

Válasz

dr. Károly Gyula az MTA doktora részére a

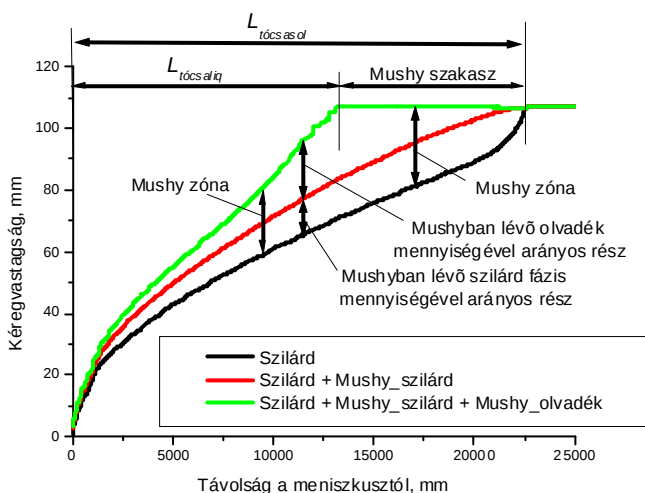
„Folyamatosan öntött lemezbugák középvonali dúsulása és következményei”

című akadémiai doktori értekezésről írt bírálatára

Köszönöm dr. Károly Gyulának a doktori értekezés alapos értékelését. Az opponensi véleményben megfogalmazott kérdésekre és felvetésekre a válaszaim a következők:

(1) Kérdésem: az $L_{t\acute{o}csaliq}$ hová esik a meniszkusz szintjétől, s mivel magyarázható, hogy a mushy zónában a mushy szakasznak nevezett pontig az oszlopos kristályosodás folytatódása ellenére nő a mushyban az olvadék aránya?

Az öntött szálon belül a középvonali dúsulást okozó folyamatok leginkább a mushy állapottal jellemezhető – azaz szilárd és olvadék fázist is tartalmazó – tartományokban működnek. Mushy állapot előfordulása szempontjából az öntött szálat két alapvetően különböző tartományra osztottam, melynek értelmezéséhez tekintsük az 1. ábrát. A diagram a megszilárdult kéreg (fekete vonal), valamint a megszilárdult kéreg és a mushy tartomány együttes vastagságát, azaz a likviduszra számított kéregvastagságot (zöld vonal) ábrázolja a meniszkusz szinttől számított távolság függvényében egy konkrét öntési esetre nézve (a lemezbuga félvastagsága 107 mm,). A két görbe között az öntési irányra merőleges irányban (ez alapvetően megegyezik a dendritek növekedés irányával) adódó különbség jellemzi a mushy tartomány vastagságát, vagyis a mushy zónát.



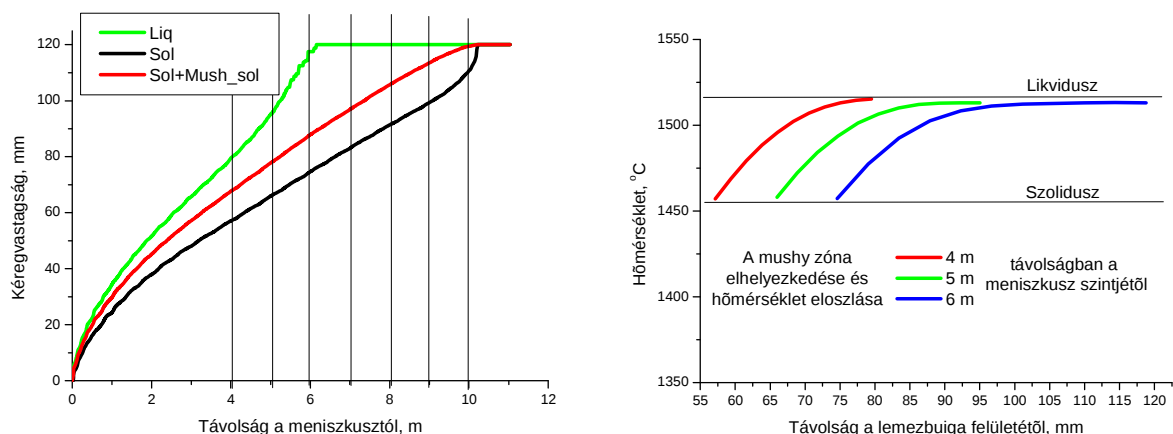
1. ábra Vázlat a mushy zóna és mushy szakasz magyarázatához

A meniszkusz szinttől indulva mushy zóna vastagsága a szokásos öntési körülmények között egy darabig növekszik, majd – amikor a két oldalról növekedő zónák összeérnek – a vastagsága csökkenni kezd, mely egészen a dermedés befejeződéséig tart. A szál középvonalaiban az $L_{t\acute{o}csaliq}$ meniszkusz szinttől számított távolságig az olvadék hőmérséklete meghaladja a likvidusz

hőmérsékletet, az $L_{t\acute{o}csaliq}$ és az $L_{t\acute{o}csasol}$ között viszont a középvezonban a hőmérséklet a likvidusz és a szolidusz közé esik. Ez utóbbi tartományt neveztem el a könnyebb kezelhetőség érdekében „mushy szakasz”-nak. A mushy szakasz tehát öntési irányban, a mushy zóna pedig arra merőlegesen értelmezhető. Az $L_{t\acute{o}csaliq}$ tehát a meniszkusz szintje és a mushy szakasz kezdete közötti távolság.

A mushy zónán belül az olvadék és szilárd fázis arányával az értekezés A1 melléklete foglalkozik. Az ott megfogalmazott módon a mushy zónában kialakuló hőmérsékletmezőből közel egyensúlyi viszonyok feltételezésével az egymással egyensúlyt tartó olvadék és szilárd fázis mennyisége meghatározható, vagyis az A1.4 összefüggés szerint a mushy olvadék arány a meniszkusztól számított távolság függvényében ismert. Az 1. ábrán a piros vonallal jelzett függvény – mely a mushy-ban kialakult olvadék/szilárd fázis arányból adódik – két részre osztja a mushy zónát. A fekete és piros vonal közötti tartomány a mushy szilárd fázis arányát jellemzi és – virtuálisan – a mushyban lévő szilárd fázis „vastagságaként” értelmezhető. Hasonló módon, de a mushy olvadék mennyiségeként vehető tekintetbe a piros és zöld vonal közötti távolság (összhangban az értekezés A1 mellékletének A2-es ábrájával).

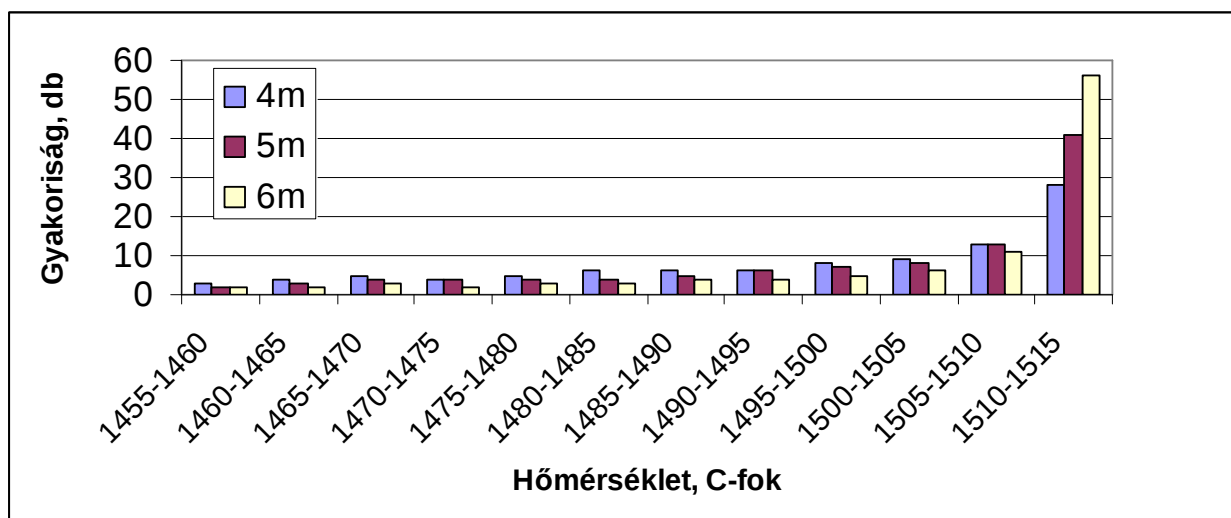
Az $L_{t\acute{o}csaliq}$ távolságon belül a mushy zóna a lemezbugán belül a középvezon irányába vándorol és egyre távolabb kerül az intenzíven hűtött lemezbuga felülettől. Ennek következtében a zónán belüli hőmérséklet eloszlás is megváltozik, a változás jellegének bemutatására tekintünk a 2. ábra diagramjait (Duneferr-es öntési eset).



2. ábra A mushy zóna pozíciójának és a zóna hőmérsékleteloszlásának változása a kristályosodás előre haladása során

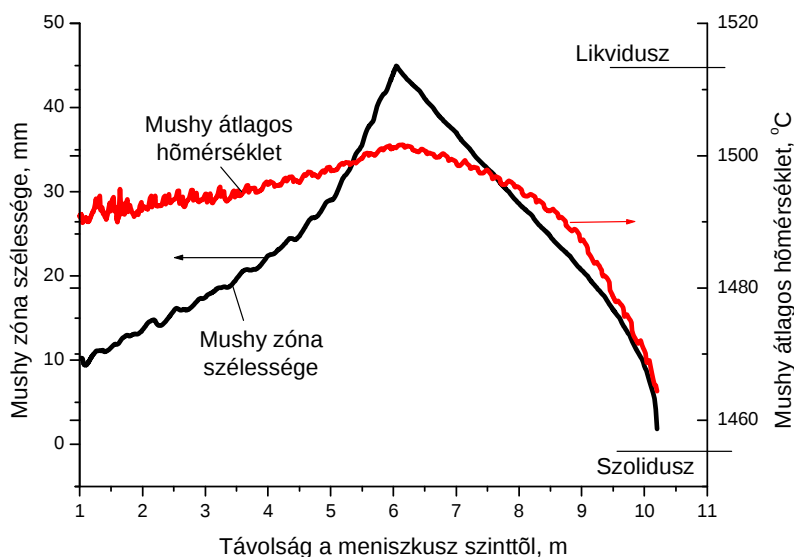
Az ábra bal oldali diagramja mutatja a konkrét öntési esetben a kéregvastagsági adatokat. Ha megvizsgáljuk a mushy zóna helyzetét és hőmérséklet eloszlását az $L_{t\acute{o}csaliq}$ távolságon belül 4, 5, illetve 6 m-re a meniszkusz szintjétől, akkor a jobb oldali diagramban foglalt eredményeket kapjuk. Az eltérő színű görbeszakaszok a lemezbuga kristályosodásának előrehaladásával kialakult mushy zóna helyzetét (lemezbuga felülettől mért távolságot), illetve a zónában kialakult hőmérséklet eloszlást reprezentálják. A közel egyensúlyi helyzetnek megfelelően a zóna két széle a likvidusz, illetve a szolidusz hőmérsékleten van (az $L_{t\acute{o}csaliq}$ távolságon belül), e két hőmérséklethez tartozó pozíció pedig egyre távolodik egymástól, vagyis a mushy zóna szélessége növekszik. A kristályosodás előre haladásával (vagyis a lemezbuga felülettől távolodva) a hűtés okozta hőelvonási intenzitás a mushy-ban csökken. A látens hő felszabadulás és a korlátozott hőelvonás következtében a mushy-ban kialakult hőmérséklet eloszlási függvény alakja is megváltozik, és a mushy tartomány egyre nagyobb része esik a likvidusz hőmérséklet

közelébe. Ezt a jelenséget a mushy zóna hőmérséklet gyakorisági függvénye is igazolja (3. ábra). A diagram a mushy zóna 100 egyenlő részre osztásából adódó diszkrét hőmérsékleti adatok elemzésével készült.



3. ábra A mushy-ra jellemző hőmérséklet gyakorisági függvényei a meniszkusztól számított 4, 5 és 6 m távolságban

A mushy zóna hőmérséklet eloszlása tehát az $L_{t\acute{o}csaliq}$ távolság eléréséig a likvidusz hőmérséklet irányába tolódik, ennek következménye a mushy olvadákarány növekedése. A fentieknek megfelelően a mushy átlagos hőmérséklete is növekszik ebben a tartományban a 4. ábrának megfelelő módon.



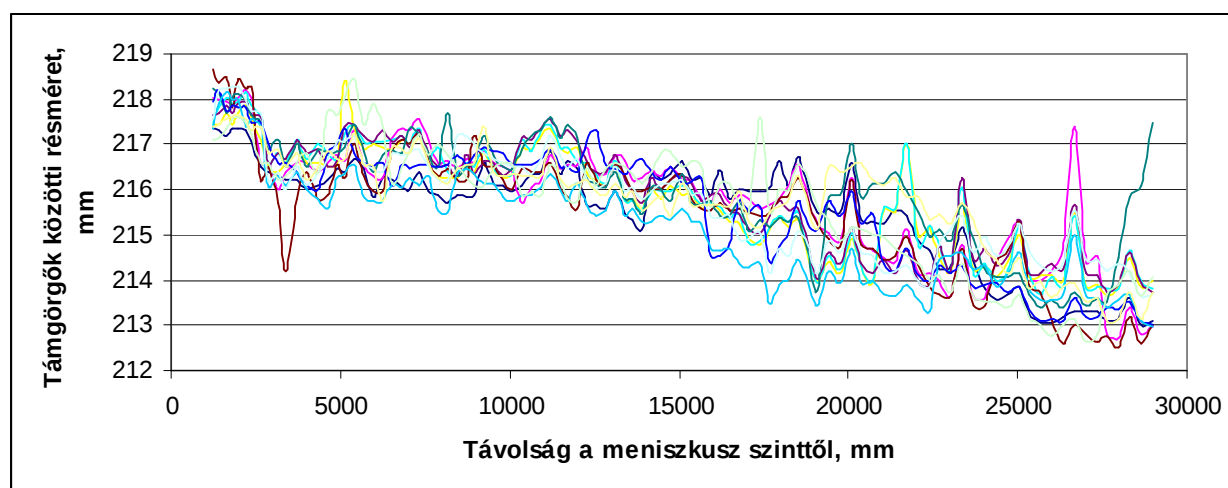
4. ábra A mushy zóna szélességének és átlagos hőmérsékletnek változása a 2. ábrának megfelelő öntési esetben

(2) A támgörgők résbeállítása igen fontos az adott acélminőségre előírt technológia megválasztásakor, talán jobb lett volna, ha ennek vizsgálata Dunaferres körülmények között is

megtörténik (bár ehhez olyan adatbázisra van szükség, amihez a finn Rautaruuki-nál a Jelölt partnerkutatóként könnyebben hozzájuthatott).

A támgörgők helyzetéből adódó deformációs hatások következményeinek megítéléséhez nélkülözhetetlen az adott öntés során a támgörgők valós pozíciójának ismerete. A méréshez „roll checker” berendezés szükséges, mely a résméretet a támgörgő párok mechanikailag terhelt állapotát előidézve határozza meg. Ilyen ellenőrzésre a Rautaruuki-nál rendszeresen sor kerül, a modell alapelveinek kidolgozása során ezeket az adatokat használtam.

Az értekezés 38. oldalán a 3.5 ábra egy konkrét öntési esetre (Rautaruuki Oy) vonatkozóan bemutatja az előírt és „roll checker”-rel mért résméret adatokat, illetve azok különbözőségét. A mérési sorozatok eredményeinek összehasonlítása azt bizonyítja, hogy a valós résméret eloszlás az öntőgép használatának függvényében is erősen változik. Az 5. ábra példaként 12 azonos acélminőségű adag öntése során a megvalósult résméret eloszlást mutatja be. A diagram alapján egyértelmű, hogy ha a lemezbugát érő deformációs hatások figyelembe vétele a cél, akkor minden egyes öntési eset csakis az éppen aktuális összetétel, öntési paraméter együttes és résméret eloszlás összefüggés rendszerében értékelhető, hiszen mind a 12 eset más-más „résbeállítás” „alkalmazásával” lett leöntve. Az értekezés 3. fejezetében ismertetett modell 38 darab ilyen öntési eset egyedi részletes elemzésén nyugszik. Mivel az ISD Dunaferri Dunai Vasmű Zrt.-ben nincs „roll checker” mérési lehetőség, így a modell kidolgozása során csak külföldi adatokra támaszkodhattam.



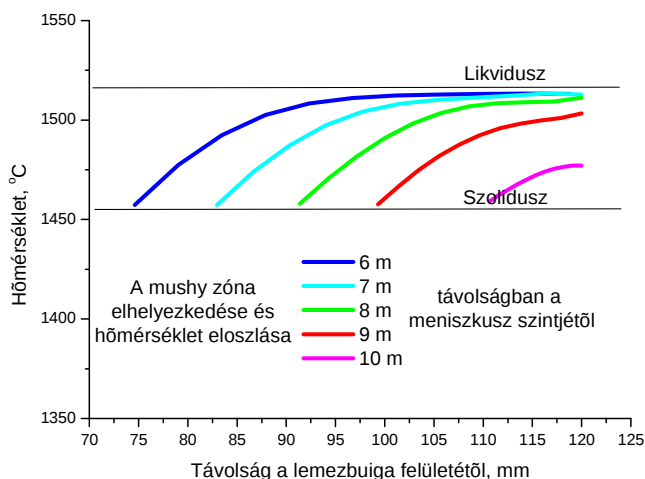
5. ábra A támgörgő résméret alakulása a Rautaruuki Oy egyik folyamatos lemezbuga öntőgépén (12 mérés)

(3) Mivel magyarázható, hogy az olvadék dúsulása a mushy szakasznak nevezett pontban ugrásszerűen változik (4.1 ill. a 4.2 ábra)?

A vonatkozó 4.1 és 4.2 ábra finn öntőgép és öntési paraméter adatok felhasználásával készült, de teljesen hasonló koncentráció változás adódik a Dunaferri technológia matematikai modellezése során (csak nem 13, hanem 5-7 méter környékén). A 4.1 a./ és 4.2 a./ ábrákon feltüntetett mushy zóna adatok alapján is látszik, hogy a mushy olvadék koncentrációjának változása a meniszkusz szintől számított $L_{t\acute{o}csaliq}$ távolságban, azaz a mushy szakaszba való belépésnél kezdődik.

A kérdéssel kapcsolatosan tehát tekinthetjük a Dunaferri-es öntési esetet bemutató 2. ábra diagramján a meniszkusz szintől számított kb. 6 és 10 m közé eső tartományt is. A két oldalról növekvő mushy zónák a szálnak ebben a szakaszában már összeérnek, vagyis a mushy

szakaszban vagyunk (1. ábra). A mushy zóna két szélének helyzetét és a zónában kialakuló hőmérséklet eloszlást mutatja be a 6. ábra. A lemezbuga középvonalában a hőmérséklet a likviduszról lecsökken a szoliduszra, eközben a mushy zóna másik szélének hőmérséklete változatlan (szolidusz hőmérsékletű). A mushy zóna átlagos hőmérséklete is a szoliduszra csökken (4. ábra, a meniszkusz szinttől számított 6 és 10 m közötti rész).



6. ábra A mushy zóna pozíciójának és a zóna hőmérsékleteloszlásának változása a mushy szakaszban

A mushy zóna hőmérsékletváltozása, hőmérsékletváltozási tendenciája tehát alapvetően eltér az $L_{t\acute{o}csaliq}$ és a mushy szakaszon, és ez okozza a lényegi változást az olvadék dúsulási ütemében a mushy szakasz elérésétől kezdve. A mushy zóna átlaghőmérsékletének lassú emelkedését hűlés váltja fel a mushy szakaszon, és a mushy olvadéktartalmának növekedését is csökkenés követi. Mindeközben a teljes mushy zóna kiterjedése, szélessége is kisebb lesz. Ennek eredményeként a mushy szakaszon a mushy zónában lévő – egyébként csökkenő mennyiségű – olvadék dúsulása fokozódik. A 4.1 ábrán feltüntetett dúsulási adatok meghatározásához az adott metszetben lévő mushy zónát (pl. 5. ábra zöld görbéjéhez tartozót) véges méretű szakaszokra bontottam, és a hőmérsékletet egy-egy szakaszon belül állandónak tételeztem fel. Az adott hőmérséklethez tartozó szilárd/olvadék fázisarány, illetve az egyes fázisok koncentrációja a többkomponensű közel egyensúlyi fázisdiagramból számítható (IDS, hűlési sebesség 1 °C/s). Az mushy zóna egyes szakaszaira adódó mennyiségi és koncentrációs adatokból a mushyban lévő összes olvadék átlagos koncentrációja meghatározható (vagyis pl. a zöld görbével reprezentált, a meniszkusz szinttől adott távolságban lévő mushy zónára).

Mindenképpen megjegyzendő, hogy a 4.1-4.2 ábrákon bemutatott eredmények ideális kristályosodási viszonyok között tekinthetők elfogadhatónak (pl. ha az olvadék nem mozdul el a vele egyensúlyt tartó szilárd fázis szomszédságából, tökéletes a diffúzió, stb.). Reális körülmények között mindenképpen történik áramlás, keveredés, mely a koncentrációban tapasztalható éles tendencia-váltás helyett fokozatos átmenetet eredményez. Ugyanakkor a mushyban kialakult fent elemzett hőmérséklet változás okán a mushy olvadék koncentrációjának 4.1 és 4.2 ábrák szerinti csökkenő, majd növekvő tendenciája megítélésem szerint reálisan feltételezhető.

A bíráló tézisekre vonatkozó észrevételeivel kapcsolatosan az alábbiak megjegyzését tartom fontosnak:

Bár az 1. tézispont alapvetően definíció jellegű, e jellemzőnek a tézispontban megadott definíciója és számítási eljárása megítélésem szerint újszerű megközelítést tükröz, mely megközelítés egyben az LMI modell elméleti megalapozását hivatott szolgálni.

Az 5. tézisponttal kapcsolatos felvetésre – nevezetesen a mushy szakasz definiálására vonatkozóan – a bíráló (1)-es kérdése kapcsán válaszoltam.

Egyetértek azzal, hogy a 7., 8. és 9. tézispont üzemviteli szempontból tekinthető fontosnak. A 7. tézispontban foglaltak újszerűségét abban látom, hogy az LMI modell alkalmazásával lehetőség nyílt a korábban figyelembe nem vehető technológiai és gépészeti paramétereknek a középilonali szegregációt befolyásoló hatásának vizsgálatára (résméret csökkenés, támgörgők beállítási hibája, kopása, excentricitása, a támgörgők közötti kihajlás). Úgy vélem, újszerűnek tekinthető e paraméterek rangsorolása is a középilonali szegregációt fokozó hatásuk alapján (8. tézis), valamint a középilonali szegregáció öntési irányú ingadozásának magyarázatára vonatkozó megállapítást (9. tézis).

A 11. tézispont újszerűségét abban látom, hogy a mangának a karbon diffúzióra kifejtett hatását vizsgáló saját kísérleti munka alapján értékeltem, illetve rangsoroltam a szakirodalomban fellelt modelleket.

Budapest, 2012. február 20.

dr. Réger Mihály