

ZULIANI, D. J. – SCIPOLO, V. – BORN, C.

## A költségek és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése konverteres és elektroacélgyártás során

**A karbon oxidálása meghatározó reakció minden acélgyártó eljárásban, ezért az acélgyártók számára nagy kihívást jelent, hogy keressék a lehetőségeket a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentésére anélkül, hogy az eljárás hatékonysága komolyan romlana. A dolgozat áttekintést ad az elektroacélgyártás és az oxigénes acélgyártás területén a termelékenység javulását, az üzemi költségek és az üvegházhatású gázok (GHG, greenhouse gas) kibocsátásának csökkentését célzó technológiák fejlődéséről.**

### 1. Üvegházhatású gázok kibocsátása az elektroacélgyártás során

A korszerű elektroacélgyártás (EAF, electric arc furnace) során a villamos energiát szén és szénhidrogének adagolásával egészítik ki, hogy ily módon csökkentsék az energia-költségeket, és a nagyobb termelékenység céljából növeljék az olvasztási sebességet. Ennek az energiabevitelnek rossz hatásfokú alkalmazása azonban növeli a közvetlen és a közvetett CO<sub>2</sub>-kibocsátást.

Az 1. táblázat olyan korszerű, 7 m átmérőjű EAF berendezés energiamelegét mutatja, amely vegyi és villamos energiát egyaránt használ az acélhulladék feldolgozásához. Az adatok azt mutatják, hogy az összes energiaforrást figyelembe véve a teljes energiabevitel hozzávetőleg 722 kWó/t<sub>folyékony acél</sub>-t tesz ki.

Ezen adatok elemzése érdekes módon azt jelzi, hogy az olvasztáshoz és a folyékony acélfürdő finomításához ténylegesen csak a teljes bevitt energia 54%-a

szükséges. A fennmaradó 46% elvész, ennek az energiavesztésnek a 70%-a a távozó gázokhoz kapcsolható (az összbevitel 15,5%-a érzékelhető hő, 16,9%-a pedig vegyi energia el nem égett CO és H<sub>2</sub> formájában).

A távozó gáz nagy energiataartalma alapján világos, hogy annak érzékelhető hő- és vegyienergia tartalmát kell csökkenteni a veszteségek csökkentésére, ha eredményt akarunk elérni az elektroacélgyártás energiafelhasználása és az ezzel összefüggő GHG-kibocsátás csökkentése terén.

#### 1.1 A vegyi energia optimalizálása az elektroacélgyártás során

Az EAF-eljárás energiahatásfokának és a kapcsolatos GHG-kibocsátásnak Thomson és társai által 2000-ben végzett vizsgálata szerint egy tonna acélra mintegy 100 kg közvetlen CO<sub>2</sub>-kibocsátás és további 255–345 kg közvetett CO<sub>2</sub>-kibocsátás esik, feltételezve, hogy a villamosenergia-ter-

melés során a fosszilis tüzelőanyag részaránya 32 és 68% között változott [1].

Az eljárás hatékonyságának javítása és a GHG-kibocsátás csökkentése céljából Thomson az iparba újonnan bevezetett Efsop folyamatos, valós idejű gázelemző technológiát használta a kemencében történő utóégetés szabályozásához és optimalizálásához, miközben változtatta az égő, a lándzsa és az injektor alkalmazásának gyakorlatát (1. ábra). Thomson beszámolt arról, hogy a technológiai energia ennek eredményeként megnövekedett hasznosulása 40 kWó/t-ig terjedő értékkel csökkentette a fajlagos villamosenergia-fogyasztást. További előny volt, hogy a kombinált, közvetlen és közvetett GHG-kibocsátás is 35 kg CO<sub>2</sub>-egyenértékkel csökkent tonnánként (68%-ban fosszilis energiájú villamosenergia-termelést feltételezve, mint pl. az USA-ban).

Az EAF-eljárás energiaoptimalizálása az egyszerű, égés utáni optimalizálásból utóbb „holisztikusabb” megközelítéssé fejlődött, amely a teljes gyártási folyamat optimalizálására irányul, hogy ily módon a legnagyobb vegyi- és villamosenergia-megtakarításokat éri el a technológiai energiavesztés és a GHG-kibocsátás minimalizálása mellett.

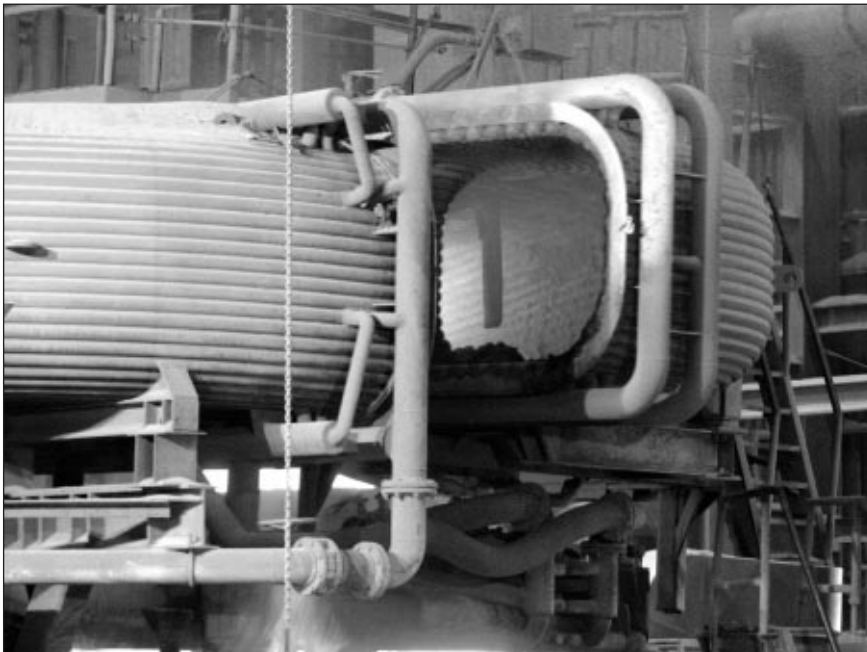
A holisztikus optimalizálás elfogadott gyakorlat a hatékony EAF acélművekben, beleértve a hagyományos, szakaszos működésű kemencéket, a folyamatos ócskavas-adagolású kemencéket (Consteel) és a folyamatos DRI-adagolású kemencéket (DRI a vastartalmú anyagok direkt redukciója során keletkező színvas). Thomson eredeti munkája közel 10 évvel ezelőtt készült. Azóta világszerte több mint 43 EAF-kemencét szereltek fel ezzel az ún. Efsop technológiával (Expert Furnace System Optimization Process), amelyeknél az EAF-folyamat holisztikus optimalizálásához fo-

**Douglas J. Zuliani PhD** értékesítési és üzletfejlesztési igazgató és **Vittorio Scipolo** kutatás-fejlesztési menedzser, *Tenova Goodfellow Inc., Mississauga, Kanada*; [goodfellow@ca.tenovagroup.com](mailto:goodfellow@ca.tenovagroup.com)

**Carsten Born**, *Tenova Italimpianti Deutschland GmbH, Düsseldorf, Németország*.

A dolgozat a Clean Technologies in the Steel Industry című, 2009 márciusában Budapestre tervezett nemzetközi konferenciára benyújtott és elfogadott előadás. A konferenciát a kialakult globális acélipari válság miatt 2011-re kellett halasztani.

A dolgozat angol nyelven a Stahl und Eisen 2009 szeptemberi számában is megjelent.



■ **1. ábra.** Efsop gázelemző működő EAF-kemencéhez csatolva (Gerda MacSteel, USA)

lyamatos elmenőgáz-elemzést használnak második szintű SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) interfésszel, amint azt a 2. ábra vázlatosan mutatja.

A 2. táblázatban bemutatott eredmények szerint az Efsop alapú, elmenőgáz-optimalizáló technológiát használó elektrokemencékkel kapcsolatban lényegesen kisebb teljes energiafogyasztásról és közvetlen GHG-kibocsátásról számoltak be amellett, hogy az üzemi költségek is lényegesen csökkentek a termelékenység növekedése mellett. A távozó gáz elemzési eredményeit a következőkre használják:

- az égő, a lándzsa és az injektor alkalmazásának optimalizálása és dinamikus vezérlése;
- az adagolókosár és a betét darabméreteinek optimális elosztása az adag karbonhasznosításának javítása céljából;
- a füstgázrendszer működésének optimalizálása és dinamikus vezérlése a túl nagy mennyiségű felesleges levegő bejutásából származó energia-vesztés minimalizálása céljából; és
- a villamosenergia-bevitel összehan-

golása az optimalizált kémiai energia bevittel olyan módon, hogy növeljék az olvasztási sebességet, csökkentsék az áramfogyasztási időket és maximalizálják a termelékenységet.

Mint a 2. táblázat mutatja, az Efsop rendszerrel ellátott EAF acélművekben több mint 2 USD/t<sub>folyékony acél</sub>-al csökkentek az üzemi költségek, és 4,6%-kal növekedett a termelékenység. Fontos, hogy a költség és a termelékenység jelentős javulása mellett a GHG-kibocsátás is átlagosan mintegy 18%-kal (10–20 kg CO<sub>2</sub>/t<sub>folyékony acél</sub>) csökkent. Ezen felül a vegyi energia jobb hasznosítása általában 14 kWh/t<sub>folyékony acél</sub>-al csökkenti az áramfogyasztást is. Emiatt olyan országokban mint Kanada, ahol az áramtermelésben 25% a fosszilis fűtőanyag ará-

nya, a közvetett GHG-kibocsátás további 3,1 kg/t<sub>folyékony acél</sub>-al csökkent. A csökkenés mértéke 8,4 kg/t<sub>folyékony acél</sub> az Egyesült Királyságban és az USA-ban, ahol az áramfejlesztésnél hozzávetőleg 68% a fosszilis fűtőanyag aránya (ez a számítás egyszerű becslésen alapul, miszerint a GHG-kibocsátás átlag 8,8 g/kWh a fosszilis fűtőanyag arány egy százalékára vonatkoztatva [2]).

### 1.2 A távozó gáz érzékelhető energiájának visszanyerése az EAF esetében

Mint az 1. táblázatban látható energiamegérlet mutatja, az EAF-be bevitt energiának közelítően 15,5%-a vész el a távozó gáz érzékelhető hőjeként. Ha ehhez hozzáadjuk az el nem égett CO energiatartalmát, ami az utánégető kamrában ég el, a visszanyerésre alkalmas teljes hőenergia mennyisége jóval meghaladja az EAF energiabevitelének 25%-át; a távozó gáz energiatartalmára szükség van a távozó gáz hőjének gazdaságos visszanyeréséhez.

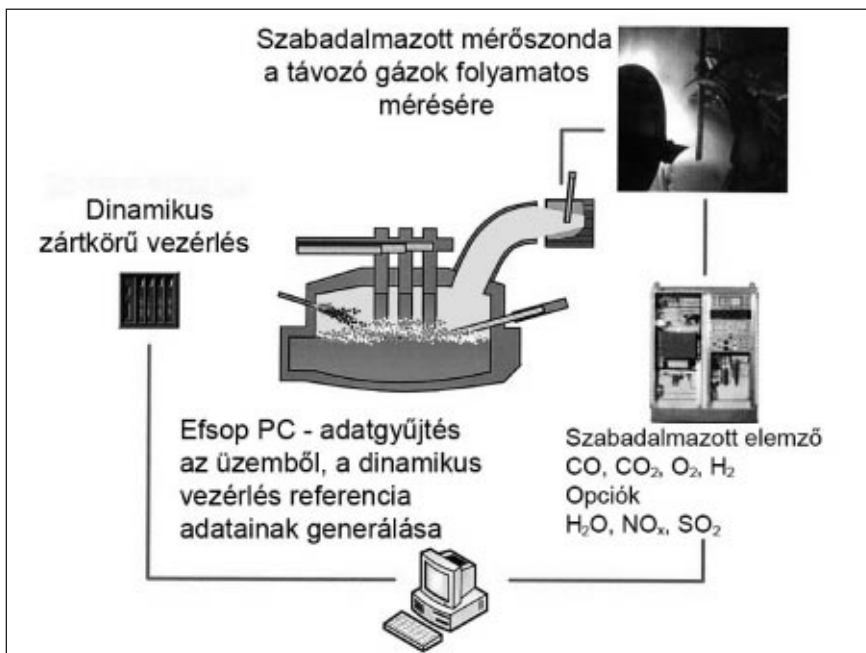
A potenciálisan jelentős előnyök ellenére a gyakorlatban az EAF-ból távozó gázból a hő visszanyerését nem alkalmazzák számottevő mértékben, egyrészt a füstgázrendszerben fennálló kíméletlen környezeti körülmények, másrészt az eljárás szakaszos volta miatt.

A hagyományos EAF technológiánál víz-hűtésű elmenőgáz-kezelő rendszereket használnak annyi 400–500 kPa nyomású hűtővízzel, hogy a forró, kb. 1300 °C hőmérsékletű elmenő gáz 700 °C alá hűljön, mielőtt elhagyná a vezeték hűtött részét a végső lehűlés előtt. Mivel a felmelegedett hűtővíz nyomása nem elég nagy, és a hőmérséklete sem elég magas a gyakorlati felhasználáshoz, általában párologtató hűtőtornyokba szivattyúzzák, ahol a technológiából származó hő a légkörbe jut.

Felismerve a jelentős energiamegtakarítások lehetőségét, a Tenova Italimpianti Deutschland GmbH az ECS technológiát (Evaporative Cooling System, párologtató hűtőrendszer) vezette be elektrokemencéknél a hővisszanyeréshez. A hagyományos kisnyomású víz-hűtésű vezeték ma már olyan nagynyomású kazáncsővekkel lehet kiváltani, amelyeket arra terveztek, hogy az EAF füstgázrendszer

**1. táblázat.** Korszerű EAF-kemence energiamegérlete

		kWó/t <sub>foly. acél</sub>	Összes energia %-ában
<b>Bevitt energia</b>	Villamos energia	400	55,4
	Vegyi energia - égők	80	11,1
	Vegyi energia - oxidáció	220	30,5
	Olaj + szénhidrogének	22	3,1
	<b>Összes energiabevitel</b>	<b>722</b>	<b>100</b>
<b>Távozó energia</b>	Acél	388	53,7
	Salak	46	6,4
	Elmenő gáz, érzékelhető	112	15,5
	Elmenő gáz, vegyi	122	16,9
	Víz-hűtés	54	7,5
	<b>Összes távozó energia</b>	<b>722</b>	<b>100</b>



■ **2. ábra.** Az Efsop technológia alkalmazása az EAF acélgyártásnál

kíméletlen körülményeit 1500-4000 kPa közötti nyomásokon is elviseljük, pl. 2000 kPa nyomáson a víz forráspontja 215 °C-ra nő. Az ECS technológiát arra tervezték, hogy a párolgási hő 215 °C-os nagynyomású gőz előállítására hasznosítsák a hulladékgáz-vezeték hűtött részét elhagyó gáz hőmérsékletét mintegy 600 °C-ra csökkentve.

A keletkező nagynyomású gőzt üzemű gőzfejlesztő kazán kiegészítésére vagy kiváltására lehet használni az üzemen belül alkalmazott olyan technológiákhoz, mint pl. a vákuumos gáztalanítás vagy a DRI-termelés HyL-eljárással (Hylsa, Mexikó). Az EAF technológiai ciklusainak kiegyenlítéséhez gőzgyűjtő tartályokat alkalmaztak, így a Tenova Italimpianti technológiája 140 t/h teljesítményű EAF-ból 20 t/h átlagteljesítménnyel folyamatos gőztermelésre volt képes. Ehhez hasonló gőzmennyiséget termelő kazán majdnem 13 000 kW/h energiát fogyasztana. Így az EAF-ból távozó gáz hőjének visszanyerésével az azal egyenértékű teljesítményű kazán CO<sub>2</sub>-kibocsátása (széntüzelés esetén közel 112 500 t/év, földgáztüzelés esetén pedig 57 000 t/év) elkerülhető.

Második szakasz alkalmazására is lehetőség van, ahol az elmenő gáz szokványos hűtését hulladékhő-kazánnal helyettesítik, és így az elmenő gáz hőmérsékletét ~600 °C-ról ~200 °C-ra csökkentik. A kombinált hővisszanyerés az ECS-sel és a

hulladékhő-kazánnal a hulladékgáz teljes energiataralmának 75-80%-át éri el, ami az elsődleges energiabevétel közel 20%-át teszi ki.

Olyan esetekben, amikor az EAF hőjének visszanyeréséből származó gőz iránti igény nem elég nagy, az ORC alapján működő (Organic Rankine Cycle, szerves Rankin-körfolyamat) turbina alkalmazásával áramot lehet termelni. Az ORC-generátorok alkalmazása lassan általánossá válik az érintett ipari hővisszanyerési technológiáknál, tipikusan max. 20% hatékonysággal üzemelnek. Ennek alapján úgy

**2. táblázat.** Az elmenő gázok optimalizálásával elért átlagos megtakarítások az összes Efsop rendszerrel ellátott EAF figyelembevételével

Előnyök	Acélművek adatai a projekt teljesítésekör	Megtakarítások az összes befejezett Efsop installációnál (2008. december)	
<i>Üzemi költség</i>	- USD/t <sub>foly. acél</sub> költségmegtakarítás villamosságból, karbonból, fűtőanyagból és oxigénből	Átlagos megtakarítás	2,14 USD/t <sub>foly. acél</sub>
		Legkisebb megtakarítás	1,00 USD/t <sub>foly. acél</sub>
<i>Energia</i>	- Villamosság	Átl. megtakarítás	14 kWh/t <sub>foly. acél</sub>
	- Gáz és fűtőanyag	Átl. megtakarítás	1,1 m <sup>3</sup> /t <sub>foly. acél</sub>
	- Injektált karbon	Átl. megtakarítás	1,0 kg/t <sub>foly. acél</sub>
	- Adagolt karbon	Átl. megtakarítás	1,4 kg/t <sub>foly. acél</sub>
	- Teljes energia az EAF-ban (kWh egyenérték)	Átl. megtakarítás	29,0 kWh/t <sub>foly. acél</sub>
<i>Víz detektálása</i>	- Valós időben észlelt vízszivárgások	>85%	
<i>Termelékenységi</i>	- Áram alatti idő - POT	Átl. megtakarítás	2,1 perc/adag
	- Termelékenység, t <sub>foly. acél</sub> /POT	Átl. növekedés	4,6%
	- Kihozatal, %	Átl. növekedés	0,4%
<i>Környezet</i>	- CO <sub>2</sub> -csökkenés	Átl. csökkenés	17,9%

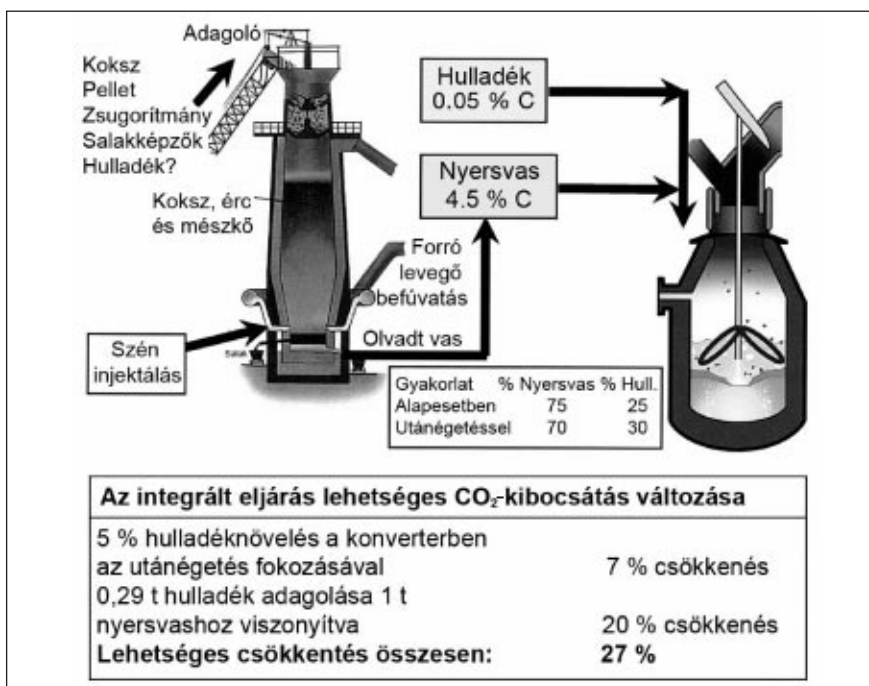
\*Szabványos hőmérséklet és nyomás

becsülhető, hogy mintegy 4 MW villamos energiát lehet termelni egy közepes méretű EAF-ból. Ez évi 24 000 MWh villamos energiát jelent, ami 7,5%-os megtakarítás a nettó villamosenergia-felhasználásban, vagy 2,73 t/év GHG-kibocsátás csökkenés a fosszilis fűtőanyag egy százaléka-ra vonatkoztatva az erőműnél.

Összegezve, a Tenova Goodfellow Efsop technológiáját a Tenova Italimpianti hővisszanyerésre vonatkozó technológiájával kombinálva jelentősen növelhető az EAF technológia energiahatékonysága, és ennek megfelelően lényegesen csökken a GHG-kibocsátás.

## 2. GHG-kibocsátás az integrált acélgyártásban

Technológiai tömegmérték alapján úgy becsülhető, hogy egy tipikus integrált acélmű kb. 1760 kg CO<sub>2</sub>-t bocsát ki egy tonna nyersacélra számítva, ami négyszer-öttször több, mint egy hagyományos EAF-mű fajlagos kibocsátása. Az integrált technológia GHG-kibocsátásának kb. 70%-a a nagyolvasztóval függ össze, 8%-a az oxigénes konverterből (BOF) származik, a többi a különböző betétanyagok előállításához kötődik. Arra lehet következtetni, hogy az integrált eljárásnál a GHG-kibocsátáshoz hozzájáruló legnagyobb tényező a vas-oxidok redukálásához használt karbon. Ezért az integrált eljárásban az acélhulladék arányának növelésével eredményesen csökkenthető az egy tonna acélra jutó GHG-kibocsátás.



■ 3. ábra. A GHG csökkentésének lehetősége az utánégetés fokozásával a konverterben és acélhulladék adagolásával a nagyolvasztóban

### 2.1 Lehetőség a nagyolvasztó GHG-kibocsátásának csökkentésére

1998-ban *Austin* és társai [3] darabolt acélhulladék nagyolvasztóba adagolásának tapasztalatairól számoltak be. Az eredmények azt mutatták, hogy optimális adagolási megoldásokkal az ócskavas hozzáadása jelentős mértékben csökkentheti a kokszigényt és növelheti a termelékenységet.

*Ryman* és *Larsson* [4] újabban az üvegházhatású gázok kibocsátási modelljének segítségével vizsgálta az acélhulladék nagyolvasztóba adagolásának az egy tonna acélra jutó GHG-kibocsátásra gyakorolt hatásait az integrált zsugorító-pellet-nagyolvasztó-BOF eljárásnál. A modellezési eredmények azt mutatták, hogy a teljes hulladékarány 20%-ról 50%-ra növelése a nagyolvasztóba történő 289 kg hulladék/t nyersvas hozzáadásával az integrált technológiában mintegy 19%-kal csökkenti a közvetlen és a közvetett GHG-kibocsátást.

A fenti vizsgálat szerint az acélhulladék adagolása a nagyolvasztó betéjébe csökkenti a nyersvasgyártáshoz szükséges karbonmennyiséget, és ezáltal a GHG-kibocsátás körülbelül 330 kg-mal csökken az integrált eljárással gyártott acél egy tonnájára számítva.

### 2.2 A GHG-kibocsátás csökkentésének lehetősége oxigén konverteres acélgyártásnál

Míg az EAF vegyi és villamos energia betáplálást igényel, az oxigén konverte-

3. táblázat. CO<sub>2</sub> emisszió csökkenés a fajlagos acélhulladék arányának növeléséből integrált acélgyártásnál

BOF gyakorlat		Alapeljárás	Utánégetés a kemencében
BOF nyersvas fém, %		75,0	70,0
BOF acélhulladék, %		25,0	30,0
Fémkihozatal, % *		87,0	87,4
Teljes CO <sub>2</sub> -kibocsátás, integrált eljárás			
Kokszoló mű	kg CO <sub>2</sub> /kg koksz **	0,8	0,8
	kg koksz/t acél	294,0	273,1
	kg CO <sub>2</sub> /t acél	237,3	220,4
Pelletező mű	kg CO <sub>2</sub> /kg pellet ***	0,1	0,1
	kg pellet/t acél	1200	1100
	kg CO <sub>2</sub> /t acél	141,5	131,1
Nagyolvasztó	kg CO <sub>2</sub> /kg HM ****	1,4	1,4
	kg nyersvas/t acél	862,1	800,9
	kg CO <sub>2</sub> /t acél	1243,1	1154,9
BOF-ból eltávozott karbon	kg/t acél	38,7	36,0
	kg CO <sub>2</sub> /t acél	141,9	132,0
Összes CO <sub>2</sub>		1764	1638
Redukció, %		0,0	7,1

\* A kihozatal 0,4%-os növekedése utánégetés esetén, az Efsop-pal javított végpont-szabályozás következtében

\*\* Queensland Kokszoló és Erőmű projekt – Környezetvédelmi nyilatkozat

\*\* CEPS célkitűzés az Iparági Klímaváltozási Megközelítésekkel, Acélszektor, Brüsszel, 2007. okt.

\*\*\*\* BF eljárás tömegmérleg modellel számítva

res acélgyártó eljárásnál az exoterm reakciók elegendő hőt fejlesztenek a karbon és más elemek (Si, Mn, Fe) oxidációja révén.

Normál fűvátási körülmények között üzemelő felső lándzsás BOF konverter esetében a konverter száját elhagyó gáz 85–90%-a CO [5, 6], a többi a konverter belsejében CO<sub>2</sub>-vé utóégett gáz. Ezzel a tipikus fűvátási gyakorlattal elegendő hő képződik a mintegy 75% nyersvasból és 25% szilárd vashulladékból álló betét feldolgozásához. Összehasonlításként, egy forgó Kaldo konverterben a teljes CO mennyiség kemencén belüli utóégetésével a betét ócskavastartalmát 38%-ra lehet növelni [7].

*Ryman* és *Larsson* [4] GHG modelljükkel a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentésének lehetőségét vizsgálták a nyersvas szilíciumtartalmának növelésével, hogy az ilyen módon keletkező pótlólagos oxidációs hővel növelhessék az acélhulladék arányát a BOF konverterben. Ebben az esetben azonban az eredmény a legjobb esetben is elhanyagolható volt, mivel a nyersvas nagyobb Si-tartalmának biztosításához növelt kokszarányra és a BOF-ben nagyobb salakmennyiségre van szükség, ami pótlólagos GHG-kibocsátáshoz vezet. *Zuliani* [8] másutt arról számolt be, hogy az utóégetés fokozá-

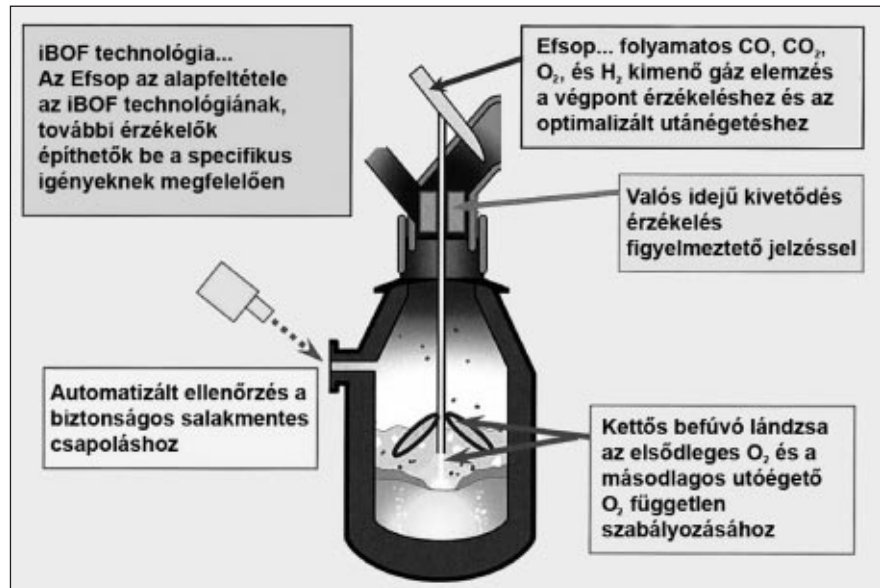
sával a konverterben 3–6%-kal (egy esetben 11%-ig terjedő értékkel) növelhető a BOF-ben a hulladék részaránya. Megvizsgálták a növelt ócskavasbetét-arányok megvalósításához szükséges fő tényezőket, köztük az alábbiakat:

- módszerek másodlagos O<sub>2</sub> hatékony befúvásához, elősegítendő a CO-nak CO<sub>2</sub>-vé oxidálását a konverteren belül; és
- módszerek az elmenő gáz, valamint a folyékony és szilárd fázisok közötti hőátadás hatékonyságának a növelésére a konverteren belül.

Az utóégetés növelésével a BOF konverterben hatékonyan használható fel egy olyan energiaforrás, amely egyébként eltávozna a füstgázvezetékén. Az olyan helyzeteket kivéve, ahol az elmenő gáz vegyi energiáját a folyamatban utóbb másutt fűtőanyagként hasznosítják, a hagyományos acélgyártásnál a folyamat során keletkezett CO többsége elhagyja a kemencét, majd a környezetből a vezetékbe szívott levegővel CO<sub>2</sub>-vé oxidálódik a füstelvezető rendszerben. Mivel a karbon teljes oxidációja CO<sub>2</sub>-vé 3,5-szer több hőt szabadít fel, mint a CO-vá való részleges oxidáció, a CO CO<sub>2</sub>-vé való utóégetésével jelentős költségmentes energiaforráshoz jutunk, feltéve, hogy a hő hatékonyan hasznosul, mielőtt az elmenő gáz kilépne az acélgyártó kemencéből.

A 3. táblázat összefoglalja az integrált acélgyártó eljárásban a BOF konverteren belüli fokozott utóégetéssel elért 5%-os hulladékarány-növelés számított hatásait a fajlagos CO<sub>2</sub>-kibocsátásra. Mint látható, a hulladékarány növelése a BOF eljárásnál csökkenti az egy tonna acélra jutó nyersvas-, koks- és pelletigényt, ami együttesen mintegy 7%-kal, ill. 125 kg-mal csökkenti az egy tonna acélra jutó CO<sub>2</sub>-kibocsátást.

A 3. ábra, Ryman és Larsson javaslatának megfelelően, egy BOF adag ócskavasarányának 5%-os (25-ről 30%-ra) növeléséből származó kombinált előnyöket szemlélteti a konverterben való hatékonyabb utóégetés és a nagyolvasztóba történő vashulladék-adagolás révén. A nettó hatás az integrált eljárás GHG-kibocsátásának nagyon lényeges, 27%-os csökkenése a tipikus, hagyományos BOF-eljáráshoz képest, ahol a nyersvasat 100% vasércalapú betéttel állítják elő.



■ 4. ábra. Az iBOF technológia elemei

### 2.3 Az elmenő gáz hőjének visszanyerése BOF acélgyártásnál

A BOF acélgyártó konvertereknél az EAF-hoz viszonyítva szélesebb körben használják az ECS technológiát. Míg egyes művek fűtőanyagként hasznosítják a CO-ként elmenő gázt, sok más helyen egyszerűen elvesztik ezt az energiát, fáklában égetve el azt.

A fáklá alternatívájaként hulladék hőkazánt lehet telepíteni, hogy abban gőzt termeljenek a CO elégetésével. Mivel a gőztermelés nagysága szabályozható a kazánban elégetett CO mennyiségével, ez a konfiguráció könnyen tervezhető állandó gőztermelésre, sokkal kisebb gőzpufferral, mint az EAF elmenő gáz hővisszanyerése esetében. Például az oxigénfúvatási időszakok alatt, amikor sok CO keletkezik, a CO-nak csak egy részét égetik el a kazánban, a többit tárolják. Hogy fenntartsák az állandó gőzszolgáltatást, azokban az időszakokban, amikor nincs oxigénfúvatás, a korábbi adagokból származó CO előzetesen tárolt részét égetik el.

### 2.4. iBOF – új generációs technológia a BOF energiahatékonyságának javítására és GHG-kibocsátásának csökkentésére

Kulcsfontosságú partnerekkel együttműködve és az SDTC (Sustainable Development Technology Canada) nonprofit alapítvány közreműködésével a Tenova Goodfellow hároméves demonstrációs projektet indított, hogy az EAF ágazatnál

kipróbált Efsop technológiáját más ipari alkalmazásoknak, köztük a BOF acélgyártásnak, a cementgyártásnak és a kombinált, szén/biomassza tüzelésű villamos erőműveknek is átadja.

Mint arról másutt Zuliani beszámolt [8], a Tenova Goodfellownál jelenleg fejlesztik az új generációs, intelligens BOF (iBOF) technológiát. A 4. ábra vázlatosan szemlélteti az iBOF technológiai csomag legfontosabb elemeit. Mint látható, az Efsop elmenő gáz elemző technológiát fejlett szenzorok, hardver és szoftver eljárási modellek sorával integrálták:

- Efsop elmenőgáz-rendszer a javított végpontdetektáláshoz szubláncza vagy Celox-bombák alkalmazása nélkül, az utóégetés optimalizálásához és a láncza dinamikus vezérléséhez;
- kettős áramlású lánczatechnológia, amely lehetővé teszi a dekarbonizálásra szolgáló elsődleges O<sub>2</sub> és a fokozott utóégetésre szolgáló másodlagos O<sub>2</sub> áramlásának független vezérlését;
- a lánczsarezgés frekvenciaváltozásainak ellenőrzésén alapuló kidobódás-észlelő technológia. Mind a nagy, mind a kis frekvenciájú rezgést megfigyelik, hogy a kifröccsenés bekövetkezését és súlyosságát előre jelző információhoz jussanak;
- automatizált csapolásvezérlési technológia a biztonság javításához, a salakátvitel minimalizálásához és az üzemi költségek csökkentéséhez.

A Tenova Goodfellow által tervezett iBOF-rendszer a BOF üzemeltetőket olyan

**4. táblázat.** Energia és GHG-kibocsátás csökkentési lehetőségek az EAF és BOF eljárásnál (összefoglalás)\*\*\*

a. EAF eljárás, 1 Mt/év termeléssel

	Energia-megtakarítás, MWó/év	GHG-megtakarítás, t/év
<b>Efsop optimalizálás EAF-ban</b>		
- Közvetlen megtakarítások **	15 000	10 000-20 000
- Közvetett megtakarítások **	14 000	8380 *
<b>Hőviszanyerés az elmenő gázból</b>		
-20 t/óra gőz kiváltása folyamatos széntüzeléshez viszonyítva	96 600	112 130
- Plusz áramfejlesztés *	28 800	20 970 *

\* 68%-os fosszilis fűtőanyagú áramfejlesztést feltételezve az USA-ban és Angliában

\*\* 15 kWó (egyenérték)/ $t_{\text{foly. acél}}$  közvetlen megtakarítás

\*\* 14 kWó/ $t_{\text{foly. acél}}$  közvetett megtakarítás

\*\*\* Évi 300 üzemelési napot feltételezve

b. BOF eljárás, 1 Mt/év termelésre vonatkoztatva

	Fajlagos GHG-megtakarítás, kg/t	GHG-megtakarítások, t/év
<b>BOF végpont detektálás és utánégetés</b>		
- Kombinált megtakarítások; BOF, nagyolvasztó, kokszoló mű, pelletező mű	125	125 400
<b>Acélhulladék-adagolás nagyolvasztóba</b>		
- 289 kg hulladék adagolása 1 t nyersvasra vonatkoztatva	332	332 000

elenjáró technológiával látja el, amely valós idejű folyamatvezérlést és optimalizálást képes biztosítani az Efsop-rendszer hasznosításával:

- tökéletesíti a végpontdetektálást költséges és karbantartás-igényes szublándsza vagy Celox-bomba alkalmazását feltételező technológia nélkül;
- valós időben követi a változó gyártási körülmények hatását a kemencén belüli utóégetés százalékarányára a fúvatás során;
- meghatározza a kettős áramlású lándsza konstrukciók jellemzőinek az optimumát a különböző BOF konfigurációkhoz és a gyakorlathoz, beleértve a másodlagos O<sub>2</sub>-fúvóka pozicionálását és dőlését, valamint a sugár behatolását. Ez fontos tényező a maximális hőátadást és a minimális tűzállóanyag- és lándsakopást biztosító optimális utóégetési zóna kialakítása szempontjából;
- a kettős áramlású lándszával együtt dinamikusan képes szabályozni a lándsaműködés dinamikáját, benne a magasságot és az elsődleges és másodlagos O<sub>2</sub> megfelelő áramlási érté-

keiket, a konverterben való utánégetés termelékenységeinek és százalékarányának a fúvatás alatti valós időben történő optimalizálásával;

- a szlopdetektáló érzékelővel és a kettős áramlású lándszával együtt először a kivetődés (szlop) fellépését detektálják, majd valós időben a másodlagos O<sub>2</sub>-áramlás növelésével csökkentik a hatásait, mivel az utánégetés fokozásával gyorsítják a salak hevítését és csökkentik a viszkozitását.

A munka ennek a projektnek az első szakaszában az Efsop elmenő gáz elemzési technológia használatára összpontosult azzal a céllal, hogy más érzékelők és folyamatmodellek együttes alkalmazásával javítsák a BOF végpontdetektálását, ezáltal maximalizálják a termelékenységet és a kihatalt, csökkentsék az üzemelési költségeket és minimalizálják a GHG-kibocsátást. Miután az első alkalmazás során az adagok több mint 90%-a  $\pm 0,012\%$  C értéken belül volt, az Efsop végpontdetektálási technológiát teljesen kifejlesztették és iparilag bevezették [9, 10]. Egy második, 360 tonnás BOF konvertert jelenleg szerelnek fel az Efsop-

rendszerrel és a szlopdetektáló technológiával együtt. Ennek a második alkalmazásnak a kezdeti eredményei igazolják, hogy a technológia a szublándsza befúvatás indulását követő első leolvasásnál  $\pm 20$  °C-on, ill.  $\pm 0,14\%$  -on belüli, a fúvatás végpontjánál pedig  $\pm 15$  °C-on és  $\pm 0,009\%$ -on belüli pontossággal jelzi előre a hőmérséklet, ill. C-tartalom adatait. Az iBOF-rendszer 87%-os szlopdetektálási arányt is eredményez, 20–40 másodperccel azelőtti figyelmeztetéssel, hogy a fém kidobódása a konverterből vizuálisan láthatóvá válna. Az iBOF technológiai fejlesztési program második szakasza rövidesen megkezdődik, ez az utánégetés vezérlésére és optimalizálására fog összpontosulni, a kidobódás érzékelésével és csökkentésével együtt. Várható, hogy a teljes iBOF technológiai csomag 2009 vége előtt a kereskedelemben is elérhető lesz.

### 3. Összefoglalás

Mivel az EAF acélgyártás során az energiaveszteségek majd 70%-a az elmenő gázokhoz kapcsolódik, az energiahatékonyság javítása és a GHG-kibocsátás csökkentése érdekében az elmenő gáz érzékelhető és kémiai energiaveszteségeinek a minimalizálására van szükség. Világszerte 43 Efsop elmenő gáz alapú folyamatvezérlési rendszer tapasztalatai szerint a vegyienergia-optimalizálás az acélművekben jelentős üzemeltetési költségcsökkentést, termelékenységgjavulást, közvetlen és közvetett GHG-kibocsátás csökkenést eredményezett. Mint a 4a. táblázat mutatja, az Efsop vegyienergia-optimalizáló technológiát a Tenova Italmimpianti hőviszanyerési technológiájával kombinálva lehetőség nyílik az EAF energiafelhasználásának és GHG-kibocsátásának jelentős csökkentésére is.

A vas-oxidok karbonnal történő redukálása az integrált acélgyártásban jelentősen növeli az egy tonna acélra jutó GHG-kibocsátást az EAF-hoz képest. A közleményben ismertetett elemzés alapján az integrált eljárásban felhasznált hulladékvas fajlagos mennyiségének a növelése jelentős lépés a GHG-kibocsátás csökkentésében. Mint a 4b. táblázat mutatja, a teljes CO<sub>2</sub>-kibocsátás 27%-os (több mint 455 kg CO<sub>2</sub>/t-ra becsült) csökkentése lehetséges hulladékvas bevitelével a nagyolvasztó adagjába, vala-



mint a hulladékvas arányának növelésével a fokozott utánégetés révén a BOF-ben. További energia- és GHG-megtakarítás lehetséges a BOF művekben az elmenő gáz hőjének hatékony visszanyerésével.

A Tenova Goodfellows a közelmúltban indította az intelligens iBOF-technológiát, amely az Efsop elmenőgáz-elemző technológiát más fejlett érzékelőkkel és eljárásmodellekkel együtt alkalmazza. Mindezt a BOF üzemeltetési költségek csökkentése, a termelékenységi és a kihozatal növelése, valamint a GHG-kibocsátás csökkentése érdekében tervezték a tökéletesített BOF végpontdetektálás révén, a kemencében való növelt utánégetés, a növelt hulladékvas-adagolás és a csökkent kidobódás tovább növelte a hatékonyságot.

## Irodalom

- [1] Thomson, M. J. – Evenson, E. J. – Kempe, M. J. – Goodfellow, H. D.: Ironmak. Steelmak., 27 (2000) No. 4, p. 273.
- [2] National Inventory Report, 1990-2005: Greenhouse gas sources and sinks in Canada, Annex 9: Electricity intensity tables, link: [http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/inventory\\_report/2005\\_report/a9\\_eng.cfm#ta9\\_1](http://www.ec.gc.ca/pdb/ghg/inventory_report/2005_report/a9_eng.cfm#ta9_1)
- [3] Austin, P. R. – Nogami, H. – Yagi, J. – I.: ISIJ Intern. 38 (1998) No. 7, p. 697.
- [4] Ryman, C. – Larsson, M.: ISIJ Intern. 46 (2006) No. 12, p. 1752.
- [5] Okuda, H. – Take, H. – Yamada, T. – Fritz, K.: Trans. ISIJ 25 (1985) No. 11, p. 291.

- [6] Vensel, D. A. – Henein, H. – Dauby, P. H.: A thermodynamic analysis of decarburization and post combustion in the BOP, Proc. 68. Steelmaking Conf., 14-17 Apr 1985, Detroit, USA, p. 67.
- [7] Kalling, B. – Johansson, F.: J Iron Steel Institute 192 (1959) No. 8, p. 330.
- [8] Zuliani, D. J.: Metal Prod. Proc. (2009) March/April, p. 13.
- [9] Maiolo J. – Zuliani, D. J.: Metal Prod. Proc. (2008) Nov/Dec, p. 15.
- [10] Scipolo, V. – Maiolo, J. – Li, C. W. – Goldberg, B. – Zuliani, D. J.: Application of Efsop holistic optimization technology to oxygen steelmaking, AISTech 2008, 5-8 May 2008, Pittsburgh, USA.

## THIELE ÁDÁM – BÁN KRISZTIÁN

# A bucavaskohászat kora középkori technológiája a megvalósíthatóság tükrében

**A közelmúlt egyik szerencsés folyamata, hogy a régészet tudományához kapcsolódóan vagy azon belül egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek korabeli tárgyak, folyamatok, események reprodukálására. A tisztán tárgyi leletekre és leírásokra támaszkodó tudományos következtetések sokszor nem pontosak, ezért nem teljesen tükrözik a korabeli lehetőségeket, körülményeket (pl. egy feltárt fegyver vagy szerszám használatáról és a használat körülményeiről addig biztosat nem mondhatunk, amíg egy hozzáértő szakember ki nem próbálta). A jelen írás egy ilyen technikátörténeti kísérlet, pontosabban a kora középkori bucavaskohászat modernkori felelevenítésének eredményeit mutatja be.**

### Bevezetés

A technikai társadalom kialakulásában nagy szerepet játszott a vas, amelynek kiemelt jelentősége tág határok között változtatható tulajdonságaiban, jó megmunkálhatóságában, viszonylag egyszerű előállításában van. A vas története azonban nem csak tech-

nikátörténeti, hanem gazdaság- és hadtörténeti jelentőséggel is bír. A gazdaságtörténeti jelentőség esetében gondoljunk a mezőgazdasági szerszámokra vagy arra, hogy a vas adta majdnem minden mesterség szerszámainak anyagát. A hadtörténeti vonatkozások a kora középkori fegyverek szempontjából szintén egyértelműek.

**Thiele Ádám** 2004-ben a karcagi Gábor Áron Gimnáziumban érettségizett. Jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a Közlekedésmérnöki Kar Gépészmérnöki Szak Járműgyártás és -javítás szakirány hallgatója. Az archeometallurgia, ezen belül a középkori bucavasgyártás technológiája iránt érdeklődik.

**Bán Krisztián** PhD fokozattal rendelkező okl. gépészmérnök, jelenleg a BME Járműgyártás és -javítás Tanszékén adjunktusként dolgozik. Főként anyagvizsgálatokkal és a nem egyensúlyi ötvözetek vizsgálatával, valamint amorf ötvözetek szerkezeti és mágneses tulajdonságainak kutatásával foglalkozik.

Ha a kora középkori vasgyártásról beszélünk, akkor ez alatt bucavasgyártást kell érteni. A bucavas szivacsos szerkezetű salakos vas, amelyet kis, szakaszos üzemű, faszéntüzelésű bucakemencében állítottak elő. Egy szerkezetében tipikus bucavas keresztmetszetét láthatjuk az 1. ábrán, ahol jól megfigyelhető a szivacsos, salakos szerkezet.

A kora középkori vasipar kutatását az archeometallurgia végzi, amely a vasmetallurgia és a régészet közötti interdiszciplináris terület. Ma a bucavas korabeli, korhű gyártástechnológiáját „próbaolvasztások” keretében kutatják. Magyarországon a kora középkori vasipar archeometallurgiai kutatása európai mércével mérve nem jelentős. Míg a nyugat-európai országokban már kísérleti régészeti kutatások keretében a kora középkori vasgyártás rutinszerűen működik, addig nálunk még a bucavas előállításának többszöri megismételhetősége sem megoldott. A külföldi kutatások azonban nem magyar ércekkel, nem magyar kohótípusokkal folynak, így azok eredményei nem ültethetők át egy az egyben a magyar archeometallurgiába. Ezen kívül nagyobb részük