

## Válasz

dr. Dr. Tardy Pál az MTA doktora részére a

„Folyamatosan öntött lemezbugák középvnali dúsulása és következményei”

című akadémiai doktori értekezésről írt bírálatára

Köszönöm dr. Tardy Pálnak a doktori értekezés alapos áttekintését és értékelését. Az opponensi véleményben megfogalmazott kérdésekre és felvetésekre a válaszaim a következők:

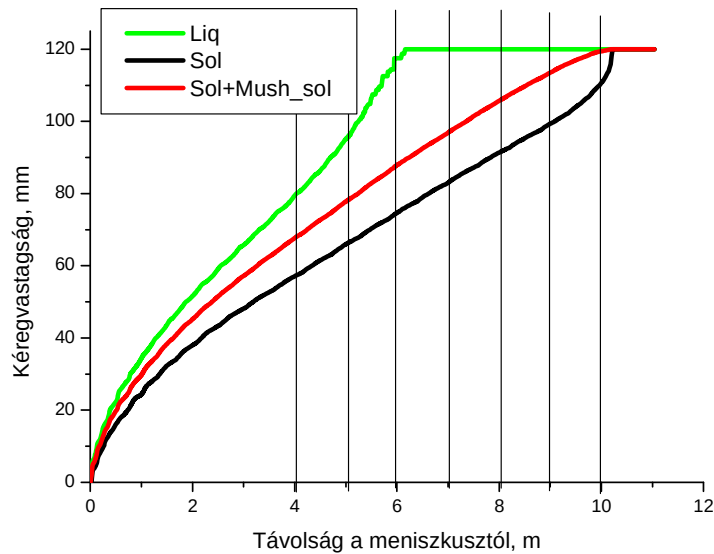
*(1) Mivel magyarázza, hogy a mushy zónában növekszik, majd meredeken csökken az olvadék részaránya a meniszkusztól való távolság függvényében (3.2. ábra)?*

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 középvnalában 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 középvnalban 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.

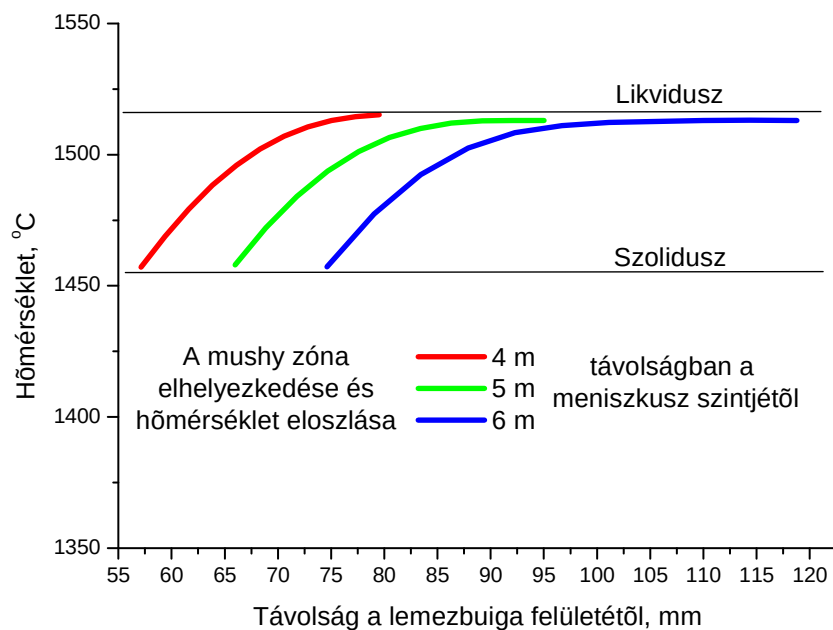
A mushy zónán belül az olvadék és szilárd fázis arányával az értekezés A1 melléklete foglalkozik. Az ott megfogalmazott módon a mushy zónában kialakuló hőmérsékletmezőből közel egyensúlyi viszonyok feltételezésével az egymással egyensúlyt tartó olvadék és szilárd fázis mennyisége meghatározható, vagyis 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 mushyban 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 középvnal irányába vándorol és egyre távolabb kerül az intenzíven hűtött lemezbuga felülettől. Ennek következtében a zónán belüli hőmérséklet eloszlás is megváltozik, a változás jellegének bemutatására tekintsük a 1. ábra diagramját (Duneferr-es öntési eset).

Az ábra egy konkrét öntési esetre nézve mutatja 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 2. ábra diagramjában foglalt eredményeket kapjuk.



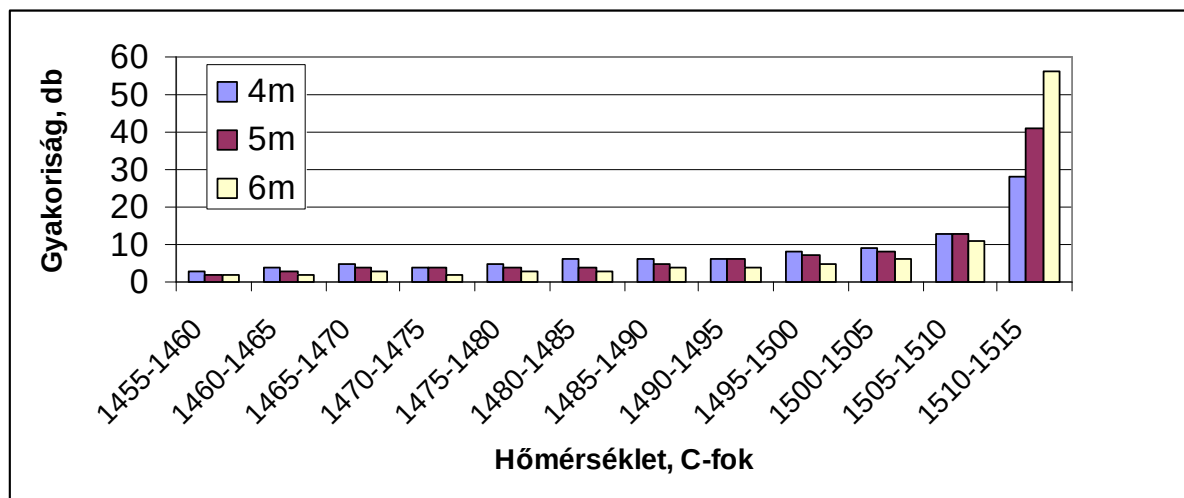
1. ábra A likviduszra és a szoliduszra számított kéregvastagság, ezen belül a mushy olvadék és szilárd fázis tartalmának jellemzése



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

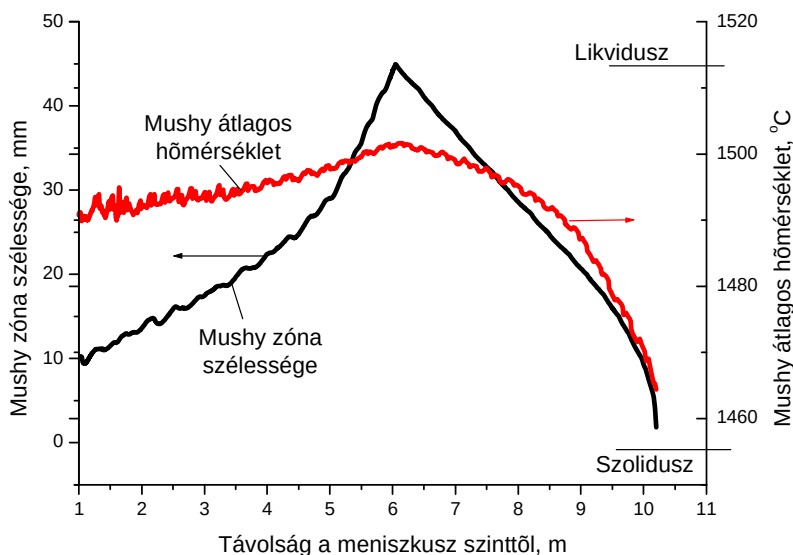
Az eltérő színű görbeszakaszok a lemezbuga kristályosodásának előrehaladása során a mushy zóna helyzetét (lemezbuga felülettől mért távolságot), illetve a zónában kialakult hőmérséklet eloszlást reprezentálják. A közel egyensúlyi helyzetnek megfelelően a zóna két szélé a likvidusz, illetve a szolidusz 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 hőmérsékletének változása a 1. ábrának megfelelő öntési esetben

(2) A finn Rautaruukki Oy acélipari vállalnál gyűjtött adatok elemzése során megjelenik a középvonali szegregációs index elnevezés és annak definíciója; a 3.4. ábrán ugyanakkor középvonali dúsulási indexeket ad meg. Miért kellett egy másik megnevezést bevezetni?

Köszönöm a bíráló észrevételét A két fogalom jelentése ebben a fejezetben azonos, vagyis a középvonali dúsulási index kifejezést – a szóismétlések elkerülése céljából – a középvonali szegregációs index szinonimájaként kezeltem, mely félreértésre adhat okot. A szakmailag pontos kifejezés a középvonali szegregációs index (centerline segregation index). A középvonali dúsulási index egy adott elem tekintetében pl. a középvonalban mérhető és az átlagos érték hányadosaként definiálható, ilyen mérésekre viszont a Rautaruukki üzemében nem került sor a jelen munka keretében. A 3.4 ábrán szereplő mindkét középvonali szegregációs index meghatározása metallográfiai úton, vagyis maratással és képelemzéssel történt, így ez a mérőszám nem ad információt az elemek tényleges, koncentrációban is kifejezhető középvonali feldúsulásáról.

*(3) A 4.1 ábrásor kapcsán rövid magyarázatot kérek arra, mi az oka annak, hogy a meniszkusztól kb. 13 méterre hirtelen megváltozik a különböző elemek koncentrációjának változása a távolság függvényében?*

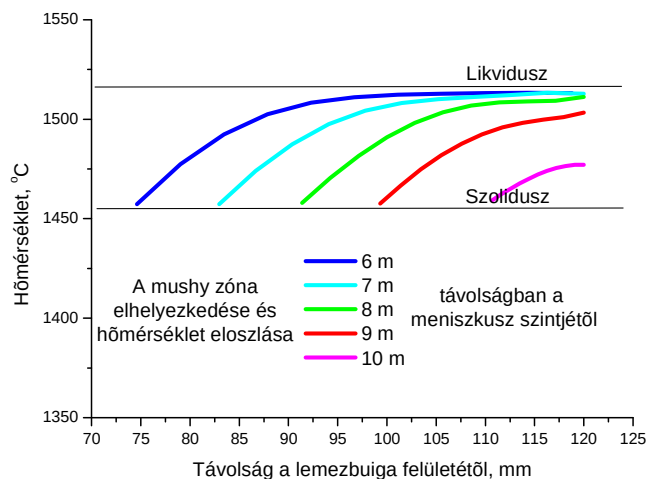
A vonatkozó 4.1 ábra finn öntőgép és öntési paraméter adatok felhasználásával készült, de teljesen hasonló koncentráció változás adódik a Dunafer technológia matematikai modellezése során, csak nem 13, hanem 5-7 méter környékén. A 4.1 a./ ábrán feltüntetett mushy zóna adatok alapján is látszik, hogy a mushy olvadék koncentrációjának változása a meniszkusz szinttől számított  $L_{tőcsaliq}$  távolságban, azaz a mushy szakaszba való belépésnél kezdődik.

A kérdéssel kapcsolatosan tehát tekinthetjük a Dunafer-es öntési esetet bemutató 1. ábra diagramján a meniszkusz szinttől 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. A mushy zóna két szélének helyzetét és a zónában kialakuló hőmérséklet eloszlást mutatja be a 5. 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).

A mushy zóna hőmérsékletváltozása, hőmérsékletváltozási tendenciája tehát alapvetően eltér az  $L_{tőcsaliq}$  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 hőmérsékletre tartozó szilárd/olvadék fázisarány, illetve az egyes fázisok koncentrációja a többkomponensű közel egyensúlyi fázisdiagramból számítható (IDS, hűlési sebesség  $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ). 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 ábrán bemutatott koncentráció 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

tapasztható éles tendencia-váltás helyett fokozatos átmenetet eredményez. Ugyanakkor a mushyban kialakult fent elemzett hőmérséklet változás okán a mushy olvadék koncentrációjának 4.1 ábra szerinti csökkenő, majd növekvő tendenciája reálisan feltételezhető.



5. ábra A mushy zóna pozíciójának és a zóna hőmérsékletoszlásának változása a mushy szakaszban

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

Az 1. és 2. tézispont alapvetően definíció jellegű, ugyanakkor ezen jellemzőknek a tézispontokban megadott definíciója és számítási eljárása megítélésem szerint újszerű megközelítést tükröz, mely megközelítés egyben az LMI modell elméleti megalapozását hivatott szolgálni.

Egyetértek azzal, hogy a 8. és 9. tézispont alkalmazási szempontból tekinthető fontosnak. Véleményem szerint ugyanakkor újszerűnek tekinthető a középilonali szegregáció szempontjából korábban figyelembe nem vehető technológiai és gépészeti paraméterek rangsorolása a középilonali szegregációt fokozó hatásuk alapján (8. tézis), valamint a középilonali szegregáció öntési irányú ingadozásának magyarázatára vonatkozó megállapítás (9. tézis).

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

Budapest, 2012. február 20.

dr. Réger Mihály