FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA XIX.

Kolozsvár, 2014. március 20–21.

MUSHY SZERKEZET PERMEABILITÁSÁNAK SZÁMÍTÁSA

PERMEABILITY CALCULATION IN THE MUSH

RÉGER Mihály

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 1034 Budapest,
Bécsi út 96/b, Telefon / Fax: +36-1-6665605, reger.mihaly@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

A complex mathematical model characterizing the centerline segregation level in the mid region of continuously cast slabs was developed. The basic heat transfer and solidification model connected to the semi-empirical liquid feeding model gives the possibility to estimate the centerline segregation parameters of slab cast under industrial circumstances. Solid shell deformation changes the volume of the space available for the liquid inside the slab and hereby also changes the conditions of liquid supply. The liquid flow in the mushy area of the strand is impeded by the network of solid dendrites modifying the permeability according to Carman-Kozeny equation, and hence ferrostatic pressure decreases (Darcy law) and liquid supply becomes uncertain. The reduction itself and the reduction rate of ferrostatic pressure play a key role in porosity formation.

Keywords: permeability, pressure drop, porosity, mushy

Összefoglalás

Az acélok folyamatos öntése során a középvonali dúsulás kialakulása elsősorban a mushy szakaszon az olvadék áramlásával hozható összefüggésbe. A középvonali dúsulás elkerülhető, ha az olvadék nem mozdul el a vele egyensúlyt tartó szilárd fázis közeléből. Ipari öntési esetekben az öntés közben kialakuló térfogatkülönbségek miatt az olvadék áramlik a szál belsejében, az áramlás a ferrosztatikus nyomás hatására jön létre. A mushy tartományban a szilárd dendritvázak akadályozzák az olvadék áramlását, melynek eredményeként a ferrosztatikus nyomás csökken. A cikk a mushy tartományban kialakuló ferrosztatikus nyomás csökkenését és ennek következményeit elemzi a Darcy törvény és a mushy tartomány permeabilitása (Carman-Kozeny összefüggés) alapján.

Kulcsszavak: permeabilitás, nyomáscsökkenés, porozitás, mushy

1. Bevezetés

A folyamatosan öntött acéltermékek kristályosodását zsugorodás és egyéb okokból létrejövő térfogatváltozások kísérik. A térfogatváltozások kompenzálására a támgörgők résmérete a meniszkusz szinttől való távolság függvényében csökken, ennek elsősorban a kristályosodás utolsó harmadában van jelentősége, amikor a szál középvonalában már kétfázisú mushy állapot (mushy szakasz) van. A térfogatváltozás és a résbeállítás nem megfelelő összhangja esetén a szál belsejében az olvadék a mushy szakaszban áramlásra kényszerül. Ha a térfogatváltozás kompenzálására nem elegendő az olvadék utánpótlás, akkor folytonossági hiány, belső porozitás alakul ki, általában makrodúsulással együtt, ez a

középvonali dúsulás. A szükséges olvadék utánpótlást a ferrosztatikus nyomás hatására kialakuló olvadékáramlás biztosítja. Az öntött szál mushy tartományában az olvadék mozgását a szilárd dendritvázakkal átszőtt szerkezet gátolja, melynek eredményeként a ferrosztatikus nyomás lecsökken, így az olvadék utánpótlás bizonytalanra válik. Az olvadékáramlást fenntartó ferrosztatikus nyomás csökkenésének mértéke és üteme kulcsszerepet játszik a porozitás kialakulásában. A kérdéskör vizsgálatához a szál belsejében kialakuló térfogati viszonyok ismerete szükséges, ez a Liquid Motion Intensity (LMI) modell segítségével meghatározható [1,2]. Az LMI modell középvonali dúsulás becslésére való alkalmasságát a korábbi kutatások bizonyították [3,4].

2. A ferrosztatikus nyomás csökkenése a mushy tartományban

A mushy tartomány dendritközi csatornáiban kialakuló ferrosztatikus nyomás csökkenése a Darcy törvény alapján becsülhető.

$$Q = \frac{-KA}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

ahol Q a térfogatáram (m^3/s), A a keresztmetszet (m^2), ΔP a nyomáskülönbség (Pa), μ az olvadék viszkozitása (Pas), L a vizsgált anyagrész hossza (m), K a permeabilitás (m^2).

A mushy-ban kialakuló nyomáscsökkenés meghatározásához ismerni kell a szál adott keresztmetszetében az olvadék térfogatáramát. A mushy-n keresztül zajló térfogatáram az öntött szálban az olvadék számára rendelkezésre álló térfogat nagyságától függ, vagyis a kristályosodási és szilárd állapotú zsugorodás (összetétel, hűtési viszonyok) és az öntött szálra ért deformációs hatások (támgörgő beállítás és excentricitás, kihajlás) figyelembe vétele szükséges. A térfogatáram mushy szakaszra vonatkozó számítása a korábban publikált Liquid Motion Intensity (LMI) modell alkalmazásával történik [1-4].

3. A kétfázisú (mushy) zóna permeabilitása

Az izotróp porózus közeg permeabilitásának leírására általánosságban a Kozeny-Carman összefüggést szokás használni [5].

$$K = \frac{1}{k S_V} \frac{g_L^3}{(1 - g_L)^2} \quad (2)$$

ahol k konstans, S_V a felület nagysága a porózus közeg egységnyi térfogatában (m^2), g_L az olvadék aránya. A k Kozeny konstans értéke a kísérletek szerint 5. Az ekvivalens kristályosodás jó közelítéssel izotróp porózus közegnek tekinthető, így permeabilitás a fenti összefüggéssel becsülhető.

A nem izotróp interdendrites csatornában történő áramlás (oszlopos kristályosodás) speciális esetére érvényes permeabilitás meghatározására számos kísérlet történt, melyek eredményeként az egyes szerzők empirikus összefüggéseket állítottak fel. A számítások során figyelembe veszik a szerkezetet jellemző dendritág távolságot (primer, szekunder), az olvadék arányát, illetve oszlopos kristályosodás esetén az olvadékáramlás irányát a primer szerkezethez viszonyítva (primer dendritágakkal párhuzamos, illetve azokra merőleges irányú áramlás).

A matematikai modellek és kísérletek alapján felállított empirikus modellek a nagy olvadékarány tartományban kevésbé megbízható eredményt szolgáltatnak. A mushy

tartományban jellegzetesen 0,6 és 0 között változik az olvadékarány, ebben az intervallumban a permeabilitás becslésére Bhat et al. [6] alábbi összefüggései vettük figyelembe:

$$K_p = 3.75 \cdot 10^{-4} d_1^2 g_L^2 \quad (g_L \leq 0,65) \quad (3)$$

$$K_N = 1.09 \cdot 10^{-3} d_1^2 g_L^{3,32} \quad (g_L \leq 0,65) \quad (4)$$

ahol K_p a primer dendritek tengelyével párhuzamosan irányban értelmezett permeabilitás (m^2), K_N a primer dendritek növekedésére merőleges irányban a permeabilitás (m^2), d_1 a primer dendritág távolság (m).

4. Nyomásesési és porozitási függvény

A térfogatáram, a permeabilitás, a geometriai és mikroszerkezeti paraméterek ismeretében a mushy szakaszban kialakuló ferrosztatikus nyomásesés becsülhető. Az eredmények magyarázatához tekintsük az 1. ábra sematikus vázlatát. A diagram az öntött szál középvezonáiban kialakuló nyomásviszonyokat mutatja a meniszkusz szinttől számított távolság függvényében. A két függőleges vonal jelzi a mushy szakasz kezdetét ill. végét. A pontvonal jelzi a szálban kialakuló ferrosztatikus nyomást, mely az aktuális pozíció és a meniszkusz szint közötti magasságkülönbség függvénye. A vékony vonal a mushy-ban kialakuló nyomásesést jellemzi, mely a korábban elmondottak szerint csak a mushy szakaszban jelentős. A vastag szaggatott vonal jelzi a ferrosztatikus nyomás és a nyomásesés eredőjét, vagyis a szál középvezonáiban az olvadékban kialakuló nyomást.

1. ábra Nyomásviszonyok alakulása az öntött szál középvezonáiban

A mushy olvadék akadályozott áramlása eredményeképpen – az öntési paraméterek és szerkezeti jellemzők függvényében – a szál középvezonáiban a mushy olvadék ferrosztatikus nyomása drasztikusan csökkenhet, és elérheti a zero értéket is. Nevezzük ezt a meniszkusz szinttől számított távolságot Zero Liquid Supply (ZLS) értéknek. Az 1. ábra sematikus diagramja ilyen esetet mutat be. A mushy tartományt a ZLS pont két részre osztja. A ZLS-től

a meniszkusz irányába eső tartományban a ferrosztatikus nyomás lehetővé teszi az olvadék utánpótlás biztosítását. Amint a ferrosztatikus nyomás eléri a zérus értéket, megszűnik az a nyomás, mely az olvadékot a zsugorodás és deformáció miatt létrejövő térfogat kitöltésére kényszeríti, vagyis ebben a tartományban az olvadék utánpótlása nem feltétlenül biztosított. A kristályosodás során képződő üregek szívóhatást gyakorolhatnak az olvadékra, de ennek mértéke és határfoka a szilárd dendritvázakkal tagolt üregrendszerben bizonytalan. A jelen megközelítésben azt feltételeztük, hogy a ZLS pont elérése után lényegében nincs lehetőség az olvadék áramlására, vagyis ezt követően a zsugorodás és a deformáció olvadékkal ki nem töltött üregeket, azaz porozitást eredményez.

Az LMI modell alkalmazásával lehetőség nyílik a ZLS pont és a mushy tartomány vége közötti tartományban az olvadékkal nem kompenzált térfogatrész, vagyis a várható porozitási érték becslésére.

5. Összefoglalás

A folyamatosan öntött acél lemezbugák középvonali dúsulásának csökkentése az acélösszetétel, öntési technológia és az öntőgép beállításának összhangját igényli, különösen a kristályosodás utolsó szakaszában. A középvonali dúsulás elkerülhető, ha az olvadék nem mozdul el a vele egyensúlyt tartó szilárd fázis közeléből, vagyis ha a Q térfogatáram közel zérus a mushy szakaszon. A gyakorlatban az olvadék a térfogatkülönbségek miatt áramlik a szál belsejében, ennek az áramlásnak a ferrosztatikus nyomás a legfontosabb hajtóereje. A mushy szakaszon belül kialakuló nyomásesés meghatározására kidolgozott módszer és az LMI modell alapján az alábbi két lényeges kérdés válaszolható meg:

- adott acélösszetétel, adott öntési technológia és adott öntőgép beállítás mellett mekkora olvadék térfogatáram alakul ki a mushy szakaszon,
- a létrejövő olvadék térfogatáram és az ebből adódó ferrosztatikus nyomásesés milyen mértékű porozitás kialakulását valószínűsíti.

A modell alkalmazása lehetőséget ad az egyes öntési esetek belső minőség szerinti komplex értékelésére, vagyis az acélösszetétel, az öntési technológia és az öntőgép beállítás összhangjának megítélésére, értékelésére.

Köszönetnyilvánítás

A kutatási programot az EU Research Fund for Coal and Steel a Defect Free Casting (Deffree) című projekt (RFSR-CT-2008-00007) keretében támogatta. A tevékenység egy része a European Union, European Social Fund TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 pályázatban valósult meg.

Irodalom

- [1] M. Reger M, B. Vero, Zs. Csepeli, Z. Szabo, R. Jozsa and T. Kelemen: *MATER SCI FORUM*, **729**(2013), 175.
- [2] M. Reger, H. Kytönen, B. Vero and A. Szelig: *MATER SCI FORUM*, **649**(2010), 461.
- [3] DEFFREE - Integrated models for defect free casting, Final Report, RFSR-CT-2008-00007, 2012
- [4] M. Reger, H. Kytönen, B. Verő and A. Szelig: *MATER SCI FORUM*, **589**(2008), 43.
- [5] G.H. Geiger and D.R. Poirier: *Transport Phenomena in Metallurgy*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, (1973), 92.
- [6] M.S. Bhat, D.R. Poirier, and J.C. Heinrich: *Metall. Mater. Trans. B*, **26B**(1995), 1049.