolultabb, de hasonlóképpen kezelhető az a helyzet, amikor a T_{centr} $< T_{liq}$ egyenlőtlenség áll fenn. A $T_{sol} < T_{centr} < T_{liq}$ feltétel esetén a mushyban lévő olvadék mennyisége is változhat az A3 ábrán szemléltetett módon (extra mushy olvadék jelenléte, vagy éppen a hiánya is előfordulhat). Az ábra a szilárd és mushy határokat csak vázlatosan, a deformációs viszonyokat erősen eltúlozva mutatja. Ha a $T_{centr} < T_{sol}$ feltétel igaz, akkor vagy a szilárd kéreg deformációja következik be, vagy előfordulhat, hogy az öntött szál nem érintkezik a támgörgőkkel.



A3 ábra A szál belsejében kialakuló viszonyok $T_{sol} < T_{centr} < T_{lig}$ esetén

A fenti bekezdésben hansúlyozottan nem említettünk olvadékáramlást, hiszen az extra olvadék jelenléte, vagy az olvadékhiány az öntés állandósult állapotában egy adott keresztmetszetben állandónak tekinthető. Az r^i és a $d^i_{tot,term}$ mennyiségek viszonyának ilyen jellegű elemzése az öntőgép koordináta rendszeréhez kötött vizsgálatot tesz lehetővé (az A2 mellékletben ebben a koordináta rendszerben határozzuk meg az adott keresztmetszetben jelenlévő, de az öntött szálhoz képest elmozduló olvadék mozgásának jellemzőit).

Az olvadékmennyiség változását, annak dinamikáját szemléletesebben tekinthetjük át, ha az elemzést az öntési sebességgel mozgó lemezbugához kötött koordináta rendszerben végezzük. Ez a megközelítés lehetőséget ad a lemezbuga egy adott, öntési sebességgel mozgó részében az idő függvényében kialakuló olvadékmennyiségi változások tanulmányozására. Válasszuk a lemezbuga modell legfelső, a meniszkusz szinttől h(i=1) távolságban lévő szeletét. Vizsgáljuk meg, hogy ebben a szeletben az olvadékállapottól a dermedés befejeződéséig milyen olvadékmennyiségek várhatók, valamint azt, hogy az öntés mely szakaszain lesz jellemző az extra olvadék jelenléte, illetve mely szakaszon kerülhet sor olvadék kiszorítására.

Ha nincs külső kényszer, akkor a vizsgált, a lemezbugával együtt mozgó szeletben a meniszkusz szinttől h(i) távolságban

$$d_{szilárd}^{i} = d_{sol,term}^{i} + d_{mush,sol,term}^{i}$$
(A1.25)

vastagságú szilárd fázis, illetve

$$d^{i}_{olvad\acute{e}k} = d^{i}_{liq,term} + d^{i}_{mush,liq,term}$$
(A1.26)

vastagságú olvadék fázis van jelen. A szál külső kényszer nélküli vastagsága a

$$d_{tot,term}^{i} = d_{szilárd}^{i} + d_{olvadék}^{i}$$
(A1.27)

kifejezéssel jellemezhető, ugyanakkor a reális deformációs hatásokat is figyelembe véve a szál rendelkezésre álló hely az (A1.24) egyenlet szerinti értékkel azonos.

Az A1.24 és A1.27 összefüggésekkel meghatározott vastagsági jellemzők közötti különbség vagy növeli, vagy csökkenti a lemezbuga vastagságát a következők szerint:

$$\Delta d^{i} = r^{i} - d^{i}_{tot,term}. \tag{A1.28}$$

Képezzük a

$$\Delta p^{i} = \Delta d^{i-1} - \Delta d^{i} \tag{A1.29}$$

különbséget. A Δp^i mennyiség arányos azzal az extra olvadék vastagsággal, amely az i-edik szeletbe beáramlik (Δp^i negatív), illetve azzal az olvadék vastagsággal, amely a szeletből ki kell, hogy áramoljon (Δp^i pozitív).

Feltehető, hogy a szilárd kéreg külső deformációs kényszeréből eredő térfogatváltozás nagyrészt az olvadék számára rendelkezésre álló térfogat módosulását idézi elő. Ugyanakkor

ismert, hogy a lemezbuga keskeny oldalain nincsenek támgörgők, így a lemezbuga szélesség irányú alakváltozása nem zárható ki. Az átlagosan 1000-1200 °C hőmérsékletű szilárd kéregben a feszültségek következtében kúszási folyamatok is történhetnek. E hatások figyelembe vétele céljából vezessük be a C_3 korrekciós paramétert a következők szerint:

$$\Delta p_{korr}^i = C_3 \cdot \Delta p^i \,. \tag{A1.30}$$

Ha a C_3 paraméter értékét 1-nek választjuk, akkor ezzel azt feltételezzük, hogy a szilárd kéreg vastagság irányú deformációja csakis az olvadék számára rendelkezésre álló térfogatot módosítja. Véleményem szerint a szilárd kéreg deformációjának egy része – a fent említett hatások miatt - effektív módon nem játszik szerepet az olvadék számára rendelkezésre álló térfogat megváltoztatásában. A számítások során a C_3 paraméter értékét ezért 0,85-re választottam. Megjegyezzük, hogy e korrekciós paraméter jelentéstartalmának tisztázása és értékének behatárolása további pontosítást igényel. Ugyanakkor kijelenthető, hogy a vizsgált szeletbe beáramló, illetve onnan eltávozó olvadék mennyiségi arányát a C_3 paraméter értéke lényegében nem befolyásolja.

A fenti megfontolásokat figyelembe véve az *i*-edik szeletben az olvadékréteg vastagságára a

$$d_{liq,korr}^{i} = d_{liq}^{i} + \Delta p_{korr}^{i} = d_{liq,term}^{i} + d_{mush,liq,term}^{i} + \Delta p_{korr}^{i}$$
(A1.31)

összefüggést kapjuk.

A Δp_{korr}^{i} mennyiség a két-dimenziós megközelítés miatt olvadékréteg vastagságként (mm) értelmezhető olvadékmennyiség változásnak fogható fel. Az *i* és *i*-1 pozíciók közötti ΔV^{i} -vel jelölt olvadékmennyiség változás két-dimenziós síkbeli mennyisége (mm²) a két pozíció közötti távolsággal arányos, és értéke a

$$\Delta V^{i} = \Delta p_{korr}^{i} \cdot (h(i) - h(i-1))/2 \tag{A1.32}$$

összefüggéssel határozható meg.

Az LMI paraméterek a ΔV^i kifejezés különböző tartományokban és feltételrendszerben kumulatív módon generálhatók. Az összegzés a szál egészére, bizonyos tartományaira, előjeltől függetlenül, vagy az azonos előjelűeket szeparáltan kezelve is elvégezhető.

Legyen z az első olyan szelet sorszáma, melyben a mushy olvadéktartalom zérus, vagyis h(z) megegyezik a szoliduszra számított tócsamélységgel. Az öntött szál azon részén, mely olvadékot is tartalmaz (a meniszkusz szinttől a h(z) szoliduszra számított tócsamélység értékig) definiált *LMI*1 paraméter a következőképpen írható fel:

$$LMI1 = \sum_{i=1}^{z} \Delta V^{i} .$$
(A1.33)

Csak az olvadék beszívásra vonatkozóan definiálható az

$$LMI1_{be} = \sum_{i=1}^{z} \Delta V^{i} \quad (\Delta V^{i} < 0), \tag{A1.34}$$

illetve az olvadék kinyomására az

$$LMI1_{ki} = \sum_{i=1}^{z} \Delta V^{i}, \quad (\Delta V^{i} > 0)$$
(A1.35)

paraméter. Az $LMI1_{be}$ és $LMI1_{ki}$ paraméterek elkülönült vizsgálatával az olvadék beszívásával, illetve kipréselésével jellemezhető tartományok a tapasztalatok szerint pontosabban azonosíthatóak.

Legyen a mushy szakasz kezdete a *f*-edik szeletben, azaz a meniszkusz szinttől h(f) távolságra és legyen a mushy olvadéktartalma egyenlő 30 %-al a *g*-edik szeletben, azaz a meniszkusz szinttől h(g) távolságra. A mushy szakaszon belüli olvadékmennyiségi viszonyok elemzéséhez definiáljuk az *LMI5* és *LMI6* paramétereket a következő módon:

$$LMI5 = \sum_{i=f}^{z} \Delta V^{i} , \quad (\Delta V^{i} < 0)$$
(A1.36)

$$LMI6 = \sum_{i=f}^{g} \Delta V^{i} , \quad (\Delta V^{i} < 0)$$
(A1.37)

Az *LMI*7 paraméter a dermedés utolsó szakaszában, a mushy zóna azon tartományán definiált, melyben a mushy olvadéktartalma 30 % alatti érték. A h(g) és h(z) közötti szálszakaszon értelmezett *LMI*7 paraméternek a teljes kristályosodási folyamat végére kialakuló végső értéke (n = z eset) jellemzi a szál középvonali dúsult részén a dermedés utáni végső porozitást. A fentiek alapján az *LMI*7 az alábbi képlettel számítható:

$$LMI7 = LMI5 - LMI6$$
, következésképpen (A1.38)

$$LMI7 = \sum_{i=g}^{z} \Delta V^{i} , \quad (\Delta V^{i} < 0).$$
(A1.39)

A "porozitási függvény" értéke definíció szerint a meniszkusz szinttől számított h(n) távolságban (azaz az *n*-edik szeletben) az

$$LMI7(n) = \sum_{i=g}^{n} \Delta V^{i} \quad (\Delta V^{i} < 0)$$
(A1.40)

mennyiséggel azonos, ha teljesül a $g \le n \le z$ feltétel.

A2 melléklet Az öntött szál és a benne lévő olvadék közötti relatív sebességkülönbség meghatározásának módszere

Az A1 mellékletben ismertetett módon szintén az öntött szál széles oldalának középvonalán áthaladó, öntési irányú félmetszetét vizsgáljuk, vagyis a térfogatkülönbségek háromdimenziós problémáját két-dimenziós feladattá redukáljuk.

Tételezzük fel, hogy az olvadék áramlására csak ebben a síkban kerülhet sor: a síkból nem lép ki olvadék, illetve oda külső olvadék nem lép be.

Definiáljuk azt a mushy olvadéktartalmat ($R_{t \circ csazero}$), melynek elérésekor megszűnik a szabad olvadékáramlás: legyen ez az érték

R_{tócsazero}=30 %,

amely kompatibilis a korábbiakban ismertetett megfontolásokkal.

Összhangban a 3.2 ábra kapcsán ismertetett eredményekkel, tételezzük fel, hogy az öntött szál azon metszetében, melyben a középvonal éppen eléri a likvidusz hőmérsékletet, vagyis a meniszkusz szinttől *L_{tócsalig}* távolságban (mushy szakasz első pontja) a mushy olvadéktartalma

 $R_{t \circ csaliq} = 60 \%$.

Tételezzük fel továbbá, hogy a mushy olvadéktartalma lineárisan csökken az öntött szál mushy-t tartalmazó szakaszán belül, vagyis az $L_{tócsaliq}$ és $L_{tócsaliq}$ között (3.2 ábra) az (A1.4) összefüggés szerinti függvény lineáris.

Definiáljuk a mushy olvadék csökkenésének ütemét a következőképpen:

$$D_{mushyliq} = R_{t \acute{o} csaliq} / (L_{t \acute{o} csaliq} + L_{t \acute{o} csasol}), [\%/mm]$$
(A2.1)

Ekkor az olvadékáramlás megszűnéséhez tartozó *L*tócsazero távolság:

$$L_{t \acute{o} csazero} = L_{t \acute{o} csazero} - (L_{t \acute{o} csazero} + L_{t \acute{o} csazero} / R_{t \acute$$

amely jelen esetben a linearitás miatt az

 $L_{t \acute{o} csazero} = (L_{t \acute{o} csaliq} + L_{t \acute{o} csasol})/2$

képlettel számítható.

A meniszkusz szinttől L távolságra a fentiek alapján már becsülhető a mushy R olvadék tartalma.

 $L_{t \acute{o} csazero}$ távolságban, ahol a mushy olvadéktartalma $R_{t \acute{o} csazero}$, a szál és a benne lévő olvadék sebessége azonos, vagyis a relatív sebességkülönbség zérus.

Osszuk fel az $L_{t \acute{o} csaliq}$ - $L_{t \acute{o} csaliq}$ távolságot *n* részre. Legyen L_i az *i*-edik felosztási elem (*i*=1,2,3...*n*) húzóhengerek felé eső határfelületének meniszkusz szinttől számított távolsága.

(A2.3)

Az L_i távolságnál határozzuk meg a támgörgők aktuális pozícióját, a már megszilárdult kéreg zsugorodását, a mushy szilárd és olvadék vastagságát az A1 mellékletben ismertetett módon.

Az L_i távolságnál a szál természetes vastagsága az (A1.16) összefüggés szerint $d_{tot,term}^i$, a támgörgők között rendelkezésre álló hely az (A1.24) szerint r^i . A fenti két paraméterből képzett (A1.29) szerinti mennyiség, nevezetesen a

$$\Delta p^{i} = \Delta d^{i-1} - \Delta d^{i} \tag{A2.4}$$

azonos azzal az olvadékmennyiség változással, mely a lemezbuga egységnyi felbontás szerinti előre haladása során a két határfelületen (L_i és L_{i-1} helyzetű határfelületeken) be kell lépjen (Δp^i negatív), illetve el kell távozzon (Δp^i pozitív).

Az *n*-edik elem L_n pozíciójú határfelületén már nincs olvadékáramlás, hiszen $L_n = L_{tócsazero}$. Az L_{n-1} helyzetű metszetben azon – két dimenzióban értelmezett - olvadék vastagság, melyen keresztül egyáltalán olvadék mozgás történhet, megegyezik az (A1.31) kifejezéssel, azaz

$$X_{n-1} = d_{liq,korr}^{n-1} = d_{liq}^n + \Delta p_{korr}^n = d_{liq,term}^n + d_{mush,liq,term}^n + \Delta p_{korr}^n \quad . \tag{A2.5}$$

Definiáljuk az L_{n-1} helyzetű határfelületre az I_{n-1} mennyiséget, amelyet olvadékáramlás intenzitásnak nevezünk. Ez megfelel a két-dimenziós vizsgálatban az olvadékáramlás mm/mm dimenziójú, a lemezbuga és az olvadék relatív elmozdulási sebességének (egységnyi olvadékvastagságra eső olvadék elmozdulás):

$$I_{n-1} = \Delta p_{korr}^n / X_{n-1}. \tag{A2.6}$$

Az L_n és az L_{n-1} között található a lemezbugának azon utolsó szakasza, melyben szabad olvadékáramlás még kialakulhat. Mivel az L_n pozíciójú határfelületen nincs olvadékáramlás, így az ebben az elemben létrejövő térfogatváltozás kompenzációja csakis a másik, a meniszkusz irányában lévő L_{n-1} pozíciójú, X_{n-1} szélességű résen keresztül valósulhat meg, ehhez pedig a fenti I_{n-1} olvadékáramlási intenzitás kialakulása szükséges.

Az L_{n-1} pozíciójú, X_{n-1} szélességű résben létrejövő I_{n-1} olvadékáramlási intenzitás kihat az összes felette lévő keresztmetszetben kialakuló áramlásra. A *n*-*1*-edik elem húzógörgők felöli határfelületén ugyanezen I_{n-1} olvadékáramlási intenzitás működik, hiszen ez az *n*-edik és az *n*-*1*-edik elem közös határfelülete. Az *n*-*1*-edik elem meniszkusz felé eső L_{n-2} pozíciójú, X_{n-2} szélességű határfelületén így az *n*-edik elemből adódóan az

$$I_{n-1} \cdot X_{n-1} / X_{n-2} \tag{A2.7}$$

intenzítás érvényesül. Ehhez hozzáadódik az *n-1*-edik elem saját térfogatváltozási különbségéből származó intenzitási tag, vagyis végül is

$$I_{n-2} = I_{n-1} \cdot X_{n-1} / X_{n-2} + \Delta p_{korr}^{n-1} / X_{n-2}.$$
(A2.8)

adódik az n-1-edik elem meniszkusz felöli határfelületen kialakuló intenzitásra.

A gondolatmenetet folytatva általánosságban felírható az i-edik elem meniszkusz felé eső határfelületén kialakuló intenzitásra, azaz a lemezbuga és az olvadék közötti relatív elmozdulási sebességre a

$$I_{i-1} = I_i \cdot X_i / X_{i-1} + \Delta p_{korr}^i / X_{i-1},$$
(A2.9)

összefüggés, ahol i = n, n-1, n-2...1.

Az i=1 érténél az

 $I_0 = I_1 \cdot X_1 / X_0 + \Delta p_{korr}^1 / X_0$ (A2.10)

kifejezés jellemzi a mushy szakasz kezdetén az olvadékáramlás intenzitását.

A3 melléklet A karbon aktivitás számításán alapuló diffúziós modell leírása

A karbon aktivitásán, illetve annak a szendvics mintán belüli különbözőségén alapuló diffúziós számításhoz véges differencia módszer alkalmazását választottuk. A szendvics minták általános szerkezetét az A1 ábra mutatja vázlatosan. A szimmetria miatt elegendő a minta fél vastagságára redukálni az elemzéseket és számításokat.



A1 ábra A szendvics minták általános szerkezete

Osszuk fel az *s* vastagságú minta fél vastagságát n egyenlő részre, és jelöljük az így létrejött osztáspontok x irányú koordinátáját rendre $x_0, x_1, x_2, ..., x_i ... x_{n-1}, x_n$ -el, a köztük lévő távolságot jelölje Δx . Ekkor az

$$x_i = i \cdot \Delta x$$
 (i=0,1,2,3...n) és (A3.1)

$$x_n = s/2. \tag{A3.2}$$

Legyen a "Betét" anyagrész vastagsága b ($b \le s$) és tegyük fel, hogy a h-adik osztáspontra (Al ábra)

$$(A3.3)$$

teljesül.

Jelölje C_0 , C_1 , C_2 ... C_n sorrendben az osztáspontoknál a karbon koncentrációját, Mn_0 , Mn_1 , Mn_2 ... Mn_n pedig rendre a mangántartalmat ugyanezen pontokban.

A t = 0 időpillanatra vonatkozóan definiáljuk a kezdeti koncentráció-eloszlást az alábbiak szerint:

$$C_i^0 = C_B$$
 és $Mn_i^0 = Mn_B$ ha $i < h$ és

133

$$C_i^0 = C_A$$
 és $Mn_i^0 = Mn_A$ ha $i \ge h$,

ahol C_B és C_A , illetve Mn_B és Mn_A a "Betét" és az "Alap" karbon-, illetve mangántartalma.

Definiáljuk a

$$CA_i = f(C_i, Mn_i, T)$$
 és (A3.4)

függvényt, ahol CA_i a karbon aktivitása az x_i osztáspontban a t = 0 időpillanatban. A T a hőmérséklet konstans értékű a számítás során. A CA_i függvény vizsgált típusai a 6.5 fejezetben ismertetett szakirodalmi hivatkozásokban megtalálhatók.

Jelölje Δt a számítás időfelosztásának lépésközét és vezessük be az

$$r = \frac{\Delta t}{\left(\Delta x\right)^2} D \tag{A3.5}$$

paramétert, ahol *D* az aktív karbonra (karbonaktivitásra) érvényes un. "effektív" diffúziós tényező. Az "effektív" diffúziós tényező meghatározási módjának leírása a 6.5 fejezetben található.

Legyen az x_i osztáspontban és a $t_j = j \cdot \Delta t$ időpontban az aktivitás aktuális értéke

$$CA_{i}^{j} = f(C_{i}^{j}, Mn_{i}^{j}, T).$$
 (A3.6)

A t_j időpontra és x_i osztáspontra felírható a véges differencia módszer algoritmusa szerinti

$$CA_{i}^{j+1} = r \cdot CA_{i+1}^{j} + (1 - 2 \cdot r) \cdot CA_{i}^{j} + r \cdot CA_{i-1}^{j}$$
(A3.7)

egyenlet.

Képezzük a

$$\Delta CA_i^j = CA_i^j - CA_i^{j-1} \tag{A3.8}$$

különbséget, mely az x_i osztáspontban az aktív karbon értékében bekövetkezett változást jellemzi a t_j időpontban. A valódi karbontartalom is ezzel az értékkel csökken az x_i osztáspontban a t_j időpontban ezért

$$C_i^j = C_i^{j-1} + \Delta C A_i^j \,. \tag{A3.9}$$

Íly módon számítható az x_i osztáspontban a t_j időpontra vonatkozó karbontartalom aktuális értéke. Ennek ismeretében a fenti formulák alapján meghatározható a karbonaktivitás értéke a t_{j+1} időpillanatra.