

PIOTR R. SCHELLER – KLAUS HACK – STEPHAN PETERSEN – QIFENG SHU

A zárványosság kialakulása az acélban üstmetallurgiai kezelés során – szimulációs modell ipari folyamatokhoz*

A szerzők átfogó modellt dolgoztak ki a zárványok összetételének és minőségének számítására gázzal kevert üstben; a modell helyességét ipari kísérletekkel igazolták. Ipari adatok alapján vették figyelembe a keverés intenzitását, az acél és a salak, ill. falazat közti reakciókat, a zárványok távozásának feltételeit. A FactSage és SimuSage szoftvercsomagokat használták a termodinamikai jellemzők, ill. szimulációs módszerek meghatározásánál. 210 t és 30 t súlyú adagok kezelése során kapott mérések eredményeit és a modellel számított értékeket összehasonlítva az egyezés jónak bizonyult.

Bevezetés

Az acél tisztaságának javítása a kutatók egyik legfontosabb feladata a kohászati folyamatoknál. A nemfémes zárványok rontják a termékek mechanikai jellemzőit és felhasználói tulajdonságait. Emellett a zárványcsomók az öntőcső elzáródását okozhatják és így komolyan veszélyeztethetik az acélgyártás folyamatát. Az acél minőségének javítása céljából nagy erőfeszítéseket tesznek az üstkezelés szabályozására a nemfémes zárványok eltávolítása érdekében [1]. Fontos, hogy ismerjük a zárványosság kialakulását az üstmetallurgiai kezelés során, mivel ennek befolyásolásával javítható a termék minősége.

Nagy mennyiségű zárvány keletkezik a dezoxidáció és ötvözés után. A salak FeO és MnO tartalma növelheti a zárványok mennyiségét. Gázkeverést alkalmaznak az acél összetételének és hőmérsékletének homogenizálására, a salak-fém reakciók kine-

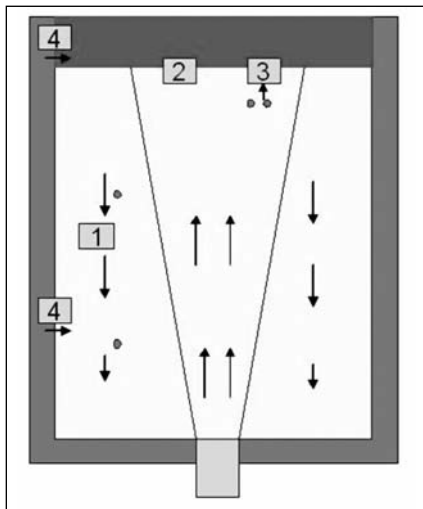
tikájának növelésére és a zárványok eltávolításának elősegítésére. A zárványok ütközhetnek egymással és összetapadhatnak, majd felúsznak az acél-salak határfelületig és eltávozhatnak a salakba. A zárványok összetétele folyamatosan változik a salakból és a tűzálló anyagból származó kalciummal és magnéziummal reagálva. A fedősalak és az acél határfelületén lejátszódó reakciók hatására az acél összetétele is változhat, ily módon módosul a zárványok összetétele is. A termodinamikai paraméterek mellett a zárványok kifejlődését számos más paraméter is befolyásolhatja, pl. az üstfalazat, az acélolvadékban kialakult áramlások stb. Nagy kihívás ezért a zárványok kialakulását leíró modell kidolgozása. Már eddig is jelentős munka folyt a zárványosság kialakulását illetően üstmetallurgiai kezelés során [2, 3]. A korábbi modellekben csak részfaktorokat vettek figyelembe (pl. a salak-fém reakciók, áramlási folyamatok).

Sok kutató vizsgálta a zárványok eltávolításának mechanizmusát gázbefúvású üstben különböző modellek segítségével [3]. A salak-fém reakciókat úgy vizsgálták, hogy az acél, a salak és a zárványok között egyensúlyi állapotot tételtek fel [4, 5, 2]. Ennek eredményeként valamennyi oxidfázisnak azonos, homogén összetételűnek kell lennie. Ennek alapján a fedősalak összetételének szabályozását javasolták, a salak-fém reakciók fontosságának ismeretében [2]. Ismeretes azonban, hogy ipari körülmények között a zárványok különböző összetételűek és heterogének, ami a kezelés során bekövetkezett változásokat jelzi. A mintavétel időpontjától függően különböző zárványösszetételeket találnak. Újabb publikációkban a reakciók kinetikai tényezőit is figyelembe veszik az üstmetallurgiai kezelés során [6–8]. A zárványok összes CaO-, Al₂O₃-, SiO₂- és MgO-tartalma a kezelés függvényében számítható. A modellben feltételezik a zárványok eredetét és mennyiségét, majd ipari és saját laboratóriumi eredményekkel való összehasonlítás alapján pontosítják.

Eddig a szerzők által korábban közölt [9–11] modell eredményeit ismertették, amelyben figyelembe veszik a fent említett paramétereket és kiszámítják a ténylegesen előforduló komplex zárványokat. Jelen munka célja, hogy bemutassák a gázzal kevert üstben a zárványok kialakulására szolgáló modell ipari alkalmazását, amely figyelembe veszi az áramlások, a salak-fém reakciók, a zárványok eltávazása és a tűzálló anyagokkal való kölcsönhatások paramétereit. Leírják továbbá a zárványosság befolyásolására irányuló ipari alkalmazást. A

*Piotr R. Scheller, Prof. Emeritus Bergakademie Freiberg;
Klaus Hack és Stephan Petersen, GTT Technologies GmbH, Herzogenrath, Németország;
Qifeng Shu, University of Science and Technology Beijing, Kína.*

* Az előadás a 2015. szeptember 8–10. között Budapesten tartott Clean Steel konferencián hangzott el.



■ **1. ábra.** A zárványosság alakulását befolyásoló paraméterek gázkeverésű üstben: 1. az acél és a salak keveredése az üstben; 2. fém-salak reakciók; 3. a zárványok távozása; 4. a falazat kölcsönhatása az acéllal és a salakkal

modell felépítésénél az ipari tapasztalatokat vették figyelembe és input adatként használtak az üzemi adatokat.

1. A modell leírása

A zárványok alakulását üstmetallurgiai kezelés során számos ipari paraméter befolyásolja (1. ábra). Ötvözőket, pl. Al-ot adnak az acélhoz dezoxidálás céljára, amely a beadás helyén nagy Al-koncentrációt és kis O-koncentrációt eredményez, és nagymennyiségű dezoxidációs termék, zárvány keletkezik. A gázkeverés hatására kialakuló áramlások fokozatosan homogenizálják az Al- és O-koncentrációt, miközben zárványok keletkeznek és módosulnak. A salak-fém határfelületen reakciók játszódnak le, amelyek megváltoztatják az acél összetételét, amely a gázkeverés hatására ugyancsak homogenizálódik. A zárványok ütköznek és növekednek, majd felúsznak, vagy az áramlás hatására a határfelületre sodródnak, majd a salakba kerülnek. A tűzálló falazat kölcsönhatásba lép az acéllal és a salakkal, így módon befolyásolja a zárványok kialakulását.

Az 1. ábra szerint a modellenél a következő paramétereket vettük figyelembe:

1. keveredés az üstben és a salakrétegben,
2. az acél és a salak közti reakciók,

3. a zárványok eltávozása,
4. az acél és a salak kölcsönhatása a falazattal.

Ezek a paraméterek kölcsönösen összefüggenek. Pl. az üstben lezajló keveredésnek jelentős hatása van az acél és salak közti reakciókra, mivel megváltoztatja az anyagátadási együtthatókat. A modellezés céljából jelen munkánkban ezeket a paramétereket egyenként vettük figyelembe.

1.1. Keveredés az üstben

Az üstben kialakuló keveredés befolyásolja a kémiai inhomogenitást; ezzel számos kutató foglalkozott az elmúlt években. Több beszámoló született az üstben lezajló keveredés matematikai vagy fizikai modellezéséről [12–19]. Jelen tanulmányunkban meglehetősen egyszerű matematikai modellt alkalmaztunk, nevezetesen a tartály-sorozat recirkulációs modellt [20–23]. Az olvadékot három gyűrű alakú tárolóba osztották el, a falazat volt a negyedik. Ez a modell rendkívül gyors számításra ad lehetőséget és meghatározott térfogatban lejátszódó keveredésre ad adatokat (> 95% homogenitás a teljes térfogatban) és más CTD-módszerrel (a vezetőképeség, a hőmérséklet és a hidrosztatikus nyomás mérésén alapuló) végzett számításokhoz hasonló eredményeket adott. A nagy sebességre azért volt szükség, hogy a modellt online módon, tehát a szóban forgó folyamattal párhuzamosan lehessen alkalmazni. Az üstben a keveredés a gázbefúvás intenzitásától, ill. az általa előidézett cirkulációs sebességtől függ. Hasonló módon számítottuk a salakrétegben lezajló keveredést.

1.2. Az acél–salak reakciók

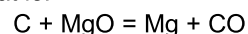
A fedősalak hatását a zárványösszetételre számos kutató vizsgálta. Legtöbb esetben az acél, salak és zárványok közötti reakciók termodinamikájára koncentrálnak, annak ellenére, hogy az említett fázisok között egyensúlyi állapotot nehéz elérni a korlátozott fúvatási idő miatt. Ezért az acél-salak reakciók kinetikáját is figyelembe kell venni annak érdekében, hogy realisabb képet kapjunk a fedősalak hatásáról. Az acél és a salak anyagátadási együtthatóját (KST, KSL) használtuk fel a fém–salak reakció kinetikájának leírására.

1.3. A zárványok eltávozása

A zárványok távozása az acélból rész-folyamatokból áll: átmenet az acélból a fém-salak határfelületre, majd a zárvány átlépése a salakba a határfelületen. A zárványok mozgása az acélvadékokban összetett. Egyszerűség kedvéért feltételeztük, hogy a zárványok mozgása az áramlásokat követi, amíg a fém-salak határfelületre érkeznek. Ezt a feltételezést jogossá teszi a zárványok kis mérete. Legtöbbjük kisebb 40 μm-nél, ezért az örvényhatás elhanyagolható. A megfigyelések szerint a zárványok csak részben távoznak a salakba, vagy tapadnak a falazathoz. Legnagyobb részük követi az acélfürdő mozgását és különböző összetételű heterogén zárványokká alakul. A zárványok viselkedésének vizsgálata alapján a szilárd állapotú Al_2O_3 és nagy Al_2O_3 -tartalmú alumínátok ütközés során könnyen összetapadnak, míg a folyékony alumínátok és Mg–Al spinellek nem [24–26]. A szilárd alumínátok könnyedén átlépnek a salakba, míg a folyékony zárványok sokkal kevésbé [26]. A végeredmény az, hogy a szilárd alumínátok távozása a salakba sokkal könnyebb, mint a folyékony Mg–Al spinelleké és alumínátoké. Saját megfigyeléseink és ipari vizsgálatok szerint a zárványok távozási sebessége az acélból különböző és a fajtájuktól függ (spinell, folyékony állapotú zárványok, szilárd alumínátok). A legnagyobb távozási sebességet az Al_2O_3 és a nagy Al_2O_3 tartalmú zárványok esetén feltételezték.

1.4. Kölcsönhatás az üstfalazattal

A modellenél figyelembe vettük a falazat és az acél, ill. salak közti kölcsönhatást is. A falazat anyaga oldódhat a salakban és kis mennyiségben az acélba is bekerülhet, így megváltoztatja azok összetételét. A zárványok viselkedése függ az acél és a salak összetételétől. Tipikus üstfalazat anyag a MgO-C téglá. A falazat anyaga mechanikai, vagy kémiai erózió hatására kerülhet az acélba [26]. Továbbá a MgO-C téglák bizonyos termodinamikai feltételek mellett nem stabilak. Pl. az acél és a falazat határfelületén a következő reakció játszódhat le:



A Mg és a CO oldódik az acélban (a

CO oldott karbonná és oxigénné bomlik) és így megváltoztatja az acél és a meglévő zárványok összetételét. A falazat oldódásának a sebességét ipari adatok alapján becsültük.

A falazat oldódása a salakban a salak okozta korrózió fő mechanizmusa. A falazat komponensei ennek megfelelően megváltoztatják a salak összetételét és a salakból az acélba juthatnak. Mivel a salakösszetétel változásának követéséhez időre van szükség, az üzemekben megfigyelt falazatkopást vettük alapul a falazatból a salakba és acélba kerülő anyagok számításához. A falazat oldódásának sebességét az acélba, ill. salakba az üstkezelés alatt bekövetkező falazatcsökkenés segítségével becsültük. A falazat anyagainak oldódása közvetlenül az acélban feltételezésünk szerint csekély a teljes falazat fogyáshoz képest.

1.5. Modelleszközök

A folyamat szimulációjához a SimuSage programot alkalmaztuk. Ebben különböző komponensek állnak rendelkezésre, pl. a kémiai reaktor, a keverő, az elosztó, az ismétlő stb. Az alapadatokat a FactSage adatbázisból importáltuk. További magyarázatokat fognak adni a szerzők egy tervezett új publikációban.

2. A modell hitelesítése – eredmények és értékelés

Ez a modell arra a célra készült, hogy online módon alkalmazza az ipari gyakorlatban. A hitelesítés meglehetősen bonyolult, mert a kísérleti adagoknál a hőmérséklet és az oxigén aktivitásának mérése mellett számos próbát kell venni, amelyeken részletes kémiai elemzést kell végezni. Ebben a dolgozatban két példát mutatunk be a modell hitelesítésére: egy 210 t súlyú mikroötvözött adagra és egy 30 t súlyú hőálló acél adagra.

A modellt ennek megfelelően az acél, a salak és a zárványok összetételének vizsgálatára alkalmaztuk mikroötvözött acélra ipari körülmények között. Az acél LD-konverterben készült. Csapolás közben 150 kg alumíniumot és 600 kg szilíciumot adagoltak. A második dezoxidációra a 210 t-s üstben került sor, 130 kg alumínium adagolásával, keverés közben. A ke-

1. táblázat. A modell hitelesítésénél alkalmazott ipari adatok

Az acél és a salak tömege	Acél: 210 t, salak: 2,5 t
Az acél összetétele a kezelés előtt	C: 0,11%, Mn: 0,90%, Cr: 0,24%, Mo: 0,12%, V: 0,007%, Ti: 0,002%
A salak összetétele kezelés előtt	CaO: 54%, SiO ₂ : 12%, Al ₂ O ₃ : 22%, MgO: 8%, CaF ₂ : 4%, FeO+MnO ₂ << 1%
Dezoxidáció	1) Si 600 kg, Al 150 kg 2) Al 130 kg 3) CaSi kezelés

2. táblázat. A számítások során alkalmazott modell paraméterei

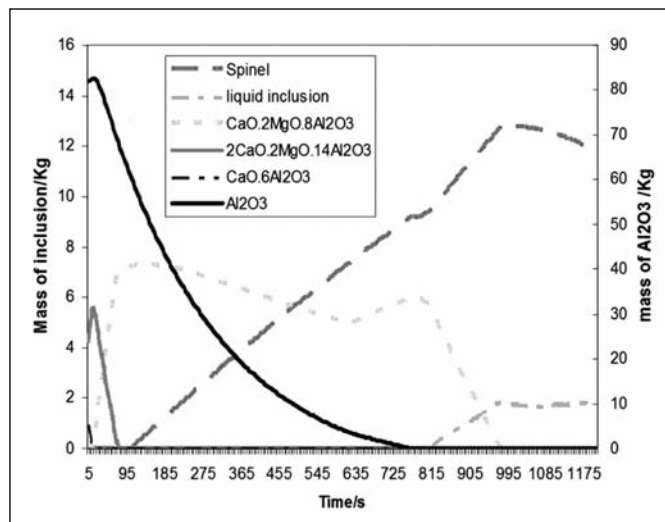
Recirkulációs sebességek (ipari adatok)	288 kg/s (lágú Ar-fúvatás, 150 l/perc)
Anyagátadási együtthatók	Acél oldalon: KST = 0,002 m/sec Salak oldalon: KSL = 0,001 m/s
Falazat oldódási sebesség (ipari adatok)	Az acéllal érintkezve: 0,0005 kg/m ² ·s A salakkal érintkezve: 0,001 kg/m ² ·s
Füldő hőmérsékletek (ipari adatok)	Az idő függvényében változó T = 1650-0,144 t/60-8,689(t/60) ^{1/2}

zelés végén Ca-Si-ot adagoltak, hogy folyékony zárványokat kapjanak. Néhány input adatot az 1. táblázatban foglaltunk össze.

A gyártás során vett próbákban meghatározták az acél, a salak és a zárványok összetételét stb. A modellt a dezoxidáció második lépcsőjének a szimulációjára használtuk, a CaSi kezelés előtt. A szimulációt a CaSi adagolás után csak néhány percig folytattuk. A számításokhoz használt paramétereket a 2. táblázat tartalmazza. Az üstfalazat MgO-C téglából készült. A modellszámítások során kinetikai paraméterként a recirkuláció sebességét, az anyagátadási együtthatókat, a falazat oldódási sebességét és a zárványok távozási sebességét használtuk; ezek ipari kísérletekből származnak. A számítások során ezeken a paramétereken nem változtattunk. A szimuláció 130 kg alumíniumhuzal adagolásával indult.

A zárványkialakulás szimulációjának eredményeit a 2. ábra mutatja be. Az alumíniumoxid-tartalom 800 s után 0-ra

csökkent, főleg a salakba való távozás, továbbá a zárványok összetételének változása miatt. A szilárd állapotú CaO·Al₂O₃ és 2CaO·2MgO·14Al₂O₃ rövid jelenléte azzal magyarázható, hogy az Al-adagolás után az Al-aktivitás folyamatosan változik a füldőben, emiatt az ott maradó alumínátok Al₂O₃ tartalmának egyensúlyi feltételei is változnak. Az MgAl spinell mennyisége 1000 s-on keresztül folyamatosan nő. A CaO·2MgO·8Al₂O₃ tartalom először nő, majd 990 s után nullára csökken. Folyékony alumínátok keletkeznek és mennyiségük 800 s után növekszik. A végső zárványok Mg-Al spinellekből és folyékony Ca-alumínátokból állnak. A számítások során feltételeztük, hogy az Al₂O₃ és a szilárd alumínátok



■ 2. ábra. A zárványösszetétel alakulása az üstkezelés során; 210 t-s üst, MgO-C falazattal

($2\text{CaO}\cdot 2\text{MgO}\cdot 14\text{Al}_2\text{O}_3$, ill. $\text{CaO}\cdot 2\text{MgO}\cdot 8\text{Al}_2\text{O}_3$) távozási sebessége nagyobb, mint a spinelleké és folyékony aluminátoké. A zárványok mozgása így az Al_2O_3 és a szilárd aluminátok távozásához vezet. Ennek eredményeként viszonylag több spinell és folyékony aluminát van a végső zárványosságban, ami a kisebb távozási sebességüknek és a termodinamikai feltételeknek köszönhető.

A modell segítségével számított zárványokat az ipari adagból vett próbákban a 3. táblázat tartalmazza. A Ca-Si-os kezelés az Mg-Al spinelleket és az Al-oxidokat folyékony aluminátokká alakítja. A Ca-Si-os kezelés után a számítások szerint kevés CaS zárványt találtunk (3. táblázat). Az eredmények összehasonlítása alapján látható, hogy a modellel számított zárványok összhangban voltak a vizsgált

3. táblázat. Az elemzett és számított zárványok összehasonlítása

Kezelési lépés	Elemzett zárványok	Számított zárványok
Érkezés az üstkezelés helyére	ACD	AC
Ca-Si-os kezelés előtt	BAC	BAC
Az üst ürtésekor	CE	EC

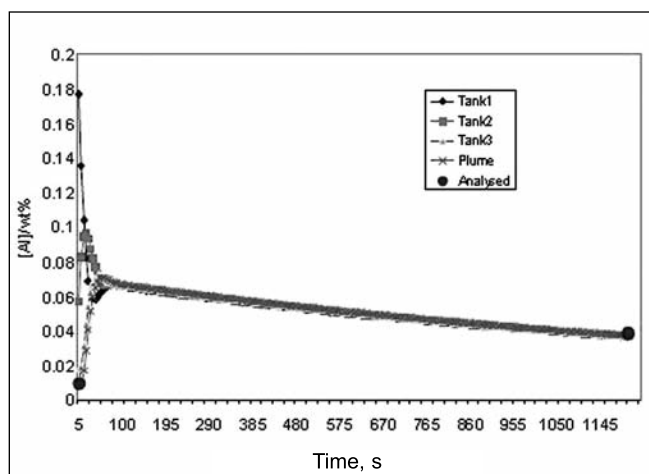
A: Al-oxid, B: spinell, C: Ca-aluminát, D: Mn-szilikát, E: CaS. A sorrend a csökkenés mértékének felel meg.

zárványokkal. A Ca-Si-os kezelés előtt sok Mg-Al spinell és kevesebb Al-oxid, ill. Ca-aluminát volt az ipari acélban. A Ca-Si-os kezelés után a fő zárványtípus a folyékony aluminát és a CaS lett. A modell helyesen nagy mennyiségű Mg-Al spinellt és kevés CaS zárványt jelez a kezelés hatására.

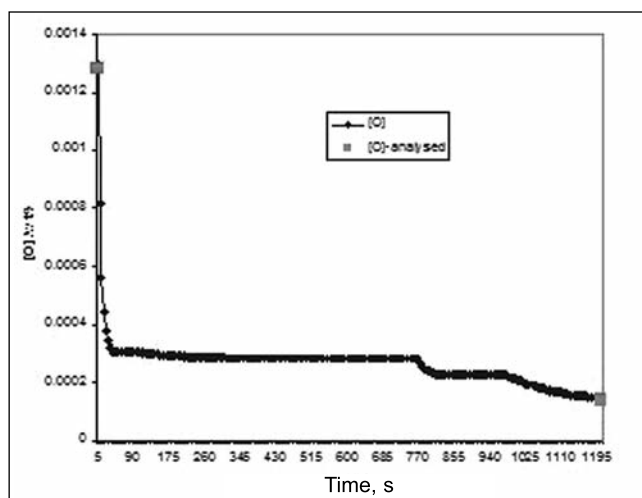
Az acél és a salak kémiai összetételét is meghatároztuk a modell segítségével. Az eredmények, amelyeket máshol mutattunk be [9] azt mutatják,

hogy az acél Al-tartalma az üstkezelés első két percében ingadozik, majd a dezoxidációs reakció miatt csökken.

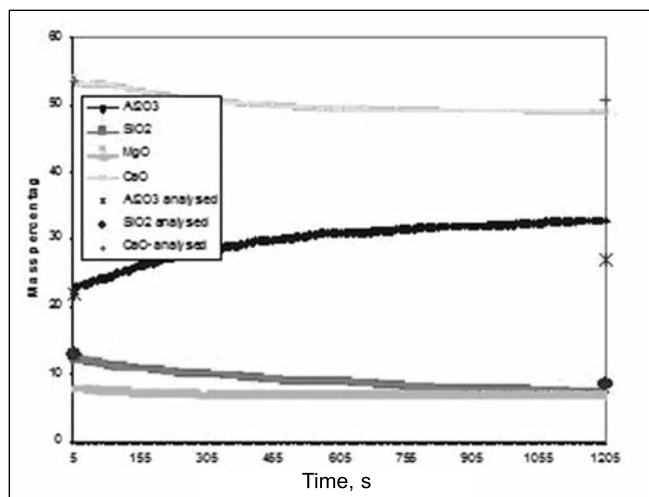
A számításokból látható, hogy az Al-tartalom alakulásánál a keveredés és a fém-salak reakciók a meghatározók. A 3. és 4. ábrán az ipari adagból vett minták számított és a mért Al-tartalma és O-aktivitása látható. Az ábrákon látható, hogy a számítás helyes eredményeket ad az acél Al-tartalmára és O-aktivitására.



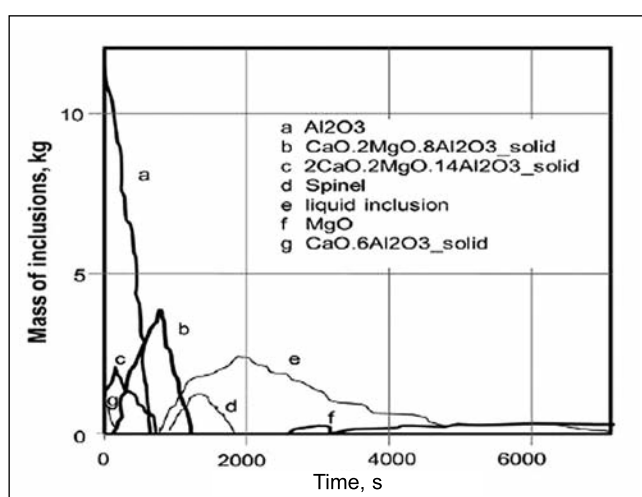
3. ábra. Az oldott Al-tartalom változása a kezelés során. A számított és az ipari adagban mért eredmények összehasonlítása



4. ábra. A számított és mért oxigénaktivitások összehasonlítása az üstkezelés során. Az első meredek esés az Al-os dezoxidáció, a későbbiek a zárványok hatása



5. ábra. A számított és mért salakösszetétel összehasonlítása



6. ábra. A zárványosság változása az üstkezelés során, 30 t hőálló acél.

4. táblázat. Ipari adatok a 30 t-s adagok hitelesítéséhez

Az acél és a salak tömege	Acél: 30 t, salak: 250 kg
Az acél összetétele a kezelés során (a számítások során ezeket használták)	C: 0,24%; Mn: 0,29%; Cr: 1,67% Mo: 0,39%; V: 0,086%; Si: 0,09%
A salak összetétele dezoxidálás után, a kezelés előtt (kiinduló adatok)	CaO: 55%, SiO ₂ : 7%, Al ₂ O ₃ : 30%; MgO: 7%, FeO+MnO ₂ < 1%
A dezoxidáció menete	1) Al az elektrokemence csapolása után 2) Al a kezelés során

A számítás eredményei jól egyeztek az ipari adatokkal a salak kémiai összetétele esetében is (5. ábra). A számított és mért adatok közti kis eltérések a gyártás közben vett próbatestek inhomogenitásával magyarázhatók.

A másik hitelesítést 30 t-s üstben gyártott hőálló acélra végeztük el. A salak és az acél összetételét a 4. táblázatban adtuk meg. Az üstkezelés előtt az acélt csapolás közben alumíniummal dezoxidálták, a második adagolásra az üstkezelés során került sor. Mintát vettek az üstkezelés előtt és után, továbbá a vákuumkezelés kezdete előtt. Az üstfalazat MgO-C téglából készült.

A modellszámítások során ugyanazokat a kinetikai paramétereket használtuk, mint az előző esetben (recirkuláció sebessége, anyagátadási együtthatók, falazat kopási sebesség, zárványtávozás sebessége). A zárványokra vonatkozó eredményeket a 6. ábrában mutatjuk be. A vizsgált idő kb. 2 órára nőtt, a vákuumkezelés előtti időtartamra vonatkoztatva. Az eredmények szerint az előző kísérlethez hasonló zárványtípusok alakultak ki, bár a mennyiségük és alakulásuk a kezelési idő függvényében eltér. Megjelenésük és változásuk is ugyanúgy magyarázható, azaz a vizsgált komponens aktivitásának változásával. A MgO új fázisként kb. 1 óras kezelés után jelenik meg, és a további kezelés során kissé nő a mennyisége. Ez azzal magyarázható, hogy az O-aktivitás a második Al-adagolás után jelentősen csökken, 5,8 ppm-ig. Ilyen körülmények között a magnézium főleg a salakból származik, de a falazat oldódása is hozzájárul. A zárványok elemzése szerint az üstkezelés elején tiszta Al-oxidok vannak jelen, majd nagy Al-oxid tartalmú zárványok. Az üstkezelés végén és a vákuumkezelés előtt az ipari minták elemzése szerint spinellek és Ca-aluminátok vannak az acélban. A számítási ered-

ményekkel összehasonlítva az egyezés jónak mondható, bár tiszta MgO zárványokat nem elemeztek (6. ábra).

3. A modell alkalmazása a gyártás során

A koncepció és a modell megalkotása során cél volt, hogy a modellt közönséges személyi számítógépen lehasználni és a számítási idő rövid legyen. Ennek eredményeként a modellt párhuzamosan futtatják a kezeléssel, és a zárványok összetételét és mennyiségét online módon számítják. A folyamat elején a szükséges input adatokat a kezelő adja be a képernyő input oldalára (vagy pedig elektronikusan viszik rá). Miután az adatokat bevitték, a „start” gombot megnyomják. A számított zárványösszetétel és mennyiség, az acél Al-tartalma, az oxigénaktivitás és a salakösszetétel megjelenik a képernyőn. Ha dezoxidálószerrel, ötvözőt, vagy salakképzőt adagolnak, a számítást megszakítják és a beadott mennyiséget beviszik. A program újraindítása után a számításokat az új adatokkal folytatják.

Eszerint a modell rugalmasan alkalmazkodik az új, vagy megváltozott feltételekhez. A modellt offline módon is lehet használni a különböző paraméterek, pl. salakösszetétel, ötvözés, kezelési idő és tűzálló bélés változásának a zárványkialakulásra gyakorolt hatásának vizsgálatára különböző acéloknál. Ily módon a metallurgiai folyamatok egyedi optimalizálása válik lehetővé. A gyakorlott felhasználók változtathatják a kinetikai paramétereket, pl. az anyagátadási együtthatókat, a falazat eróziót, a különböző zárványok távozási sebességét (pl. ha a salakvezetés változik, vagy vákuumkezelést alkalmaznak), vagy az adaghőmérséklet számítási módját és így a modellt adaptálni lehet a saját igényeknek, ill. feltételeknek megfelelően.

Következtetések

Átfogó modellt dolgoztunk ki a zárványok kialakulására, szabályozására és ellenőrzésére gázzal kevert üstben a keveredés, a salak-fém reakciók, a zárványok eltávozása és a falazat oldódása figyelembe vételével. A modell a termodinamikai egyensúlyokat kombinálja a reakciókinetikával és a keveredéssel az acéolvadékból és salakfázisban. A kinetikai paramétereket ipari kísérleti adatok alapján határoztuk meg. Ily módon megfelelő módszert kaptak közvetlen ipari alkalmazásra.

A zárványok összetételének és mennyiségének, valamint az acél és salak összetételének számított változását üstmetallurgiai kezelés során különböző összetételű, 210 t és 30 t súlyú ipari adagokon mért eredményekkel hasonlítottuk össze. A számított és mért adatok összehasonlítása azt mutatta, hogy a kidolgozott modell a kinetikai paraméterek változtatása nélkül is jónak bizonyult. Nyilvánvaló azonban, hogy a termodinamikai összefüggések mellett az ipari körülményekre érvényes kinetikai paramétereket is figyelembe kell venni. Ezeket a paramétereket a modell használójának kell módosítani a saját gyártási körülményeinek megfelelően. A modell alkalmas a zárványok típusának és mennyiségének online ellenőrzésére a folyamat során, offline módon pedig a folyamat optimalizálására és a zárványosság tudatos kialakítására.

Fordította: Tardy Pál

Irodalom

- [1] Mazumdar, D.; Guthrie, R. I. L.: ISIJ Int., 1995, No. 1, pp. 1–20.
- [2] Suito, H.; Inoue, R.: ISIJ Int., 1996, No. 5, pp. 528–536.
- [3] Söder Mats; Jönsson Pär; Jonsson Lage: steel research int., 2004, No. 2, pp. 128–138.
- [4] Ito, H.; Hino, M.; Ban-ya, S.: CAMP-ISIJ, 8, (1995), 75.
- [5] Ohta, H., Suito H.: ISIJ Int., 36 (1996), 983.
- [6] Harada, A.; Maruoka, N.; Shibata, H. and Kitamura, S.: ISIJ Int., 53 (2013), 12, 2110–2017.
- [7] Harada, A.; Maruoka, N.; Shibata, H. and Kitamura, S.: ISIJ Int., 53

- (2013), 12, 2118–2025.
- [8] Harada, A.; Maruoka, N.; Shibata, H.; Zeze, M.; Asahara, N.; Huang, F.; Kitamura, S.: ISIJ Int., 54 (2014), 11, 2569–2577.
- [9] Shu, Q.; Volkova, O.; Scheller, P. R.: HINO Symposium. Tokyo, Japan, May 23–25, 2010, pp. 106–115.
- [10] Scheller, P. R., Shu, Q.: Proc. 5th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012, Dresden, Germany, Oct. 1–3, Paper ID 1388
- [11] Scheller, P. R., Shu, Q.: steel research int., 85 (2014), 8, 1310–1316.
- [12] Steinmetz, E.; Scheller, P. R.: Stahl und Eisen, 1987, No. 9, pp. 417–425.
- [13] Scheller, P. R.; Volkova, O.; Ryabov, D.: Proc. Jim Evans Honorary Symposium, TMS 2010, Washington, USA, February 14–18, 2010, pp. 165–172.
- [14] Szekely, J.; Lehner, T.; Chang, C. W.: Ironmaking and Steelmaking, 1979, No. 6, pp. 285–293.
- [15] Mietz, J.; Oeters, F.: Steel Research, 1987, No. 10, pp. 446–453.
- [16] Oeters, F.; Pluschkell, W.; Steinmetz, E.; Wilhelmi, H.: steel research, 1988, No. 5, pp. 192–201.
- [17] Mazumdar, D.; Guthrie, R. I. L.: Met. and Mat. Trans. B, 1986, No. 4, pp. 725–733.
- [18] Zhu, M. Y.; Sawada, I.; Yamasaki, N.; Hsiao, T. C.: ISIJ Int., 1996, No. 5, pp. 503–511.
- [19] Mazumdar, D.; Evans, J. W.: ISIJ Int., 2004, No. 3, pp. 447–461.
- [20] Levenspiel, O.: Chemical reaction engineering, Wiley, New York, NY, 1972
- [21] Sano, M.; Mori, K.: Trans. ISIJ, 1983 pp. 169–175.
- [22] Pietzka, J.; Steinmetz, E.; Wilhelmi, H.: steel research, 1987, No. 12, pp. 538–545.
- [23] Krishna Murthy, G. G.: ISIJ Int., 1989, No. 1, pp. 49–57.
- [24] Hongbin Yin, Shibata, H.; Emi, T.; Suzuki, M.: ISIJ Int., 1997, No. 10, pp. 946–955.
- [25] Kang, Y. J.; Sahebkar, B.; Scheller, P. R.; Du, S.: Proc. Int. Steel Conf. on New Materials in Metallurgical Process Technologies, METEC, 11–15 June 2007, Dusseldorf, Germany, pp. 265–272.
- [26] Kang, Y. J.; Sahebkar, B.; Morita, K.; Scheller, P. R.; Du, S.: Met. and Mat. Trans. B, 42B, 2011, No. 6, pp. 522–534.

THIELE ÁDÁM

A foszfor szerepe a vas archeometallurgiájában – a Somogyban folyó avar és honfoglalás kori vaskohászattól kezdve a korabeli damaszkolt pengéig

Az avar és honfoglalás kori vaskohászok Belső-Somogyban olyan foszfordús gyepvasérceket kohósítottak, amelyekből nagy foszfortartalmú, ún. foszforvasat állítottak elő. Ennek a speciális anyagnak a felhasználásával készültek a korabeli damaszkolt pengéjű kések és kardok.

Damaszkolt kés- és kardpengék archeometriai vizsgálatai alapján somogyi gyepvasércek próbakohósításával különböző kémiai összetételű bucavasakat illetve ezekből damaszkolt próbatesteket állítottunk elő. A próbatesteken elvégzett mechanikai anyagvizsgálatok során megállapítottuk, hogy a foszforvas felhasználásával készült középkori európai damaszkolt pengék esetében a damaszkolás mint eljárás, a szakirodalom ide vonatkozó megállapításaival és a közhiedelemmel ellentétben, nem módosította kedvezően a mechanikai tulajdonságokat, funkciója csupán a díszítés volt.

A cikkhez kapcsolódó PhD-dolgozat teljes terjedelmében letölthető az Országos Műszaki Könyvtár weblapjáról: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/1357>

1. A foszfor szerepe Somogy avar és honfoglalás kori vaskohászataiban

Bevezetés

Magyarország területén az elmúlt évtizedek iparrégészeti feltárásai során a középkori vaskohászat nyomaira bukkantak. Az egyik nagy vaskohászati centrum Somogyban volt, ahol avar és honfoglalás kori bucakemencék kerültek napvilágra, összesen nyolc régészeti feltárt lelőhelyen. A középkori Somogyban kétféle bucakemence típus volt használatban. Az avarok a szabadon álló avar vagy nemeskéri változatot használták, míg a honfoglaló magyarok a műhelygödör oldalfalába beépített fajszi típusú bucakemencét.

Korábban számos ún. próbakohósítást végeztünk el a fajszi típusú bucakemence másolatával (1. ábra) nyírségi (Fancsika, Bagamér és Léta-vertes környékéről származó) gyepvasérceket kohósítva. Ezek a gyep-

Thiele Ádám 2010-ben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME) gépészmérnöki diplomát, 2015-ben ugyanitt PhD-címet szerzett. Jelenleg a BME Anyagtudomány és Technológia Tanszékén egyetemi adjunktus, kutatási területe a vas archeometallurgiája, a középkori vasiparhoz köthető régészeti leletek archeometriai vizsgálata. Emellett díszműkovácsként dolgozik önálló vállalkozásban.