

Az acélgéártási salak hasznosítási lehetőségei és sajátosságai a nyersvasgéártásban

Possibilities and characteristics of steel slag recycling in ironmaking

DR. HÁRI LÁSZLÓ, PHD
okl. kohómérnök



A nyersvasgéártás a vaskohászati vertikum leginkább anyag- és költségintenzív fázisa. Általában a felhasznált nyersanyagok és a költségek csökkenthetők a belső eredetű és a vásárolt hulladékok felhasználásával. A hulladékok felhasználásának határt szabhat azok szennyezőtartalma vagy kohósításuk energiaigénye. Az acélgéártási salak olyan belső eredetű hulladék, melynek több hasznos eleme, kevés szennyezője van, környezetvédelmi vagy béléstartósági szempontból káros anyagokat pedig nem tartalmaz. Célszerű tehát áttekinteni az acélgéártási salakok direkt felhasználhatóságát.

Kulcsszavak: acélgéártási salak, reciklálás, Fe, Mn, CaO

The ironmaking technology is the most material and cost intensive step in the iron and steelmaking complex. Generally, the cost can be lowered by the recycling of waste of internal and external origin. The rate of recycling is limited by the pollutant content of waste, the energy demand of melting and the impact on the durability of the furnace lining. The steel production slag is waste of internal origin with several useful elements, few impurities, and does not contain environmentally or liner harmful substances.

The properties of the slags allow their use in blast furnaces as a first test, but their use in road construction also requires the control of a number of physical and rock properties such as fraction sizes, drum strength, frost resistance, chemical composition, heavy metal leaching, or the associated groundwater.

Another advantage of using blast furnaces is that the chemical composition of the slags has long been well known, and if deposited separately, a deposit of approximately the same homogeneity as the ores can be obtained.

One of the main questions will be whether the pure oxide fraction, which contains practically no metallic iron, can be used economically in the blast furnace.

The composition of the steel slag studied by the author was $FeO = 17.5\%$, $MnO = 6.5\%$, $CaO = 52\%$ and $SiO_2 = 17.6\%$. The slag value was investigated by the author using 3 methods. According to the trivial level of substitutability, 1 kg of slag can substitute 0.21 kg of Brazilian iron ore, 0.15 kg of Ukrainian Mn ore and 0.62 kg of common limestone.

Looking at the Fe content of the slag, the effective Fe content in the slag increases significantly when the excess CaO and Mn content is taken into account. The resulting self-fluxing steel slag has an effective Fe content of more than a Brazilian ore.

Of the methods examined, the most complete picture is provided by the total burden calculation, from which they can determine the effect of a given amount of steelmaking slag on all burden components, including coke consumption.

The amount that can be used in practice depends not only on the P content of the steel slag, but also on the P content of the iron ores used and the steel to be produced. It is also possible to modify the amount used to improve the phosphorus removal conditions in steel production.

Summarising the tests, it can be concluded that the value of slag is equivalent to 50% of the cost price of an average aggro-ore, 40% of a concentrate and 30% of a pellet. By eliminating the effect of high P content, local slags can be used to replace 50–60% of Mn ore and 60–70% of limestone, reducing the cost of the burden by about 0.6%.

Keywords: steel slag, recycling

1. Bevezetés

Még a 2000-es évek előtt a Dunaferri Zrt.-ben felvetődött annak gondolata, hogy a beszerzési költségek csökkentésére és a haszon növelésére felhasználják a vállalatnál képződő bizonyos hulladékokat. A szóba jöhető belső hulladékok között azóta is kiemelt helyet foglal el a reze és az acélgártási salak. A salakok művön kívüli hasznosítására számos példa létezik. Itt megemlíthetjük a talajok műtrágyázását, a vízparti mólók, gátak és egyéb műtárgyak építését, az útalapban való felhasználást, vagy a CO₂ megkötését [1, 2]. A nagyolvasztóban való belső felhasználás – kézenfekvő szerepe ellenére – világszerte ritka, aminek okait kutatni kell.

A salakok felhasználása a régi salakhányók feldolgozásával vette kezdetét, melynek során a vegyes eredetű salakhalmai hulladékokból a legnagyobb Fe-tartalmú, azaz a kohósítás szempontjából legértékesebb alkotókat kiválogatják, és azok reciklálásra kerülnek. Ennek lényege az volt, hogy a halmai salakokat aprítják, és dúsítás során a kisebb mennyiségben képződő, de nagy vastartalmú mágneses frakciókat a nagyolvasztóban hasznosítják, míg a kisebb vastartalmú rész, külföldi példák nyomán, az útalapba kerül. Ez az elképzelés a Dunaferriben is megvalósult, amikor a zömmel martinsalakat és egyéb anyagokat is tartalmazó régi salakhalmat feldolgozták.

Időközben a folyamatosan termelődő LD-salakok deponálása kapcsán is hasonló gondolatok merülnek fel, de még szélesebb értékelési körben: érdemes-e az aprított anyagot mágnesesen szeparálni, vagy esetleg az egész salakmennyiség is felhasználható, egyszerű aprítás és osztályozás után.

A kérdést már elvi oldalról is érdemes megvizsgálni az egész felhasználás előnyeivel és hátrányaival, hiszen a döntést segítő gazdasági számítások egyszerűek. A salakok tulajdonságai első vizsgálati körben lehetővé teszik a nagyolvasztói felhasználást, ugyanakkor az útépitésben való felhasználás számos olyan fizikai és kőzettani mutató ellenőrzését is megkívánja, mint pl. a frakcióméret, a dobszilárdság, a fagyállóság, vegyi összetétel, nehézfémek kioldódása vagy a vele összefüggő talajvizek vizsgálata.

A nagyolvasztói felhasználás mellett szól az is, hogy a salakok vegyi összetétele már régóta jól ismert, külön deponálás esetén egy kb. az ércékével azonos homogenitású betétanyaggal lehet dolgozni. A vizsgálatok egyik hangsúlyos része az lesz, hogy a gyakorlatilag fémvasat nem tartalmazó, tisztán oxidos rész gazdaságosan felhasználható-e a nagyolvasztóban.

2. Az LD-salak mint betétanyag jellemzése

A Dunaferriben képződő fajlagos acélgártási salak mennyisége a 2010-es évek körül mintegy 11–12% volt, azaz évi 1,6 millió t acél gyártása esetén 176–192 kt fúvatáskor képződő salak belső vagy külső reciklálásáról, illetve deponálásáról kellett gondoskodni. Az űstmetallurgiai eredetű acélgártási salakok jóval kisebb mennyiségben képződnek. Ezek útépitési felhasználását a fizikai és kőzettani tulajdonságai korlátozzák, a nyersvasgyártásban való felhasználhatóságuknak pedig a kémiai összetételük szab határt. Fentiek miatt a továbbiakban csak a fúvatási salakkal foglalkozunk.

Az LD-salak felhasználhatóságáról fizikai és kémiai tulajdonságai adnak képet. Az acélgártási technológia ismeretében megállapíthatjuk, hogy a salakgödörbe öntött salakot fel kell szedni, melyet aztán törni és osztályozni kell. Az utóbbi technológiában keletkező 20–80 mm-es frakció célszerű felhasználási helye közvetlenül a nagyolvasztó, míg a 0–10 vagy 0–20 mm-es frakciót a zsugorítószalagra adagoljuk.

A salak felhasználhatósága, annak gazdaságossága a kémiai összetétel ismeretében ítéltető meg. Az 1. táblázat a 2016-os év 7500 darabszámú mintájából származó olyan kb. 3100 elemszámú részmintából származik, melyekre a jellemző nyersvas Mn-tartalom 0,71–0,90% közötti, a bázikusság pedig átlagosan 3,1.

A nyersvas Mn-tartalom szerinti válogatása indokolt, mert az acélgártási salakok reciklálásának gazdaságosságát jelentősen befolyásolja többek között a felhasznált nyersvas Mn-tartalma. Ennek szemléltetésére felidézzük, hogy a 0,31–0,50% nyersvas Mn-tartalom intervallumba eső nyersvasak felhasználásával nyert LD-salak MnO-tartalma átlagosan 4,46%, ugyanez 0,51–0,70% Mn-tartalom esetén 5,70%, 0,71–0,90% közé eső nyersvas Mn-tartalom esetén pedig átlagosan 6,46%.

Mint ismeretes, a salak öt legfontosabb alkotója a Fe, a Mn, a CaO, a SiO₂ és a P. Míg az előbbi három hasznos, a SiO₂ feleslegesen növeli a salak mennyiségét, és így energetikailag káros, addig a P szennyezőnek minősül. Meg kell jegyezni, hogy a Mn-tartalom nem szabványosan előírt alkotója a nyersvasnak, hanem a nyersvas további feldolgozását végző acélmű igénye miatt kerül a konverter betétjébe. Az acélgártói gyakorlat szerint a nyersvas Mn-tartalmának növelése a szokásos 0,2–1,0%-os intervallumban védi a falazatot a SiO₂ kémiai erodáló hatásaitól, egyúttal segíti a salakképződést is a korai jól folyó bázikus salak kialakításával, és ezzel párhuzamosan javítja

1. táblázat. A 0,71–0,90% Mn-tartalmú nyersvasak felhasználásával kapott LD-salakok vegyi összetétele (m/m%) [3]

Alkotók	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃
Fúvatási salak	17,5	6,5	1,0	0,07	52,0	17,6	1,7	2,8

a mész oldódásának feltételeit. Az utóbbi időkben végzett kísérleti kampányok fényében megállapították, hogy a nyersvas Mn-tartalmát érdemes kb. 0,65–0,75% értékre növelni, mert a Mn-érc beszerzésére fordított többletköltség még megtérül a konverterezés veszteségeinek csökkentése révén.

3. Az acélglyártási salak értékelése

3.1. A salak triviális értékelése

Az acélműi salak metallurgiailag – a triviális üzemi értékelés szerint – szinte teljesen értéktelen betétanyag, minőségét tekintve messze az utolsók között van. Felhasználása legfeljebb arra való, hogy fő komponensei révén némileg csökkentse az anyagihiány esetén a drága vasérc és mészkő felhasználását. Ez a vélemény feltehetően a salaknak a vasércnél jóval kisebb vastartalmán alapul. A salakképzőként történő megítélését pedig a mészkőhöz képest kisebb CaO-tartalma és annál jóval nagyobb SiO₂-tartalma rontotta. A minőség megítélését betetőzi a magas P-tartalma, mely a nagyobb mértékű acélműi felhasználás akadályát képezné.

A fentiek alapján az acélglyártási salakok nagyolvasztói felhasználását, annak valós metallurgiai értékét mélyebben nem vizsgálták, és még az esetleges kismértékű felhasználásától is hosszú ideig eltekintettek. A továbbiakban bizonyítjuk, hogy az acélglyártási salak – a közmegítéléssel ellentétben – értékes másodnyersanyag.

3.2. A salak értékelése az elegyhelyettesítő képesség alapján

Az acélglyártási salak hasznos komponenseinek (Fe, Mn, CaO) áttekintése után egyértelmű, hogy alkalmas

a vasérc, mangánérc és a mészkő helyettesítésére. A helyettesíthetőség mértékét még a továbbiakban részletesen vizsgálni fogjuk, ezért itt most egy egyszerű módszert választunk az alábbiak szerint:

1. Vasérc-helyettesítő képesség: a vastartalom azonossága alapján végezhető.
2. Mangánérc-helyettesítő képesség: a mangántartalom azonossága alapján.
3. Mészkő-helyettesítő képesség: a szabad CaO-tartalom azonossága alapján.

A számítások elvégzéséhez szükséges vegyi összetételeket az 2. és a 3. táblázat tartalmazza.

A 3. táblázat a további számításokra alkalmas adatokat mutatja, ahol a CaO*-gal jelölt adatokat (a szabad CaO-ot) a

$$\text{CaO}^* = \text{CaO} - B \cdot \text{SiO}_2 \quad (1)$$

képletből számítjuk, melyben a *B* a nagyolvasztói salak 1,1-re felvett bázikusságát jelenti. Az Mn* mutató az elegyalkotó szabad Mn-tartalmát jelenti, melyet az

$$\text{Mn}^* = \text{Mn} - m \cdot \text{Fe} \quad (2)$$

képlettel határozzuk meg, ahol *m* a nyersvas összetételéből számított Mn/Fe hányados.

Az acélglyártási salak különböző betétanyagokra vonatkozó helyettesítő képességét az alábbiakban határozzuk meg. A helyettesítő képességen azt a tulajdonságot értjük, mely megadja, hogy egy kg acélglyártási salak – kémiai összetétele alapján – hány kg vasércet, mangánércet és mészkövet tud helyettesíteni. A 4. táblázat megadja a különböző anyagokra vonatkozó helyettesítő képességet a felvett *B* és a később részletezett *m* értéke alapján.

2. táblázat. Az LD-salak és a szokásos betétanyagok vegyi összetétele (m/m%) [4]

Alkotók	Fe	Mn	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃
Acélglyártási salak	13,5	5,0	1,0	51,5	17,0	2,3	1,6
Brazil érc (IOCJ)	64,0	0,3	0,14	0,1	2,2	0,1	1,0
Mn-érc (ukrán)	2,6	33,2	0,338	2,1	18,7	1,3	1,4
Mészkő	–	–	–	54,0	1,2	0,8	0,5

3. táblázat. Az LD-salak és a betétanyagok vegyi összetétele (m/m%) és ára (Ft/kg) [4]

Alkotók	P	CaO*	Mn*	Ár**
Acélglyártási salak	0,437	32,8	4,84	3***
Brazil érc (IOCJ)	0,061	–2,32	–0,47	26
Mn-érc (ukrán)	0,338	–18,5	33,18	24
Mészkő	–	52,7	0	5

** bekerülési árak; *** becslés a belső kezelési költségek alapján

4. táblázat. Az 1 kg LD-salakkal elérhető helyettesítő képességi értékek (kg/kg) és a helyettesített anyagok értéke (Ft/kg)

Elegy megnevezése	Helyettesítő képesség kg/kg salak	Érték Ft/kg salak
Brazil vasérc	$13,5/64 = 0,21$	$0,21 \cdot 25 = 5,25$
Ukrán mangánérc	$5,0/33,2 = 0,15$	$0,15 \cdot 26 = 3,9$
Hazai mészkő	$32,8/52,7 = 0,62$	$0,62 \cdot 6 = 3,10$
Összesen		12,25

A bemutatott módszer *előnye*, hogy röviden meghatározható vele az acélgéártási salak forintban kifejezett értéke is. Az érték tudvalevően nem azonos az árral, hanem az anyagnak a funkcióbeli hasznos tulajdonságát mutatja az adott műszaki környezetben, mindamelllett az érték forintban is kifejezhető a funkcióbeli tulajdonságok hasonlósága alapján. A módszer *hátránya*, hogy nem tartalmazza az energetikai hatásokat, azaz a salak felhasználásával járó zsugorítói kocszpor- és a nagyolvasztói kohókoksztalozásokat.

A számítások szerint az acélgéártási salak jelentősége gazdaságilag elsősorban Fe-hordozó, másodsorban Mn-hordozó és harmadsorban mészkő-helyettesítő.

A vizsgálat szerint az acélgéártási salak értéke egy jó vastartalmú agglóérc értékének a felével azonos. Természetesen, ha a nagyolvasztóüzem nem a salak birtokosa, akkor a haszon lecsapódásának a helyét jelentősen befolyásolják a tulajdonviszonyok.

3.3. A salak értékelése az elegy effektív Fe-tartalma alapján

Az acélgéártási salak metallurgiai értékét ebben a fejezetben a meddőalkotókat, azaz nemfémes oxidokat tartalmazó salak (tulajdonképpen elegy), effektív (valós) Fe-tartalma alapján határozzuk meg. Az alábbiakban az acélgéártási salakot – ugyanolyan értékelési mód szerint – egy jelenleg élvonalbeli, jó minőségű vasércel hasonlítjuk össze. A számításokhoz felvesszük a nyersvasgéártásban mindennaposan alkalmazott Mn-érc és mészkő vegyi összetételét. Az összehasonlításhoz használatos anyagok vegyi összetétele a 2. és 3. táblázatban található.

Az acélműi salak értékelése során azt vizsgáljuk, miként alakul a salak és a brazil vasérc egymáshoz képesti Fe-tartalma egy olyan elvi 100–100 kg-os elegyben, mely csak ferrumból, a salak 1,1-es bázisúságának biztosításához szükséges mészkőből, valamint a nyersvas Mn-tartalmának biztosításához szükséges Mn-érből áll. E feltételek biztosításával a két betétalkotó Fe-tartalma összehasonlíthatóvá válik. A korábbi időkben az összehasonlítást a természetes összetétel alapján végezték, aminél fogva a salakban

levő CaO- és Mn-felesleg torzító hatását nem vették figyelembe.

Az alábbi rövid számítás a valamely *i*-edik vizsgált elegyalkotóhoz tartozó mészkőhozag mennyiségének a meghatározására szolgál

$$M_i = -100 \cdot [\text{CaO}_i^*/\text{CaO}_M^*] \quad (3)$$

képletel. A brazil ércre a várakozásnak megfelelő

$$M_B = -100 \cdot (-2,32/52,7) = 4,40 \text{ kg} \quad (4)$$

értéket kapjuk, míg az acélgéártási salakra a számítás annak figyelembevételével folytatjuk, hogy a salakban (a 2. táblázat adatai szerint) csak $17,0 \cdot 1,1 = 18,7\%$ CaO-ra van szükség. A CaO-felesleg tehát $52,7 - 18,7 = 34,0\%$, mely 60,7 kg mészkővel ekvivalens.

A vasérc Mn-érc szükségletének meghatározásánál hasonlóan járunk el, mint a brazil érchez szükséges mészkőhozag meghatározásánál. A konkrét számításokhoz vegyünk fel egy olyan biztosítandó $m = \text{Mn}/(r_{\text{Mn}}\text{Fe})$ arányt, mely megfelel a nyersvas összetételének és a Mn redukciós fokának (r_{Mn}). Amennyiben 0,8% Mn-tartalmú nyersvasat szeretnénk előállítani, akkor $r = 0,7$ -es redukciós foknál $m = 0,012$ -es értéket kell beállítani az átlagos elegyben. A Mn-hiányt megadó számítás 100 kg vasércre:

$$\dot{E}_{\text{Mn}i} = 0,30 - 0,012 \cdot 64 = -0,468 \text{ kg.}$$

A brazil érc negatív előjelű szabad Mn-tartalma arra utal, hogy az ércnek Mn-hiánya van. A megfelelő hiány pótlásához szükséges ukrán Mn-érc tömege:

$$\dot{E}_{\text{Mn}B} = -100 \cdot (-0,47/33,18) = 1,99 \text{ kg.}$$

Ugyanez a számítás az acélgéártási salakra

$$\dot{E}_{\text{Mn}i} = 5,0 - 0,012 \cdot 13,5 = 4,84 \text{ kg.}$$

A pozitív érték arra utal, hogy az acélgéártási salakban Mn-felesleg van, mely úgy tűnik el, hogy az acélműi salakból, vasércből kiveszünk a felesleggel ekvivalens

$$\dot{E}_{\text{Mn}A} = -100 \cdot (4,84/33,18) = -14,60 \text{ kg}$$

mangánércet.

Az utolsó lépésben még vegyük figyelembe azt is, hogy a savas meddőjű Mn-ércnek M'_{Mn} mészkő-szükséglete van. Ennek értéke az ércre és a salakra:

$$M'_{Mn} = 1,99 \cdot (33,18/52,7) = 1,25 \text{ kg,}$$

$$M'_A = -14,60 \cdot (33,18/52,7) = -9,18 \text{ kg.}$$

A különböző hozagokkal való előjelhelyes kiegészítés az 5. táblázatban feltüntetett módon hat a két összehasonlítandó elegyalkotó Fe-tartalmára. Az összehasonlításnak ez a módja az acélgéártási salak olyan megjavult értékét mutatja, mely az egyszerű naturális összehasonlítás alapján nem érhető el. Az összehasonlítás olyan elegyviszonyok között érvényes, melyben ércből és mészkőből álló komponensekhez adjuk az acélműi salakot. Ebben az esetben természetesen, hogy salakban való mészfelesleg mészkő-megtakarítás formájában jelentkezik.

Ennek a módszernek az alkalmazása – az 5. táblázat soraiból is kivehetően – hatékonyan csökkenti a nevezőt, ennek megfelelően jelentősen megnő az acélműi salak effektív Fe-tartalma. Ezzel a számítási módszerrel az acélmű salak felhasználásával járó előnyt a salak vastartalmának növekedésével illusztráltuk. Az eredmény azt mutatja, hogy a megfelelő korrekciókkal a naturálisan 13,5% Fe-tartalmú acélműi salak virtuálisan nagyobb Fe-tartalmúnak minősül, mint a 64%-os Fe-tartalmú brazil vasérc.

5. táblázat. Az acélgéártási salak és a brazil vasérc effektív Fe-tartalmának alakulása az egymást követő adalékolások hatására egy vasércből, mangánércből, mészkőből és acélgéártási alakból álló elegyben. Jelmagyarázat: 1) eredeti értékek; 2) mészhány (felesleg) hatása; 3) mészhány és Mn-hány (felesleg) együttes hatása; 4) mészhány, Mn-hány és a pótmészkő együttes hatása

	Brazil vasérc	Acélgéártási salak
1	64,0%	13,5%
2	$Fe'_B = \frac{64 \cdot 100}{100 + 4,40} = 61,30\%$	$Fe'_A = \frac{13,5 \cdot 100}{100 - 60,7} = 34,35\%$
3	$Fe''_B = \frac{64 \cdot 100}{100 + 4,40 + 1,99} = 60,16\%$	$Fe''_A = \frac{13,5 \cdot 100}{100 - 60,70 - 14,60} = 54,65\%$
4	$Fe'''_B = \frac{64 \cdot 100}{100 + 4,40 + 1,99 + 1,25} = 59,46\%$	$Fe'''_A = \frac{13,5 \cdot 100}{100 - 60,70 - 14,6 - 9,18} = 86,98\%$

6. táblázat. A brazil vasérc effektív Fe-tartalmának alakulása a hagyományos adalékolás, valamint az acélgéártási salakkal történő adagolás hatására

Hagyományos adalékok	Acélgéártási salak, mint adalék
$Fe'''_B = \frac{(64 + 1,99 \cdot 0,026) \cdot 100}{100 + 4,40 + 1,99 + 1,25}$	$Fe'''_A = \frac{(64 + 7,52 \cdot 0,135 + 1,06 \cdot 0,026) \cdot 100}{100 + 7,52 + 1,06}$
$Fe'''_B = 59,50\%$	$Fe'''_A = 60,04\%$

A különböző adalékolások hatását tükröző effektív Fe-tartalom alakulását az 5. táblázat mutatja.

Az 5. táblázat jobb oldala az acélgéártási salakban levő CaO- és Mn-felesleg látszólagos Fe-növelő közvetlen és közvetett hatását mutatja azon oknál fogva, hogy az egész ércből le kell vonni az ún. feleslegeket. A módszer jelképesnek fogható fel annál is inkább, mert a mészfelesleggel kapcsolatos levonandó értéket nem mész, hanem mészkő formában érvényesíti.

A módszer mindenesetre alkalmas arra, hogy az acélműi salakban levő értékes alkotók, „feleslegben” levő értékéből következő megtakarítások elegyjavító hatását kimutató logikai összefüggéseket bemutassa.

3.4. A vasérc értékelése a hagyományos adalékokkal és acélgéártási salakkal

Az itt sorra kerülő vizsgálattal egyrészt megismételjük a hagyományos mészkő, Mn-érc adalékok hatásait, másrészt felhívjuk a figyelmet az acélgéártási salakkal történő adagolás hatásaira. A részletszámítások elkerülésével a 6. táblázat a végeredményt mutatja.

A táblázat jobb oldali részén található 7,52 és 1,06-os értékek a 100 kg vasérc meddőtartalmának elsalakisításához szükséges acélgéártási salak és Mn-érc mennyiségét mutatja, melyből az előbbi érték már tartalmazza a Mn-érc mészkőszükségletét is. A képletek számlálójában a vasérc eredeti Fe-tartalmát kiegészítettük a salak és a Mn-érc Fe-tartalmával.

7. táblázat. Az acélgyártási salak hatása a nagyolvasztó éves elegy- és kokszzükségletére, valamint azok értékére (kt/év és Mrd Ft/év)

Salak	IOCP-érc	K-érc	Pellet	Mn-érc	Mészke	Dolomit	Kokszpor	Koksz	Érték*
0	945	0	892	31,1	171	110	53,2	583,5	108,2
85	900	0	918	18,7	109	114	49,8	587,9	107,6
148	4	847	884	14,7	59	82	43,8	582,4	110,6

* Mrd Ft/év

Az összehasonlító számítások szerint érdemes az acélgyártási salakot bázispótló adaléknak használni, mert növeli az önjáróra beállított elegy Fe-tartalmát. Ebbéli szerepében a salak teljes mértékben pótolni tudja a vasérc és Mn-érc mészigényét és hozzávetőleg a Mn-szükséglet felét. A módszer hiányosságának fogható fel, hogy nem tartalmaz kalorikus jellemzőket, és nem tudja előre jelezni az acélgyártási salak hatásait az olyan jelentős költségtételekre, mint a zsugorítóműi kokszporfelhasználás és a nagyolvasztói kokszfogyasztás.

A fentiekben ismertetett két elegyértékelő módszer elsősorban szemléletessége miatt érdemel figyelmet. Lényege, hogy a vizsgálatokat 100 kg vasércre vonatkoztatva, azokat önjáró állapotra való hozással végzi. Erénye, hogy felhívja a figyelmet az acélgyártási salak rejtett értékeire.

Természetesen van olyan értékelési mód is, mely az acélműi salak pozitív hatásait a fajlagos elegyalkotók változásával szemlélteti. A továbbiakban ez a módszer kerül ismertetésre.

3.5. Az acélgyártási salak értékelése egyszerűszerkezetben

Az acélműi salak értékét ebben a fejezetben egy olyan modellel prezentáljuk, mely egy összehasonlító elegyszámítás-sorozat eredményeit mutatja, fajlagos értékekben kifejezve.

Már a fentiekben ismertetett ércbázisú összehasonlítás is figyelemre méltó eredményeket hozott a triviális – vagyis a legegyszerűbb összetétel-összehasonlításon alapuló – módszerhez képest, az egyszerűszerkezetben való értékelés azonban képes lesz egy egységnyi nyersvastermékre jutó vasérc, mangánérc, mészke, valamint zsugorítói kokszpor- és kokszzükséglet meghatározására is, acélműi salak nélkül és azal kiegészítve.

A modellel a már ismert összetételű vasérc mellett egy kiegészítő vasércből és egy pelletből, acélműi salakból, Mn-ércből, mészkeből, kokszporból és kohókokszból állítjuk össze. A Dunaferr igényeire szabott modellben évi 1,1 millió tonna zsugorítvány előállítását, 1,25 millió tonna 0,8% Mn-tartalmú nyersvas legyártását írjuk elő 1,1 bázikusságú és 9% MgO-tartalmú salak előállításával. A zsugorítás energia-

szükségletét a szerző a szakirodalom figyelembevételével megalapozott összefüggésekre [5] építette, a nagyolvasztói kokszfogyasztás becslésére egy szakirodalmi hivatkozásból vett képletet [6] használt, melynek alakja

$$k = 470 + 0,164E + 0,249M - 1,006Zs - 1,142Pe - 0,093T \text{ kg/t.} \quad (5)$$

A képletben szereplő E , M a fajlagos elegyet jelentik. A Zs és a Pe az elegyben a zsugorítvány és a pellet %-os aránya, T a fúvósél hőmérséklete [5]. A matematikai módszer alapja az anyag- és hőmérégek alkalmazása [7]. A felállított egyenletrendszer egy minimális betétköltség biztosításával adja a kt/év mértékegységű megoldást.

7. táblázat: Az acélgyártási salak hatása a nagyolvasztó éves elegy- és kokszzükségletére, valamint azok értékére (kt/év és Mrd Ft/év)

Látható, hogy az új módszer az előbbiekhöz képest teljes áttekintést ad a helyettesítő képességet illetően. Ezek az értékek a következők:

A vasércekre vonatkozó helyettesítő képesség (3 érc átlagára):

$$h_{V\text{érc}} = \frac{900 + 0 + 918 - (945 - 0 - 892)}{85} = \frac{-19}{85} = -0,223 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

A mangánércre vonatkozó helyettesítő képesség:

$$h_{Mn\text{érc}} = \frac{14,7 - (31,1)}{85} = \frac{-16,4}{85} = -0,193 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

A mészke és a dolomitra vonatkozó helyettesítő képesség:

$$h_{MD} = \frac{109 + 114 - (171 + 110)}{85} = \frac{-58}{85} = -0,682 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

A kokszporra vonatkozó helyettesítő képesség:

$$h_{K\text{por}} = \frac{49,8 - 53,8}{85} = \frac{-4}{85} = -0,047 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

A kohókoksza vonatkozó helyettesítő képesség:

8. táblázat. Az LD-salakkal elérhető helyettesítő képességi értékek két közelítés szerint

Elegyalkotó megnevezése	Helyettesítő-képesség kg/kg salak		Helyettesített anyagok értéke Ft/kg salak	
	4. táblázat szerint	utóbbi számítás szerint	4. táblázat szerint	utóbbi számítás szerint
Brazil vasérc/Érccek	0,21	0,223	5,61	3,11
Ukrán mangánérc	0,15	0,193	6,45	8,30
Mészke	0,62	0,682	3,41	3,75
Dolomit	–		–	
Kokszpor	–	0,047	–	2,82
Kohókoksza	–	–0,055	–	–4,95
Összesen			15,47	13,03

$$h_k = \frac{587,9 - 583,5}{85} = \frac{4,4}{85} = +0,052 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

Látható, hogy az acélgártási salak felhasználásával az összes elegyalkotó és kokszpor mennyisége csökken, kohókoksza valamelyest nő.

A 8. táblázat 2. oszlopa a fentiekben számolt 1 kg acélműi salakra vonatkozó érc-, mészke- és kokszmegtakarításokat mutatja, melyet célszerű összehasonlítani a más elven nyert és a 4. táblázatban szereplő értékekkel.

Az anyagmérlegeken alapuló módszer sajátossága, hogy önmagában teljességre törekszik, és olyan részleteket is kimutat, melyeket a triviális módszerrel nem érhetünk el. Az amúgy kis Fe-tartalmú acélgártási salak zsugorítói elegybe történő egyre nagyobb mennyiségben való adagolásának egyik következménye az lesz, hogy a ferrumban elszegényedő zsugoritmány Fe-tartalmát pótolni kell vagy a zsugorítószalagra, vagy közvetlenül a nagyolvasztóba adagolandó egyéb vashordozókkal. Ezért van szükség a vashordozók számának növelésére. A folyamatosan növekvő CaO- és Mn-tartalmú elegyben megjelenő többlet-CaO és -Mn az elegyből mészke és a drágább Mn-érc formájában kerül eltávolításra. A csökkenő mennyiségű nyers érc kristályvíz- és karbonáttartalma kevesebb zsugorítói kokszport igényel. Mindezek a hatások ér-

vényesülnek a 7. táblázat éves anyagszükségletének meghatározásában.

Az újabb módszerrel kapott adatokat összehasonlítva a 4. táblázat első oszlopával, ahhoz nagyon hasonló helyettesítési értékeket kapunk, ami korábbi fejtegetéseink helyességét is mutatja. Ha az utóbb kapott 13 Ft megtakarításból levonjuk az acélgártási salak kb. 3 Ft kezelési, szállítási költségét, akkor a kapott 10 Ft költségmegtakarítás maga az acélműi salak értéke, mely egy átlagos agglóérc bekerülési árának az 50%-át, egy koncentrátumnak a 40%-át és egy pelletnek a 30%-át teszi ki a 2010-es évtized végének érc-árai szerint.

4. Az acélműi salak felhasználhatóságának korlátai

Miután meggyőződünk az acélműi salaknak a nagyolvasztói lehetséges reciklálását lehetővé tevő kémiai alkalmasságáról és gazdaságosságáról, célszerű megvizsgálni a felhasználható fajlagos vagy éves mennyiségeket is. A felhasználhatósági korlát a salak P-tartalmából adódik, mivel acélgártási szempontokból a nyersvas P-tartalmát korlátozni kell. A salakban jelen levő SiO₂ is a salak káros alkotója, ez azonban nem jelen korlátot, legfeljebb rontja a gazdaságosságot.

9. táblázat. A különböző acélgártási salakreciklási stratégiákkal elérhető eredmények

Jelölés	Felhasznált salakmennyiség	Maradék Mn-érc	Maradék mészke	Nyersvas P-tartalma	Nyersvas Mn-tartalma
M.e.	kt/év	kt/év	kt/év	%	%
0	0	31,1	171	0,064	0,80
1	60	22,3	127	0,086	0,80
2	85	18,7	109	0,100	0,80
3	150	14,6	59	0,100	0,80

Az acélgártási salak felhasználásának három célja hozzávetőleg megegyezik a felhasználás három korlátjával. A CaO-, a Mn- és a Fe-tartalom azonban nem korlát, mivel a nyersvasban levő vastartalom végtelen nagy a gyakorlatban felhasználható salakban levő vashoz képest. Ehelyett a nyersvas P-tartalmát tekinthetjük korlátnak. A különböző felhasználási stratégiákkal elérhető eredményeket a 9. táblázat mutatja.

A számítások szerint az acélgártási salak felhasználása nélkül gyártott nyersvas P-tartalma 0,064%. Ez az alacsony érték a felhasznált kis P-tartalmú vasércnek és az itt figyelembe nem vett nagy P-tartalmú hulladékok betétből történő kihagyásának köszönhető. Ez az alacsony érték képezi az egyik alapját az acélgártási salak felhasználásának. Az LD-salaknak a 9. táblázatban közölt 31,1 kt/év értékű felhasználása 18,7 kt/évre, azaz 40%-kal csökken, míg a mészkeő csökkenése 36%-os, kismértékű dolomitfelhasználás mellett. Amennyiben az acélműben képződő 150 kt/év mennyiségű salakot teljes mennyiségben fel szeretnénk használni, akkor a Mn-érc felhasználás 53%-át és a mészkeőfogyasztás 6%-át sikerül kiváltani gyakorlatilag változatlan nyersvas Mn- és P-tartalom mellett.

Amikor a salakfelhasználás eléri a 85 kt/év értéket, a P-mérlegből következőleg a nyersvas P-tartalma eléri a kritikus 0,10%-ot. Hogy ez az érték ne növekedjen tovább, az alapnak választott IOCP-ércet fokozatosan kisebb P-tartalmú és (a nagyobb Fe-tartalom miatt) drágább Ingulecki K-ércekre kell cserélni. Ennek következtében az elegyköltség 85 kt/év salakfelhasználáson túl már növekszik. Ezzel meghatároztuk az acélgártási salak gazdaságilag optimális mértékét.

A fentiekben közölt értékeket a felhasznált érc P- és SiO₂-tartalma nagyban befolyásolja. A felhasználás kulcskérdése a nyersvas megengedett P-tartalma mely viszont az LD-konverter foszfortalanítási viszonyaitól függ.

A fentiekben vázolt viszonyokat szemlélteti az 1. és a 2. ábra.

Az acélgártási salak nagyolvasztóban történő felhasználásával járó h haszon a kritikus pontig, a 7. táblázat számolt adatai szerint

$$h = 108,2 - 107,6 = 0,6 \text{ Mrd Ft/év.}$$

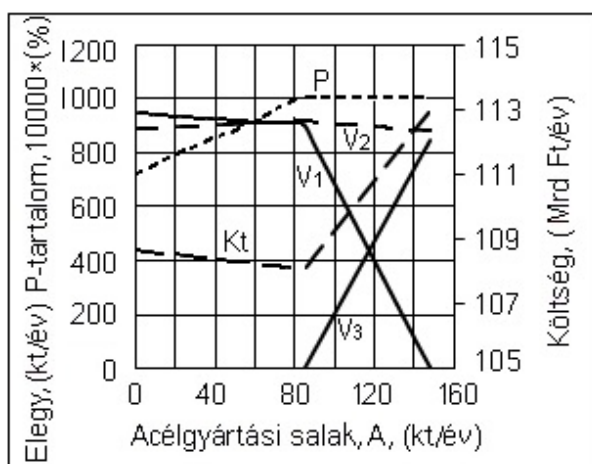
Amennyiben a felhasználás meghaladja a kritikus mértéket, a salakfelhasználás akár veszteséges is lehet.

Összefoglalva az acélműi salakfelhasználás korlátait a következő befolyásoló tényezőkre kell figyelni: a vas- és mangánérc, valamint az acélgártási salak SiO₂-tartalma, P-tartalma és ára, a nyersvas megengedett P-tartalma.

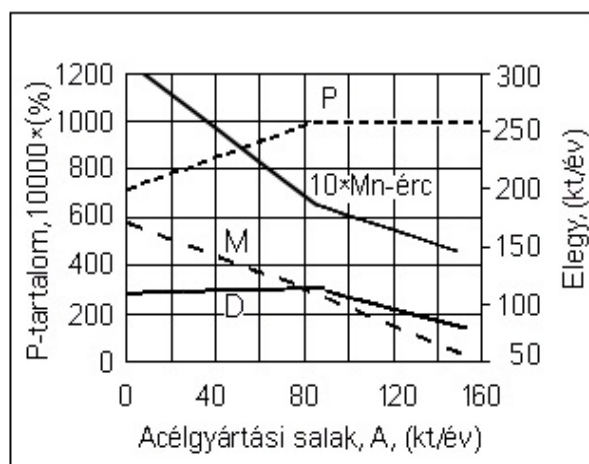
5. A nyersvas kritikus P-tartalmának becslése

Térjünk vissza ahhoz a megállapításunkhoz, hogy a nyersvas lehetséges maximális P-tartalmát a konverter foszfortalanítási viszonyai határozzák meg! Nézzük meg, mennyiben volt célszerű a nyersvas P-tartalmát 0,10%-ra felvenni!

A kérdést a Dunaferr 2016-os év II. félévének elemzési adataira támaszkodva próbáljuk megoldani. Az adatokból kideríthetők a foszfortalanítás üzemi feltételei és a számszerű statisztikai adatok. A vizsgálat során az adatbázisban szereplő adatokat növekvő $L_P = (P)/[P]$ szerint rendeztük sorba majd meghatároztuk az 1. és a 10. decilishez tartozó azon paramétereket, amelyek fontos szerepet töltenek be a foszfortalanítási folyamatban. Az adatokat a 10. táblázat mutatja.



1. ábra. Az acélműi salak növekvő adagolásával beálló fontosabb összetételi és költségváltozások alakulása. Jelmagyarázat: P – nyersvas P-tartalma, V1, V2, V3 – a felhasznált IOCP, vasércpellet és Ingulecki K-érc évi mennyisége, Kt – a betét költsége



2. ábra. Az acélműi salak növekvő adagolásával beálló fontosabb betét- és költségváltozások. Jelmagyarázat: P – nyersvas P-tartalma, 10·Mn-érc – az évi Mn-érc felhasználás 10-szerese, M és D – az évente felhasznált mészkeő és dolomit mennyisége

10. táblázat. Az acélműi adatbázis foszfortalanítási szempontból fontosabb paraméterei

		FeO, %	MnO, %	CaO/SiO ₂	Pellet, t	L _P
1. decilis	átlag	15,5	7,20	3,00	0,39	35,8
10. decilis	átlag	16,3	6,76	3,29	1,08	91,4
1. decilis	szórás	2,03	0,75	0,22	0,52	4,4
10. decilis	szórás	2,18	0,60	0,21	0,68	6,5

A sorba rendezéssel kapott adatbázisból a legegyszerűbb módon meghatározhatók a foszfortalanítás üzemi feltételei melyek a következők: a FeO-tartalom növelése, a CaO/SiO₂ érték növelése, a pellet mennyiségének növelése. Az egyébként fontos hőmérséklet nem szerepel az adatbázisban, de ez egyébként sem operatív paraméter.

A 10. decilisben megadott paraméterek minden további nélkül beállíthatók a konverteres gyártás során, ezért a betétviszonyokat és a betétköltségeket lényegesen megváltoztató intézkedésekre nincs szükség. A módosított technológiánál az intézkedéseknek köszönhetően 91,4-re becsült átlagos L_P várható, melynek szórása 6,5.

A betét átlagos P⁰ foszfortartalmát a 10%-ra becsült salakmennyiség és a közeljövőben várható 0,01% P-tartalmú acélelőírás alapján a

$$[P] = P^0 / (1 + m L) \quad (6)$$

képlettel becsülhetjük, melynek középértéke

$$P^0 = 0,01 \cdot (1 + 0,1 \cdot 91,4) = 0,101\%$$

Mivel átlaggal számoltunk, a gyakorlatban várható P⁰ érték fele ennél több lesz, másik fele ennél kevesebb. Figyelembe véve 95%-os statisztikai biztonságot, célszerű a megoszlási tényezőt 2σ-val kisebbre venni. Ebben az esetben a 0,01% acél P-tartalom biztosításához a P⁰ szükséges értéke 0,0884%. A fenti értékből a nyersvas átlagos P-tartalma a fajlagos betétkötők mennyisége és azok P-tartalma ismeretében a súlyozott átlagszámítás alapján 0,10%-nak adódik. Ezek szerint, módosított salakviszonyok mellett a kellő biztonsággal számított 91,4–2σ értékű P-megoszlás mellett a 0,010% P-tartalmú acél gyártáshoz a 0,10% P-tartalmú nyersvas felhasználása megengedhető lesz.

Napjaink és a közeljövő acélminőségi követelményei mellett a 0,010% P-tartalmú acél gyártása elfogadható, ami az acélgépjártási salak felhasználását nem korlátozza.

6. Összefoglalás

A kohóbetétbe felhasználható acélműi salak mennyiségének kulcskérdése tehát a nyersvas, végső soron az acél P-tartalma. A kérdés kedvező megoldásához rendelkezésre álló eszközök az alábbiak lehetnek:

- Kisebb P-tartalmú ércet beszerzése a kohóbetétbe.
- Nagyobb hatásfokú foszfortalanítás az acélgépjártásnál.

- A nyersvas P-tartalmának csökkentése, annak előkezelésével.

A fenti lehetőségek közül az első igen gazdaságos, de esetleges, mivel történetileg a legkisebb, hosszabb időszakokra megvalósított nyersvas P-tartalom 0,060% körüli volt.

Az acélgépjártás foszfortalanítási feltételeit tovább kell kutatni. Ennek során ki kell alakítani egy kompromisszumot a foszfortalanítás által megkívánt reakcióképesség és a falazat védelmét szolgáló sűrű konzisztencia között.

A nyersvas előkezelése hosszabb távon ígéretesnek látszik. Az előzetes deszilicizációval és foszfortalanítással elérhető P-tartalom a szakirodalom szerint 0,01%-nál is kisebb lehet. Ebben az esetben már teljes biztonsággal megvalósulhat a 100%-os acélgépjártási salakreciklálás.

7. Következtetések

A vaskohászati vertikumban keletkező acélműi salak másodnyersanyagként való felhasználása jelentős tartalékot jelent a nagyolvasztó számára. Értékét a mangán-, a vas- és a mésztartalom adja, mely közel egyenrangúvá teszi az agglóérccekkal. A magas P-tartalomtól fakadó felhasználási korlátok elhárításával, a helyi salakokkal megoldható a Mn-érc 50–60%-os és a mészkő 60–70%-ának kiváltása, mellyel a betétköltség kb. 0,6%-kal csökkenthető.

IRODALOM

- [1] Lucy V. et al. (2019): The recycling and reuse of steel-making slags. Resources, Conservation & Recycling Journal, 146, 244–255.
- [2] Branca T. A., et al. (2020): Reuse and recycling of by-products in the steel sector: Recent achievements paving the way to circular economy and industrial symbiosis in Europe. Metals, 10, 345; DOI: 10.3390/met10030345.
- [3] ISD Dunaferr Zrt. Termelési adatok. Acélműgyár, 2016
- [4] ISD Dunaferr Zrt. Termelési adatok. Nagyolvasztógyár, 2018
- [5] Vegman E. F.: Domenoje proizvodstvo. Moszkva, Metallurgija kiadó, p. 177.
- [6] Farkas O. (1989): Nyersvasmetallurgia. Tankönyvkiadó, Budapest, p. 388.
- [7] Hári L. (2021): Nyersvasgyártás példatár. II. Magánkiadás, Dunaújváros, p. 98.