

**Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola**

**Hidegen hengerelhető acélok folyamatos öntésénél a
kagylószűkülés befolyásolása hevítést nem biztosító
üstmetallurgiai műveletekkel**

PhD értekezés tézisei

Harsik Béla
okleveles kohómérnök

Tudományos vezető:
Prof. Dr. Károly Gyula
egyetemi tanár



Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Metallurgiai és Öntészeti Intézet

Miskolc

2011

I. Bevezetés, célkitűzés

Folyamatosan emelik a minőségre vonatkozó igényeiket az acélt felhasználó iparágak, többek között emiatt igényel folyamatos fejlesztést az acélgyártási technológia. Sok egyéb mellett az acél összetételének, illetve szennyező-tartalmának mind alacsonyabb szintre csökkentése miatt a dezoxidációnak és kéntelenítésnek is egyre hatékonyabb és gazdaságosabb módjait alkalmazzák. Az egyre alacsonyabb szintre szorított aktívoxigén-tartalom és kénelőírás biztosítása, mind több olyan nemfémes zárvány képződésével jár együtt, amelyek nemcsak az acél zárványtartalmát növelik, hanem az önthetőséget is ronthatják. Az elvárt igen alacsony oxigénszint biztosítására, illetve gazdasági megfontolások miatt dezoxidálásra (elsősorban a hidegen hengerelhető acéloknál) alumíniumot adagolnak – terméke az alumíniumoxid –, a kéntelenítésre pedig (egyebek mellett) kalciumot – eredménye a kalciumsulfid – használnak. A képződött zárványok az acélgyártás-öntés hőmérsékletén gyakran szilárd halmazállapotúak. Ezek az öntés hőmérsékletén szilárd oxidok és szulfidok, illetve más nemfémes szilárd zárványok nemcsak a leöntött acélt szennyeznek, hanem az öntés során – fizikai és ásványképződési törvények miatt – a szűkült keresztmetszetek mentén lerakódásra hajlamosak.

A minőségi acélgyártáshoz szükséges zártöntés széles elterjedése miatt egyre gyakoribbá váltak az öntőszerelvényeken képződött nemfémes zárványokból álló lerakódások okozta öntési gondok. A modern üstmetallurgia már rendelkezik azon technológiai eszközökkel, amikkel a kagylószűkülés megakadályozása lehetséges, de vannak olyan üzemek, ahol ezek az eszközök (ilyenek a hevítési lehetőségek, pl. üstkemence) nem állnak rendelkezésre.

A téma hazai aktualitását az adja, hogy üstmetallurgiai kezelések nélkül a folyamatos öntés összes problémája nem hárítható el. A folyamatos öntéssel együtt, egyidejűleg fejlődő üstmetallurgia fejlődéstörténete során az egyszerűbb, illetve bonyolultabb vákuumtechnikai megoldásokat követően fejlődtek a hevítési eljárások (üstkemence). Vannak viszont üzemek (ilyen az ISD Dunaferr Zrt. is), ahol az üstmetallurgiai fejlesztések terén az injektálásos kezelések voltak a fejlesztés mozgatórugói. Így elmaradt a vákuumozó, illetve az üstkemence telepítése. Ebből adódóan ma a versenyképesség megtartása mellett fontos annak ismerete, hogy az adott technológiai adottságok birtokában hogyan, miképpen lehet például a kagylószűkülések magas arányát csökkenteni.

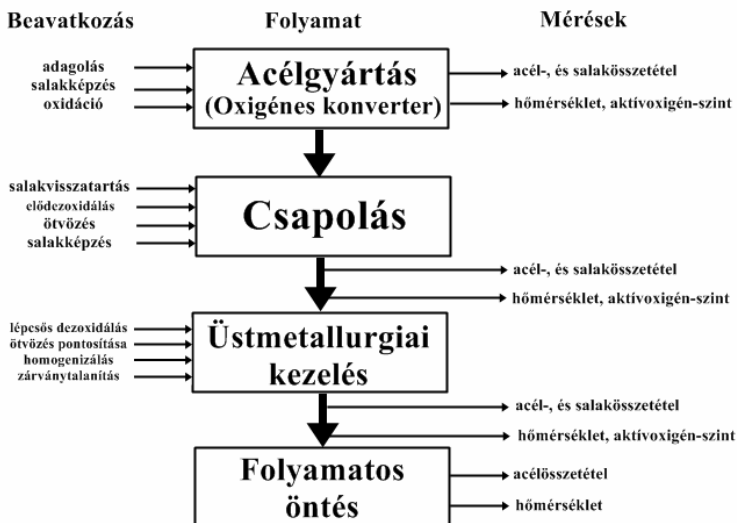
Értekezésemben a hidegen hengerelhető, szilíciumszegény alumíniummal csillapított acélok öntése közbeni, a kagylószűkülésre visszavezethető beavatkozások arányának mérséklését tűztem ki célul, az utólagos hevítés lehetőségével nem rendelkező acélművek esetén, a gyártástechnológia módosítására – tudományos alapon – megtett javaslatokkal. Az ipari gyakorlatból, illetve szakirodalomból ismert eljárások ellenőrzése, applikálása, szükség esetén korrekciója volt a szándékom.

II. Kísérleti körülmények

A vizsgálataim tárgyául választott hidegen hengerelhető, szilíciumszegény alumíniummal csillapított lágyacél-család gyártásánál az előírt <4 ppm aktívoxigén-szintet lépcsős dezoxidálással szilícium nélkül, viszonylag kis mennyiségű mangán (összetételei előírás: 0,15-0,30 %) adagolása mellett, túlnyomórészt alumíniummal érik el. Az alumínium jelentős mennyiségű alumínium-oxidot képez a dezoxidálás során, amely magas olvadáspontja (2050°C) miatt szilárd halmazállapotú. A szilárd zárványok okozta kagylószerűképzésre visszavezethető beavatkozások gyakorisága tette indokoltá a kutatásomat. Ez okból a kagylószerűképzésre visszavezethető öntés közbeni beavatkozások arányának mérséklésére, a szilárd zárványok lerakódásának megakadályozására vonatkozóan végeztem vizsgálataimat.

A szakirodalom tanulmányozása alapján kísérlettervet készítettem, vizsgálataim színhelyeül az ISD Dunaferr Zrt.-t választottam. A dunaújvárosi cég biztosította a kísérleti gyártást, a szükséges kiegészítő laboratóriumi méréseket, lerakódások vizsgálatát pedig a Miskolci Egyetemen végeztem el.

Ahhoz, hogy az önthetőség javítására a szakirodalomból ismert kétféle eljárás (a zárványtartalom csökkentése, illetve a kalciumos zárványmodifikáció) hatékonyságát kísérleti úton megvizsgálhassam, három részből álló kísérletsorozatot terveztem. Első lépésben a jelenleg követett gyártási metódus (**1. ábra**) – bázishelyzet – megismeréséhez szükséges 54 adagból álló mérésorozatot végeztem el. Az adaggyártás során az üzemszerűen mért és gyűjtött adatok mellett további, kiegészítő méréseket kértem.



1. ábra Az acélgártás technológiai lépései és mérései

A kísérletek közben nyert, majd az értékelés során felhasznált paramétereket típusuk és származási időpontjuk alapján azonosítottam, ezért ezeket ennek megfelelően jelöltem (**1. táblázat**).

1. táblázat A paraméterek azonosítására alkalmazott rövidítések

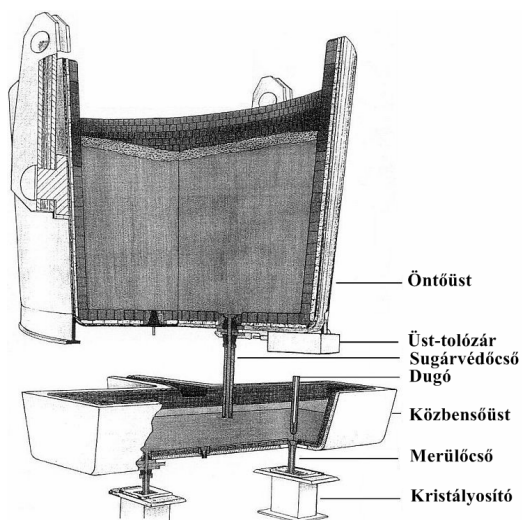
Próbavétel időpontja, típusa	Rövidítés	Mértékegység
Fúvatás után a konverterből származó minta	LD	
Csapolás előtti a konverterből származó minta	LD2	
Csapolás után az üstből vett minta	LDU	
Üstmetallurgiai kezelés elején vett minta	SLE	
Üstmetallurgiai kezelés végén vett minta	SLU	
Öntés közbeni a közbensőüstből vett minta	KÜ	
Öntés közben a kristályosítóból vett végpróba	VP	
Aktívoxigén-tartalom, -változás	$a_O, \Delta a_O$	
Összoxigén-tartalom, -változás	$\Sigma O, \Delta \Sigma O$	ppm
Össznitrogén-tartalom, -változás	$\Sigma N, \Delta \Sigma N$	ppm
Oldottalumínium-tartalom, -változás	$Al_{sol}, \Delta Al_{sol}$	ppm
Oldottkalcium-tartalom, -változás	$Ca_{sol}, \Delta Ca_{sol}$	ppm
Összalumínium, -kalcium	$\Sigma Al, \Sigma Ca$	ppm
Salakösszetevő	FeO, Al_2O_3	%
Hőmérséklet	T	°C
Csapolás közbeni elődeoxidálás	$Al^{elődeox}$	kg
Alumínium adagolás üstmetallurgiai kezelés során	$Al^{üstmet}$	kg

A jelenlegi alapállapotról (első sorozat) kellően nagyszámú adatbázist állítottam fel. Ennek értékelése után állítottam össze a javaslataimat a kagylószükülés arányának mérséklésére szolgáló technológiamódosításokra.

A második sorozat 46 adagjának gyártása során megvizsgáltam a kalciumos zárványmodifikáció hatását.

A harmadik kísérletsorozatnál, az első méréssorozat tanulságai alapján az öntetőséget az acél növelt tisztaságával kívántam javítani. Ennek megfelelően – a javaslataim alapján módosított technológia szerint gyártott – újabb 35 adagból álló méréssorozatot vizsgáltam.

A Dunaújvárosban alkalmazott folyamatos öntés során szekvensekben öntik az acélbrammákat. Egy-egy szekvens a rendelésállomány függvényében általában 4-8 adagból áll. A szekvens folyamán ugyanazon közbensőüsttel (**2. ábra**), a beépített két kagylóval és lehetőleg ugyanazzal a sugárvédőcsővel, illetve két merülőcsővel öntik le az adagokat, ezért különösen fontos a kagylószükülés elkerülése. Az ISD Dunafernnél a kirakódás miatti kagylószükülés az öntő- és közbensőüst kagylóinál, illetve a sugárvédő- és merülőcsőveknél tapasztalható.



2. ábra A dunaujvárosi folyamatos öntés technológiai sémája

Vizsgálati lehetőségeimet korlátozta az a nyilvánvaló tény, hogy a lehetséges szűkülési helyek közül mindössze a merülőcső vizsgálata volt lehetséges, mivel a többi helyen azonnali beavatkozás szükséges, és ekkor oxigénes tisztítással eltávolítják a lerakódásokat. Így a használt merülőcsövek vizsgálatai során nyert eredményekre és az adagok gyártása közben mért, illetve az ezekből számított adatokra alapoztam a következtetéseimet.

III. Kísérleti eredmények

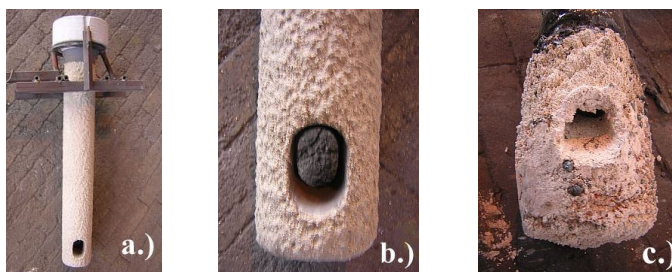
A zárványok mennyiségének és forrásának vizsgálata

Kagylószerűkésre utalásként az öntési lapokon található megjegyzés szolgál, de mivel 4-8 adagból álló szekvensekben öntik le az acélt, ezért a szükülés jelenségét nem lehet külön-külön az egyes adagokra vonatkoztatni, hanem a teljes szekvensre, illetve egy-egy sorozatra kell értelmezni, mint hajlamot. A kiindulási, jelenlegi helyzetet bemutató első sorozat során igen magas arányban (38,9%) tapasztaltam kagylószerűkésre visszavezethető öntés közbeni beavatkozást (**2. táblázat**).

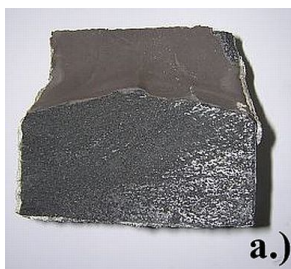
2. táblázat. A bázishelyzetet reprezentáló sorozatnál az öntés közbeni beavatkozások száma, illetve előfordulási aránya

Öntés közbeni beavatkozások	Első sorozat (54 adag)	
Letapadás miatti dugómozgatás	3 adag	5,56 %
Üstkagyló tisztítása oxigénnel	14 adag	25,93 %
Merülőcső tisztítása oxigénnel	4 adag	7,41 %
Összesen	21 adag	38,9 %

Az első sorozat öntésénél használt merülőcsövek (**3-4. ábra**) ásványtani módszerekkel (pordiffrakciós méréssel és elektronmikroszkópos mikroanalízissel) történő vizsgálata során megállapítottam, hogy a lerakódások 90 %-a – a várakozásnak megfelelően – valamilyen oxid (a többi rész acélbezáródás, illetve üreg), túlnyomórészt alumínium-oxid. (**3. táblázat**)



3. ábra Merülőcső kívülről (a – új teljes, b – új vég, c – használt vég)



4. ábra Elemzési minták vételi helyei az elvágott (a – új; b – használt) merülőcsövön

3. táblázat Első sorozat lerakódásainak összetétele*

Mintavétel helye	Mértékegység	Al ₂ O ₃	MgAl-spinell	CaO(Al ₂ O ₃) ₆	CaO(Al ₂ O ₃) ₂	Oxidok összesen
Belső felszín	Térfogat%	69,63%	16,63%	8,33%	1,13%	95,72%
Külső felszín	Térfogat%	64,33%	21,60%	4,57%	0,90%	91,40%
Tapadvány	Terület%	83,85%	-	1,54%	-	85,39%

* fennmaradó rész fémes vagy oxidálódott acélbezáródás, illetve üreg

A talált endogén és exogén eredetű – az acél öntési hőmérsékletén szilárd – zárványok a dezoxidációra, a nem kellően megakadályozott reoxidációra és a nem megfelelő argonozási technológiára vezethetők vissza.

Mivel a lerakódások túlnyomórészt oxidokból álltak, megállapítottam, hogy a zárványok mennyiségére – és így a lerakódások kialakulására – az oxszoxigéntartalomnak az üstmetallurgiai kezelés vége és az öntés között mért változása ($\Delta\Sigma^{SLU-VP}$) van a legnagyobb hatással.

A kalciumos zárványmodifikáció hatásvizsgálata

A szakirodalom által javasolt kalciumos zárványmodifikáció hatását vizsgáltam a második kísérletsorozat során. Ez a módszer bevett technológiaként használatos minden minőségi acélt gyártó üzemben, ezért fontosnak tartottam a lerakódások képződésére gyakorolt hatásának vizsgálatát. Az aktuálisan alkalmazott technológia szerint gyártott 46 adagnál, a kalciumos kezelést nem kapottakhoz viszonyítva a lerakódások mértéke drasztikusan csökkent (mindössze egy mintánál találtam: 5. ábra), a szükülés aránya hatodára esett. (4. táblázat)



5. ábra A kalciummal kezelt sorozat második szekvensénél használt merülőcső metszete

4. táblázat Öntés közbeni beavatkozások száma, illetve előfordulási aránya

Öntés közbeni beavatkozások	Kalciummal kezelt második sorozat (46 adag)	
Letapadás miatti dugómozgatás	-	-
Üstkagyló tisztítása oxigénnel	2 adag	4,35 %
Merülőcső tisztítása oxigénnel	1 adag	2,17 %
Összesen	3 adag	6,52 %

*

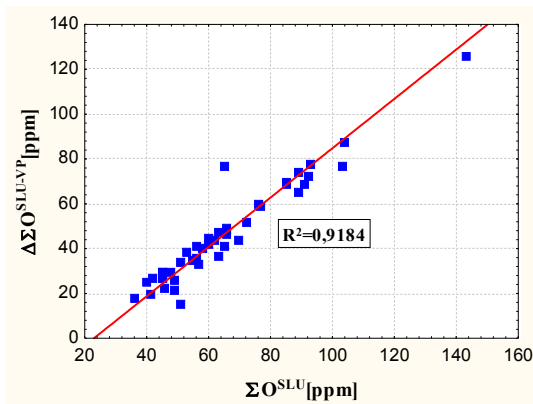
Mivel az első sorozatban vizsgált szilíciumszegény, alumíniummal csillapított acéloknál igen jelentős (38,9 %), a második kísérletsorozat során vizsgált kalciummal modifikálnál viszont elhanyagolható volt a lerakódások képződése – és az ebből eredő szűkült adagok aránya –, ezért csak a kalciumos kezelést nem kapott adagok technológiájának felülvizsgálatát láttam szükségesnek.

A kalciumos zárványmodifikáció nélküli gyártástechnológia fejlesztése

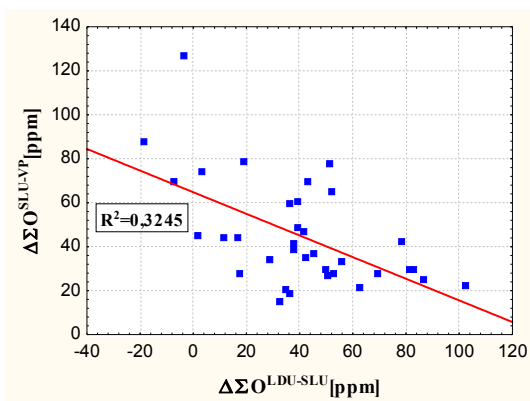
A kagylószűkülés szempontjából kiválasztott, legfontosabb 52 paraméter értékelése alapján terveztem megtenni javaslataimat. Első lépésben a vizsgált esetszámhoz viszonyítva túlzottan sok paramétert metallurgiai megfontolások szerint redukáltam 36-ra, majd a kapott eredményeket statisztikai módszerrel, faktoranalízissel értékeltem. A faktorvizsgálat rámutatott azon paraméterekre, amelyek a legnagyobb befolyással vannak a többire: a kezelés elején mért hőmérséklet (T^{SLE}) és aktívoxigén-szint ($a_{\text{O}}^{\text{SLE}}$), illetve ennek a kezelés közbeni változása ($\Delta a_{\text{O}}^{\text{SLE-SLU}}$). Továbbá a végdeoxidálás során adagolt alumínium mennyisége ($Al^{\text{üstmet}}$), illetve a belőle származó össz-, illetve oldott alumínium-tartalmak és változások (ΣAl^{LDU} , $Al_{\text{sol}}^{\text{LDU}}$, ΣAl^{SLU} , ΣAl^{VP} , $Al_{\text{sol}}^{\text{SLU}}$, $Al_{\text{sol}}^{\text{VP}}$). Ahhoz, hogy a kagylószűkülési hajlamot csökkentsem, a kijelölt paraméterek közül korreláció-vizsgálattal megkerestem azokat, amelyekkel a lerakódások képződésére való hajlamot legjobban jellemző,

azaz az űsmetallurgiai kezelés vége és az öntés közötti oxigén-tartalomban bekövetkezett változást ($\Delta\Sigma O^{SLU-VP}$) befolyásolni lehet (6-7. ábra):

- az űsmetallurgiai kezelés végén mért oxigén-tartalom (ΣO^{SLU});
- az oxigén-tartalom változása az űsmetallurgiai kezelés során az ($\Delta\Sigma O^{SLU-LDU}$).



6. ábra A kezelés végén mért oxigén-tartalom hatása (ΣO^{SLU}) az űsmetallurgiai kezelés után mért oxigén-tartalom változásra ($\Delta\Sigma O^{SLU-VP}$)



7. ábra A kezelés során mért oxigén-tartalom változás ($\Delta\Sigma O^{LDU-SLU}$) hatása a kezelés utáni oxigén-tartalom csökkenésre ($\Delta\Sigma O^{SLU-VP}$)

Mivel ezeket közvetlenül nem lehet változtatni, ezért megvizsgáltam, hogyan lehet közvetve befolyásolni:

- konverterben végzett megfelelő argonos utánöblítéssel,
- lépcsős dezoxidálás finomításával,

- üstsalak vasoxid-tartalmának mérséklésével,
- üstmetallurgiai kezelés során alkalmazott argonozási technológia korrekciójával.

Az első sorozat tapasztalatai alapján megtettem a harmadik méréssorozat adagjai gyártástechnológiájának módosítására tett – 140 tonnára vonatkoztatott – javaslataimat:

- konverterben a fúvatást követően legalább 10 m³-nyi argonos utánöblítés,
- csapolás közben legfeljebb 1,6 kg Al/ t acél-os elődeoxidálás,
- üstmetallurgia során a felső argonöblítés elhagyása,
- kezelés végén min. 6-8 perc legfeljebb 150-200 l/perc tisztító hatású lágy argonöblítés.

Mivel a mérések üzemi körülmények között, a termelés megszakítása nélkül történtek, ezért a négy javasolt módosítást sajnos nem sikerült minden egyes adagnál maradéktalanul betartani, mindössze négy adagnál teljesült mind a négy javaslat. A négy adag alapján történő értékelés azonban nem mondható tudományosan megalapozottnak (bár ezek öntése közben egy esetben sem került sor beavatkozásra), ezért kiterjesztettem az értékelést mindazon adagokra, amelyeknél legalább három javaslat megvalósult. Az így megtörtént szűrés után a mért, illetve számított adatok értékelése során 13 adag, az öntheség szempontjából pedig az ezeket tartalmazó 3 szekvens (összesen 27 adag) került értékelésre.

Az első sorozatnál kimutatott a kagylószűkülésre legnagyobb befolyással rendelkező paramétereknél (a_o^{SLE} , ΣO^{SLU} , $\Delta \Sigma O^{LDU-SLU}$, $\Delta \Sigma O^{SLU-VP}$) a javasolt módosítások hatására olyan változásokat tapasztaltam, amelyek igazolták az elvárásaimat: javultak az átlagértékek (**5-6. táblázat**), csökkentek ezek szórásai. Így kijelenthető, hogy a kezelés végén mért összoxigén-tartalom (ΣO^{SLU}) 50 ppm alatt tartása jelentősen javítja az esélyt a szűkülés elkerülésére.

5. táblázat Javaslatok hatása az üstmetallurgiai kezelés elején mért aktívoxigén-szintre (a_o^{SLE}) és a kezelés végén mért összoxigén-tartalomra (ΣO^{SLU})

Kísérlet	a_o^{SLE} [ppm]		ΣO^{SLU} [ppm]	
	x	σ	x	σ
első sorozat	5,59	2,48	68,39	24,65
harmadik sorozat: legalább három teljesült javaslat	3,99	1,38	44,92	12,48

6. táblázat Javaslatok hatása az üstmetallurgiai kezelés során ($\Sigma O^{LDU-SLU}$), illetve után mért összoxigén-tartalom változására (ΣO^{SLU-VP})

Kísérlet	$\Sigma O^{LDU-SLU}$ [ppm]		ΣO^{SLU-VP} [ppm]	
	x	σ	x	σ
első sorozat	40,82	36,16	49,49	25,72
harmadik sorozat: legalább három teljesült javaslat	65,8	32,72	23,0	12,89

A kagylószükülési hajlamot legjobban az erre visszavezethető öntés közbeni beavatkozások arányával lehet jellemezni, ezért megvizsgálva ezt a mutatót megállapítottam, hogy annak ellenére, hogy nem sikerült a javasolt módosításokat egyetlen teljes szekvensnél sem érvényesíteni, annál a hatnál, amelynél a legtöbb adag teljesített a négy előírásból legalább hármat (27 adagból 13), megfelelődt a zavarok aránya (**7. táblázat**).

7. táblázat Módosított technológiájú sorozatnál az öntés közbeni beavatkozások száma, illetve előfordulási aránya

Öntés közbeni beavatkozások	Harmadik sorozat (27 adag)	
Letapadás miatti dugómozgatás	3 adag	11,11%
Üstkagyló tisztítása oxigénnel	2 adag	7,40 %
Merülőcső tisztítása oxigénnel	-	2,17 %
Összesen	5 adag	18,51 %

*

Az értekezés fontos tanulsága, hogy az összoxigén-tartalom lényeges információkkal szolgál az acélgyártónak ahhoz, hogy a kagylószükülés gyakoriságát mérsékelhesse. Amíg korábban csak a végtermék minősítése szempontjából vizsgálták annak összoxigén-tartalmát, a kimutatott összefüggések rávilágítottak arra, hogy a gyártás közbeni mérésekkel már akkor előre jelezhető a kagylószükülés valószínűsége, amikor a beavatkozás még lehetséges. Fontos eredménye továbbá a dolgozatnak, hogy az argonkezelés szerepét tisztázza az acéltisztaságán keresztül a kagylószükülésre. Bebizonyosodott a hűtésre szívesen alkalmazott felső, illetve túlzottan intenzív alsó argonkezelés káros hatása az acéltisztaságára és az öntés közbeni beavatkozások gyakoriságára. Ez a jelenlegi gyakorlat felülvizsgálatára ad alapot. Amennyiben a javasolt tisztító hatású kis intenzitású argonkezelés valamilyen okból nem lehetséges, akkor a kalciumkezelés megfelelő lehetőséget biztosít az önthetőség javítására.

IV. Új tudományos eredmények

Az értekezésemben elért új tudományos eredményeket (téziseket) a következőkben fogalmazom meg:

Nagyszámú ipari adagon elvégzett kísérletekkel bizonyítottam, hogy a hidegen hengerelhető *szilíciumszegény, Al-mal csillapított acélok önthetősége hagyományos (hevítési lehetőség nélküli) üstmetallurgiai kezeléssel is jelentősen javítható* (7. táblázat) a kagylószűkülést okozó zárványok mennyiségének csökkentésével. A 140 tonnás adagot gyártó és nem kielégítő salakvisszatartással rendelkező acélművek esetén érvényes paramétereket határoztam meg, amiket eltérő feltételekkel rendelkező üzemek a mutatók megfelelő illesztésével szintén alkalmazhatnak.

1. Kalciumos kezelés nélkül gyártott adagoknál ásványtani (házánkban az acélgártás területén eddig még nem használt) vizsgálatok segítségével igazoltam, hogy *az öntés közben keletkezett lerakódások, tapadványok döntő többsége (~90 %-a) az öntés hőmérsékletén szilárd halmazállapotú oxid* (3. táblázat).

- Ezen belül az argonozási technika függvényében a lerakódásokban számottevő (>24 %) az exogén eredetű (aluminát és spinell) zárványok részaránya.
- A Ca-aluminátok jelenléte (5-10 % illetve 1,54 %,) a Ca-adagolás hiányában a salak okozta reoxidációt bizonyítja és az argonozási technológia hiányosságaira utal.

2. Nagyszámú kísérleti adag statisztikai elemzésével bizonyítottam, hogy *a kagylószűkülési hajlam az üstmetallurgiai kezelés végén és az öntés közben mért összoxigén-tartalom különbségével jól jellemezhető*. A szűkülés gyakoriságát

- az üstmetallurgiai kezelés során bekövetkezett összoxigén-tartalom csökkenése mérsékli,
- az üstmetallurgiai kezelés végén mért összoxigén-tartalom növeli,
- az atmoszférából, ill. az üstsalak FeO-tartalmából származó reoxidáció elősegíti.

3. Megállapítottam, hogy *a kagylószűkülési hajlam a következő technológiai megoldásokkal eredményesen csökkenthető*:

- *a lépcsős Al-dezoxidáció hatásának fokozása* a primerkemencében alkalmazott meghatározott mértékű (legalább 10 m³) argonos utánöblítéssel, aminek hatására csapoláskor alacsony aktívoxigén-szint biztosítható;
- *az üstmetallurgiai kezelés végére kialakuló összoxigén-tartalom csökkentése* a reoxidáció lehetőségének korlátozásával, amire a következő lehetőségek alkalmazhatók:
 - a nagy FeO-tartalmú primersalak visszatartása csapolás közben,

- az átkerült salak redukálása (FeO-tartalmának csökkentése) valamilyen dezoxidáló hatású szer adagolásával,
- az argonos felső fúvátás kiiktatása, miáltal csökken a salak és az acélfürdő keveredése és a légkör reoxidáló hatása,
- csökkentett intenzitású (legfeljebb 200 Nliter/perc) legalább 6-8 perc időtartamú argonos alsóöblítés az üstmetallurgiai kezelés végén, ami hatékonyan csökkenti az acélfürdőben maradt zárványok mennyiségét.

4. Mivel a csapolás során az üstbe kerülő primersalak növeli a reoxidációt ezért a veszélyének megítélése céljából *új módszert dolgoztam ki az üstbe kerülő primer-salak mennyiségének meghatározására:*

$$m_{\text{salak}}^{\text{át került- primer}} = \frac{m^{\text{sk.+oxid}} \cdot \text{FeO}^{\text{SLE}}}{\text{FeO}^{\text{LD}} - \text{FeO}^{\text{SLE}}} \quad [\text{kg}]$$

A módszer arra is alkalmas, hogy a salak dezoxidálásához szükséges reagens mennyiségét meghatározzuk. Fenti képlet felhasználásával megállapítottam, hogy a jelenlegi adottságok mellett adagonként 300 – 1800 kg oxidáló primersalak kerülhet az üstbe.

5. A jelenlegi technológia körülmények között, amennyiben a javasolt technológiai módosítások nem valósíthatók meg, akkor *a kagylószűkülés veszélye eredményesen csökkenthető a kialakult aktívoxigén-szint függvényében alkalmazott Ca-adagolással* (4. táblázat), aminek eredményeként az acélfürdő hőmérsékletén folyékony halmazállapotú Ca-aluminátok alakíthatók ki.

V. Az értekezés tudományos eredményeinek jelentősége és hasznosításuk lehetőségei

A tézisekben megfogalmazott tudományos eredmények újszerű ismeretekkel bővítik a hidegen hengerelhető acélok folyamatos öntésével kapcsolatos ismereteket.

Olyan ásványtani elemzéseket végeztem el, amiket hazánkban korábban az acélgyártás területén még nem alkalmaztak. Így olyan újszerű eredményekre jutottam, amelyek a jelenleg alkalmazott űstmetallurgiai eszközök közül néhányat előtérbe helyeznek, mások hasznosságát viszont megkérdőjelezi (1. tézis). Az argonozási technológia újragondolására hívtam fel a figyelmet.

Egy olyan technológiai metódust dolgoztam ki az elméleti összefüggések alapján elvégzett üzemi kísérletek eredményeként (2., illetve 3. tézisek), amelyek közvetlenül alkalmazhatók az ipar számára: olyan üzemek részére (mint például az ISD Dunaferr Zrt.), ahol nem áll rendelkezésre utólagos hevítési lehetőség. Azonnal hasznosíthatóak az értekezés megállapításai olyan acélművekben is, ahol bár megvan a lehetőség az űstmetallurgiai kezelés során az utólagos melegítésre, de gazdaságossági szempontból redukálni kívánják a költségeket.

Kézszelfogható és bevezetésre alkalmas része az értekezésnek a lépcsős dezoxidálás során felhasznált alumínium tömegének a korábbihoz képest akár ~10-20 %-os csökkentése, ami éves szinten milliós nagyságrendű megtakarítást eredményez (3. tézis).

A kísérleteim során nemcsak a kagylószűkülések arányát sikerült 50-80 %-kal mérsékelni, hanem a késztermék zárványossági – az értekezésben nem részletezett – mutatói is jelentősen javultak, ami további előnyöket biztosít a végfelhasználók részére.

Az értekezésem eredményei egy tudományos kutatómunka, egy TDK dolgozat és a közeljövőben három darab BSc szakdolgozat elkészültében is hasznosulnak. A TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV -2010-0001 pályázat keretében végzendő tevékenység kiinduló pontjául szolgálhatnak a téziseimben leírt eredmények és a kutatásaim során összegyűjtött adatbázis (4., 5. tézis).

Az eredmények gazdagítják az egyetemi oktatás tananyagát is, és egyben, a további kutatómunkákhoz újabb témaötleteket (pl. csapolás közbeni salakvisszatartás módjainak, illetve a folyamatos öntőműben történő lágyargonos öblítés hatásainak vizsgálata stb.) gerjesztenek.

VI. Summary

Influence of nozzle clogging in continuous casting of cold-rolled steels by secondary steelmaking without reheating

The dissertation investigates the cause of nozzle clogging in continuous casting of especially low-silicon Al-killed steels.

The formation of deposits inside and outside the nozzles (nozzle of ladle and tundish, submerged entry nozzles) used in continuous casting of especially low-silicon Al-killed mild steels may often cause nozzle clogging and casting disorder. Nozzle clogging primarily occurs in the production of steels where non-metallic inclusions with a higher melting temperature than that of the steel (1530 – 1570 °C) are formed (e.g. Al₂O₃, CaS). The solid inclusions of deposits are the results of oxidation, deoxidation, desulphurization and reoxidation. Technological experience has shown that the application of Ca-treatment and the removal of solid inclusions usually eliminate this phenomenon.

I have done 135 industrial experiments in ISD Dunaferri Corporation and mineralogical analyses at the University of Miskolc. I have made some statistical analyses for data processing on database from measurements of my experiments. I have done factor analysis and Spearman rank order correlations as well.

In order to understand deposit formation and the way it can be avoided, I have carried out detailed mineralogical analyses of the deposits formed on the inner and outer surfaces of the nozzles by X-ray powder diffractometry, SEM and micro X-ray probe. Results obtained from the deposits formed during the casting of Al-killed steels show that the alumina inclusions at the wall of the nozzle form the matrix of the harmful deposits. These results have also revealed that the amount of alumina is very important data. The amount of alumina could be determined by total oxygen measurement of steels.

I compared the tendency of nozzle clogging characterizing the methods currently in use and the innovations I suggested.

One of methods was Ca-treatment. It turned out to be a good process, because Ca-treatment resulted liquid inclusions, which do not form deposits. The tendency of nozzle clogging was reduced by 80%.

I demonstrated that the decrement in the amount of total oxygen between the end of secondary steelmaking and the casting of steel is the major cause of nozzle clogging. The statistical analysis has shown the amount of total oxygen could be affected by argon stirring in the primary furnace and in the ladle in secondary steelmaking. I have shown that decreasing the amount of total oxygen in secondary steelmaking results in a lower tendency of nozzle clogging.

Upper argon blowing could cause reoxidation by mixing in ladle slag, which serious problem because in ISD Dunaferri Co. the amount of FeO in the ladle slag is too high (~8%). It is caused by inadequate control of carry-over at the end of tapping. I have worked out an equation to calculate the amount of primary slag in the ladle slag.

It is essential that the intensity of bottom argon stirring should be strictly controlled because argon stirring can only carry solid inclusions up into the slag if stirring intensity is low.

If we can use argon stirring in primary furnace, then the amount of active oxygen could be decreased, consequently aluminium demand and the quantity of total oxygen are also reduced.

As a result of the trial the tendency of nozzle clogging was reduced by 50%.

VII. Az értekezés témakörében megjelent publikációk

Cikkek folyóiratokban:

1. *Harsik Béla*
Szekvensöntésvégi merülőcsöveken lerakódó tapadványok vizsgálatának tanulságai 2011.08.
Bányászati és Kohászati Lapok. No.3, 2011., pp. 6-10.
2. *Harsik Béla, Károly Gyula*
**A kagylószűkülések mértékének csökkenthetősége Si-sze-
gény, Al-mal dezoxidált acéloknál** 2011.12.
Bányászati és Kohászati Lapok. No.5, 2011., pp. 1-5.
3. *Harsik Béla, Károly Gyula, Tardy Pál, Józsa Róbert, Szabó
Zoltán*
**A reoxidáció hatása az acél folyamatos öntése közben kiala-
kuló kagylószűkülésre** 2012.04.
ISD Dunaferr Műszaki Gazdasági Közlemények. No.1, 2012.,
pp. 41-48.
4. *Bela Harsik, Paul Tardy, Gyula Karoly*
Examination of nozzle clogging in continuous casting *megjelenés
alatt*
Journal Revue de Métallurgie - (DOI 10.1051/metal/2012021)

Konferencia cikkek és előadások:

1. *Harsik Béla*
The Effect of Reoxidation in Continuous Casting of Steel 2009.03.19.
MICROCAD - Miskolci Egyetem, 2009., Section D, pp.1-6.
2. *Harsik Béla*
**Acélok önthetőségének kagylószűkülés jellegű önthetőségi
problémái** 2009.04.05.
XI.Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Mára-
marossziget, 2009., pp. 59-63
3. *Harsik Béla*
Investigation of sources of nozzle clogging 2009.04.24.
16th International Students' Day of Metallurgy, Ostrava,
2009., CD-ROM

- Gyula Karoly, El-Ghazaly, Béla Harcsik, Andrea Szabó*
The Effect of Flow Induced by Argon Stirring on the Cleanliness of Low Silicon, Aluminium Killed Steels 2009.09.09.
 Conference on Modelling Fluid Flow CMFF'09, Budapest, 2009., CD-ROM
- Harcsik Béla*
 5. **Kalciumszulfid hatása az acélok önthetőségére** 2010.04.10.
 XII. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagyenyed, 2010., pp.55-59.
- Harcsik Béla*
 6. **Effect of calcium sulphide at casting of steels** 2010.09.18.
 17th International Students' Day of Metallurgy, Aachen, 2010., pp.40-43.
- Harcsik Béla, Dr. Kardos Ibolya, Józsa Róbert*
 7. **Kagylószerűkülés okainak vizsgálata az ISD DUNAFERR Zrt-nél** 2011.04.02.
 XIII. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Gyergyószentmiklós, 2011., pp.76-79.
- Gyula Károly, S.A. Ghazally, Paul Tardy, Bela Harcsik, Robert Józsa*
 8. **Decreasing the nozzle clogging tendency in low-silicon Al-killed mild steels at ISD Dunaferr Co.** 2012.05.15.
 Clean Steel 8nd International Conference, Budapest, 2012., CD-ROM
- Bela Harcsik, Paul Tardy, Gyula Károly, Robert Józsa*
 9. **Investigation of deposits on submerged entry nozzles** 2012.05.15.
 Clean Steel 8nd International Conference, Budapest, 2012., CD-ROM

Konferencia előadások:

- Harcsik Béla* 2008.11.13.
 1. **Acélok önthetőségének vizsgálata**
 Doktoranduszok Fóruma Kari Szekcióülés, Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Tanszék, 2008.
- Harcsik Béla*
 2. **Reoxidáció elleni védelem vizsgálata az ISD Dunaferr Zrt. Acélművében** 2009.11.05.
 Doktoranduszok Fóruma Kari Szekcióülés, Miskolci Egyetem Metallurgiai és Öntészeti Tanszék, 2009.