FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2004. március 26-27.

TERMÉKTULAJDONSÁGOK BECSLÉSI LEHETŐSÉGEI AZ ÖNTÉSI TECHNOLOGIA ALAPJÁN

Dr. Réger Mihály- Dr. Verő Balázs- Dr. Csepeli Zsolt -Szélig Árpád

Abstract The inner structure of the continuously cast semis has a great importance from the point of view of further processing and application. The main reason for this is the very direct effect of the inner structure's features (ie. porosity, macrosegregations, geometry of primary dendrites) on the technological characteristic features of the semis during further processing (ie. crack sensitivity, formability, etc). The paper deals with the possible ways of macrostructure determination on the basis of the results of mathematical modeling of continuous casting process. We pay a special attention to the columnar-equiaxed transition as a function of heat parameters of the casting process and to the macrosegregation formation caused by the motion of solute enriched interdendritic liquid in the mushy zone.

Az utóbbi évtizedekben a számítástechnikai lehetőségek bővülésével egyre nagyobb teret kap a technológiai folyamatok matematikai modellezése, míg az üzemi kísérletek elsősorban a modellek jóságának ellenőrzésére szolgálnak. A matematikai modellezés lehetőségei természetesen korlátosak, hiszen a valóság mindig sokkal bonyolultabb, mint egy modell. A következőkben áttekintést adunk arról, hogy a kohászat egyik összetett technológiájának, a folyamatos öntés matematikai modellezésével milyen feltételrendszerben, milyen típusú és milyen mélységű eredmények szolgáltatathatók a termék, a lemezbuga végső tulajdonságai tekintetében.

1. A folyamatos öntés sajátosságai

Bár a technológia ipari szintű alkalmazása mintegy 30 éves múltra tekinthet vissza, az acélok folyamatos öntése során lezajló fémtani, metallurgiai folyamatok bizonyos részletei még ma sem ismertek. Ez részben azzal magyarázható, hogy az öntött szál belsejében kialakuló viszonyok, és az ott történtek kívülről nagyon nehezen és csak közvetett úton figyelhetők meg, és az öntött termék utólagos vizsgálata ezekre a részletekre nem ad választ. Ha a technológiát csak a folyékony fém kristályosítóba történő érkezésétől vesszük szemügyre, akkor is igen összetett folyamatról van szó. A terméktulajdonságok alapvetően a részfolyamatok eredő hatásától függnék, ezek jellemzésére álljon itt egy felsorolás a legfontosabb megválaszolandó részkérdésekről:

- szilárd kéreg kialakulása, folyamatos növekedése az adott hőtani és áramlási viszonyok között,
- folyékony fém áramlása a bemerülő tölcseáron keresztül, olvadék-áramlási kép kialakulása,
- olvadt és szilárd öntőpor réteg viselkedése az olvadék tetején, valamint a kristályosító és a szilárd kéreg között,
- öntőpor és salak bekeveredésének és szeparációjának feltételrendszere a meniszkusz szinten, felületi hullámok kialakulása,
- a kristályosító oszcillációs mozgása, oszcillációs nyomok kialakulása a felületen,
- az öntött acél fizikai, hőtani tulajdonságainak, illetve azok hőmérsékletfüggése,
- a primer és szekunder hűtés hűtési intenzitásának eloszlása, ennek hatása a szilárd kéreg növekedésének menetére az öntési sebesség és a túlhevítés függvényében,
- mikrodúsulás, zárványképződés,

- a kristályosodás jellege, oszlopos, egyenlőtengelyű, illetve a kettő közötti átmenet, makrodúsulás, hídképződés,
- támgörgők közötti kihajlás, ezek dúsulást okozó hatása,
- a hűlés és kristályosodás okozta térfogatcsökkenés, zsugorodás követése a görgők beállításával, ennek hatása a makrodúsulásra.

2. Hőmérsékleti mező, szilárd kéreg növekedés

A modellezés egyik legalapvetőbb eredménye az olvadéktócsa mélységének, a mindenkori szilárd kéreg vastagságának, valamint az öntött szálban kialakuló hőmérsékleti mezőnek a becslése.

Az elmúlt években végzett szisztematikus adatgyűjtés és modellezés eredményeképpen rendelkezésünkre áll az öntőgép hőtani modellje, melynek megbízhatóságát felületi hőmérsékletmérési eredmények, illetve radioaktív izotópos vizsgálatok is bizonyítják. A modell megalkotásához szükséges volt mind a kristályosító, mind a szekunder zónában működő hűtő elemek adatainak részletes összegyűjtése és interpretálása, valamint az öntött acél fizikai tulajdonságainak meghatározása (IDS szoftver) [1].

A hőtani modell az öntött szál teljes hosszában szolgáltatja a hálópontok hőmérsékleti adatait [2]. Példaként a szál felületi hőmérséklet eloszlását (1. ábra) és a szál belsejében kialakuló szolidusz (2. ábra) felület elhelyezkedését mutatjuk be.

1. ábra A szál felületi hőmérsékletének eloszlása

2. ábra A szolidusz felület elhelyezkedése a szelvény belsejében

3. Olvadékáramlás

A kristályosítóban és környékén kialakuló áramlási viszonyok befolyásolják a kéreg növekedését elsősorban a keskeny oldal mentén, ahol az olvadéksugár a szilárd kéreg belső falára csapódik. Ezt a hatást az izotópos vizsgálatok is igazolták. Az első számítások szerint a kristályosítóban két nagy áramlási kör alakul ki, az egyik felfelé, a másik lefelé irányul. 0,6 m/perc-es öntési sebesség esetén a meniszkuszon kialakuló áramlási sebesség relatíve kicsi, 8 cm/s-os, a felületi hullám magasság 2 mm körüli. Mindkét adat a szakirodalom által elfogadott kritikus érték alatt van, ami azt jelenti, hogy az olvadék/öntőpor határfelület nyugodtnak tekinthető, kicsi az esély az öntőpor és salak bekeveredésre. A számított olvadékáramlási képet a 3. ábra mutatja.

4. Szilárd kéreg kihajlás

A szál belsejében uralkodó ferrosztatikus nyomás miatt a már megszilárdult kéreg a támgörgők között kihajlik. Ahogy a szál halad lefelé, ezek a kihajlások „végig hullámszanak” az öntött szál felületén és ezzel nemkívánatos áramlási folyamatokat indukálnak. A kristályosodás vége felé, ahol már viszonylag kicsi az olvadékutánpótlás lehetősége, ez a kihajlás, hullámszás a felsőbb részekből a dendritek közötti szennyezett olvadék beszívását eredményezheti, ezzel drasztikusan romlik a makroszegregációs kép. Az öntőgépek tervezésekor tehát arra törekszenek, hogy a szál kihajlása a lehető legkisebb legyen. A kihajlás nagyságát elsősorban a támgörgők távolsága és a szilárd kéreg vastagsága határozza meg.

Analitikus modell segítségével a kihajlás maximális értékei meghatározhatók. Az öntőgép hossza mentén elhelyezett támgörgők távolsága szekciónként változik, ennek megfelelően egy szekción belül az első görgőpáron lesz a legnagyobb a kihajlás, hiszen abban a szekcióban ott a legkisebb a kéregvastagság. Véges elemes szoftver segítségével egy-egy görgőpárra nézve a kihajlott lemezbuga szakasz alakja is meghatározható, ahogy ezt a 4. ábra szemléletesen mutatja.

3. ábra Olvadékáramlási kép

4. ábra Kihajlás két támgörgő között

5. Primer és szekunder dendritág távolság

A primer dendrites szerkezet minősége egyrészt a dúsulási jellemzőket, másrészt az átalakulási folyamatok során képződő szekunder szerkezetet, annak eloszlását határozza meg. Ha maga az öntési folyamat állandósult állapotúnak is feltételezhető, a kristályosodás bizonyosan nem állandósult állapotú, hiszen a kristályosodást befolyásoló paraméterek, a hőmérsékleti gradiens és a hűlési sebesség folyamatosan változik a kéregvastagság függvényében. Ebből az következne, hogy az állandósult állapotra érvényes $\lambda_1 = K * G^n * T^m$ típusú összefüggések nem alkalmazhatók. Egy kiterjedt vizsgálatsorozat bizonyította, hogy a folyamatos öntés viszonyai között a dendritág távolság gyorsan reagál a kristályosodási paraméterek változására, így az említett összefüggés megbízhatóan használható. Az 5. ábrán példaként bemutatott diagram igazolja, hogy a 0,1-0,2 % C-tartalom között az összetétel lényegesen nem befolyásolja a primer távolságot, illetve az eltérés a mérési eredmények szórásán belül marad.

A szekunder dendritág távolság a szakirodalom szerint elsősorban a helyi megszilárdulási idő, vagyis a likvidusz és szolidusz hőmérsékletek elérése közötti időkülönbség függvénye. A lemezbugán mért és a $\lambda_2 = A * \Theta$ összefüggés alapján számított szekunder távolság értékek jó egyezése igazolja a feltételezés helyességét.

6. Oszlopos-egyenlő tengelyű átmenet pozíciója

A nemzetközi szakirodalom és az üzemi tapasztalatok szerint az öntött szelvény középvonalaiban kialakuló makrodúsulást hatásosan csökkenti a belső un. egyenlőtengelyű dendrites zóna jelenléte. Ha széles ez a belső zóna, akkor az egyenlő tengelyű dendritek között eloszlik a szennyezett olvadék, így a középilonali makrodúsulás csökken. A belső egyenlőtengelyű zóna kialakulása és szélessége elsősorban a kémiai összetétel és a kristályosodási paraméterek függvénye, de az üzemi paraméterek és pl. csíráképződés lehetősége is meghatározó jelentőségű lehet. A kérdéskör komplexitása miatt ezidáig nem publikáltak olyan eljárást, mellyel az oszlopos-egyenlőtengelyű kristályosodás átmenete meghatározható lenne. Az elmúlt időszakban ipari kísérletekre alapozva olyan összefüggérendszer definiáltunk, mellyel az egyenlőtengelyű zóna szélessége a dunaiújvárosi öntőgépre vonatkozóan becsülhető.

A számítási módszer [3] lényege, hogy a 6. ábrán látható nomogram segítségével adott karbon- és kéntartalom esetén definiálható egy „küszöb hőmérsékleti gradiens”, melyhez az egyenlőtengelyű kristályosodás megindulása köthető. Amennyiben az éppen kristályosodó zónában uralkodó hőmérsékleti gradiens eléri ezt a határértéket, akkor az oszlopos dendritek helyett rendezetlen irányú egyenlőtengelyű dendritek képződése valószínűsíthető.

7. Térfogatváltozás a hűlés és kristályosodás miatt

Az öntött szál hűlése és a kristályosodás is fajtérfogat változással jár. Mivel a szál belsejében olvadék van, így az a térfogatkülönbséget ki tudja tölteni. Más a helyzet a kristályosodás vége felé, amikor az olvadék már nem áramolhat szabadon, ilyenkor nemkívánatos áramlások jönnek létre, mely a makroszegregáció növekedéséhez vezet [4]. Többféle számítási, becslési eljárás is van, melyek tesztelése, elemzése jelenleg is folyik. A 12. ábra azt a módszert mutatja, mely a támgörgők helyzetéből adódó un. külső térfogatváltozási kényszer, valamint a hűlés és kristályosodás okozta belső térfogatváltozás egyensúlyát vizsgálja.

Megjegyzendő, hogy a kristályosodás befejező szakaszában kialakuló áramlásokat és ezen keresztül a makroszegregációt is nagyban befolyásolja a már említett támgörgők közötti kihajlás, megbízható következtetések csak a térfogatváltozás és kihajlás együttes figyelembe vételével vonhatók le.

5. ábra Primer távolság számított és mért értékei

6. ábra Nomogram a CET pozíció meghatározásához

8. Összefoglalás

A dolgozat áttekintést ad azon technológiai részfolyamatok matematikai modellezési lehetőségeiről, melyek a terméktulajdonságok szempontjából kiemelkedő jelentőséggel bírnak. A felsorolásokból kitűnik, hogy a lemezbugák megkövetelt felületi hibamentessége, repedésmentessége, homogén belső szerkezete, alakhűsége stb. csak a részfolyamatok kézbentartásával, tudatos irányításával garantálható. Az dolgozatban említett részletek kérdések mindegyike meghatározó lehet a lemezbuga terméktulajdonságaira vonatkozóan, de a helyzetet tovább bonyolítja, hogy keresztthatások is előfordulnak. Erre példaként az egyik legfontosabb terméktulajdonság, a középvonali makrodúsulás erőssége említhető, mely első közelítésben meghatározó módon függ a likvidusz és szolidusz felületek elhelyezkedésétől, vagyis az olvadéktócsa alakjától, a 3. ábrán látható olvadékáramlási képtől, a 4. ábrán bemutatott kihajlási jelenségtől, az egyenlőtengelyű zóna lététől és kiterjedésétől (6. ábra), valamint a térfogatváltozási kényszerek okozta áramlásoktól.

Hivatkozások:

- [1] J. Miettinen, H. Kytönen, S. Louhenkilpi, J. Laine, Proc. of 12th IAS Steelmaking Seminar, Buenos Aires 1999, pp. 488-497
- [2] M. Réger, B. Verő, H. Kytönen, S. Louhenkilpi: Proc. of. 4th European Continuous Casting Conference, Oct. 2002, Birmingham, pp. 969-978
- [3] M. Réger et al.: Proc. Of the Seminar EUROTHERM 69, Heat and Mass Transfer in Solid-Liquid Phase Change Processes, June 25-25, 2003 Ljubljana, Slovenia pp. 171-179
- [4] W. R.Trving, A. Perkins, M. G. Brooks, Ironmaking and Steelmaking, 1984, Vol. 11, No. 3, pp. 152-162

dr. Réger Mihály

Budapesti Műszaki Főiskola Bánki Donát Gépészmérnöki Kar
Anyag- és Alakítástechnológiai Tanszék, 1081 Budapest Népszínház u. 8.
Telefon, fax 3141-438,333-6761,
e-mail: reger.mihaly@bmf.bgk.hu