ROVATVEZETŐK: *dr. Harcsik Béla és dr. Tardy Pál*

FARKAS OTTÓ – CSEH FERENC – HARCSIK BÉLA

A hidrogén redukáló szerepe és mértéke a nagyolvasztói nyersvasgyártásban

A CO_2-emisszió csökkentésére irányuló világméretű törekvéseknek a nyersvasgyártás technológiai fejlesztése, és így az ISD Dunaferr Zrt. nagyolvasztóinak ezirányú korszerűsítése is természetesen részét képezi. A fajlagos C-forrású tüzelőanyag-fogyasztás csökkentésének a hagyományos, uralkodó nyersvasgyártásban egyik nyilvánvalóan feltételezhető lehetősége a koksz meghatározott mértékű helyettesítése, nagy H_2-tartalmú tüzelő-, illetve redukálóanyagok minél nagyobb részesedésű felhasználásával a nagyolvasztóban. A nagy H_2-tartalmú tüzelő-, illetve redukálóanyagok nagyolvasztói felhasználásának optimalizálása nyilvánvalóan szükségessé teszi a hidrogén – vas-oxidok redukciós folyamataiban mutatkozó – tevékenységének módozatára és részesedésére vonatkozó eddigi ismeretek bővítését, gazdagítását.

1. A hidrogénes vas-oxid-redukciós folyamat lehetséges kapcsolatrendszerének kérdései

A napjainkban főleg földgázbefúvással és a fúvószél nedvességtartalmával nagyolvasztóba vezetett különböző fajlagos hidrogén (H_2)-mennyiség hasznosulásának és főleg a hasznosulás módjainak ismerete szakmai és szakirodalmi bizonytalanságokat és hiányosságokat mutat. A jelen publikáció ezek enyhítésére és csökkentésére törekedve igyekszik megmutatni, hogy a H_2 kémiai kihasználása, illetve részvétele a vas-oxidok redukciós folyamataiban milyen mértékű, s hogy a CO-os és C-os redukció mértékét csökkenti, növeli vagy csak egyszerűen, járulékosan hozzájárul a gázzal lejátszódó indirekt vas-oxid-redukció részesedésének növeléséhez, és ezáltal a többlet C-t és hőt igénylő direkt vas-oxid-redukció mérséklődéséhez vezet.

A redukciós folyamatok (r_{CO}, r_{H_2}, r_d) nagyságának, részesedésének mértékei a nagyolvasztóba vezetett fajlagos H_2-mennyiségnek is nyilvánvaló függvényei. Ezért a vonatkozó konkrét vizsgálatok adott nagyolvasztó bázisértékeire épülnek, s a kapott eredmények alapvetően az azokat képviselő nagyolvasztó(k)ra érvényesek.

A jelen publikáció bázisadatait az ISD Dunaferr Zrt. nagyolvasztói 2012. 09. 01. – 2012. 12. 31. és 2016. 09. 01. – 2019. 04. 15. közötti időszakának a viszonylagosan egyenletes járatra utaló, összesen 23 csoportra osztott 342 napjára vonatkozó működési paraméterértékei, valamint a felhasznált anyagok jellemző adatai képezik. Ezeknek az információknak a birtokában volt lehetőség olyan további alapadatok meghatározására, mint például a redukálandó fajlagos O_2-mennyiség, a földgázzal vagy fúvószéllel bevihető fajlagos H_2-mennyiség, a parciális oxidációban résztvevő fajlagos C-mennyiség, a fajlagos medencegáz-, illetve torokgázmennyiség stb.

2. A H_2 kémiai kihasználása és annak értékei

2.1. A H_2 kémiai kihasználásának pontos meghatározási módszere

A hidrogén – vas-oxid-redukciós folyamatokban betöltött – szerepének és jelentőségének megítélését a kémiai kihasználásának és a redukciós részesedésének, illetve a CO-os és C-os redukcióhoz kapcsolódó magatartásának milyensége határozza meg.

A η_{H_2} reális és pontos kiszámítása – a torokgáz H_2O-tartalmának származási bizonytalansága miatt – csak a H_2-mérleg alapján lehetséges. Ebben a megoldásban a részletes, előzetes számítások eredményét felhasználó egyenlet:

$$\eta_{H_2} = \frac{\Sigma V_{H_2} - V_{H_2}^{tg}}{\Sigma V_{H_2}} \cdot 100 \quad \% \qquad (1)$$

melyben

η_{H_2} = a H_2 kémiai kihasználása,%

ΣV_{H_2} = a nagyolvasztóba vitt fajlagos H_2-mennyiség, m^3/t nyv

$V_{H_2}^{tg}$ = a torokgázzal távozó fajlagos H_2-mennyiség, m^3/t nyv

ΣV_{H_2} $V_{H_2}^{tg}$ = a vas-oxid-redukciós folyamatokban részt vett fajlagos H_2-mennyiség, m^3/t nyv

A nagyolvasztóba jutó fajlagos H_2-mennyiség a H_2-hordozó póttüzelőanyagokból – az ISD Dunaferrnél a földgázból – és a fúvószél nedvességtartalmából származik.

Dr. Farkas Ottó és **dr. Harcsik Béla** szakmai életrajzát a 2018/5-6. számban, **Cseh Ferenc** életrajzát a 2017/6. számban közöltük.

2.1.1. A földgázból és a fúvószél nedvességtartalmából származó H_2-mennyiség

Az ISD Dunaferrnél használatos földgázban CH_4 = 93,5% és C_2H_6 = 2,6%, amiből következően 1 m^3 földgáz 1,87 + 0,08 = 1,95 m^3 H_2-t visz a nagyolvasztóba, ami a befújt földgázmennyiséggel (V_{fg}; m^3/t nyv):

$$V_{H_2}^{fg} = V_{fg} \cdot 1{,}95 \quad \text{m}^3\text{/t nyv}$$

A fúvószélnedvesség 1 g-ja 0,00124 m^3 H_2-t képvisel, így az 1 t nyersvashoz tartozó 1 g/m^3 nedvességtartalmú fúvószéllel bevitt H_2-mennyiség

$$V_{H_2}^{l} = V_l \cdot 0{,}00124 \quad \text{m}^3\text{/t nyv} \qquad (2)$$

ahol V_l a fajlagos fúvószélmennyiség m^3/t nyv-ban.

A fajlagos fúvószélmennyiség a fúvósíkban parciálisan oxidálódó C-mennyiségnek a

$$C + 0{,}5\ O_2 + 0{,}5 \cdot 3{,}76\ N_2 = CO + 1{,}88\ N_2 \qquad (3)$$

reakció szerinti igénye, azaz 4,44 m^3/kg C.

2.1.2. A parciális oxidációkban résztvevő C-mennyiség

A nagyolvasztóba koksszal ($G_k \cdot 10^{-2} \cdot C_k$) és földgázzal ($V_{fg} \cdot 0{,}514$) bevitt C-mennyiségnek a nyersvas C-tartalmával és a direkt redukcióban felhasznált C-mennyiséggel csökkentett része (C_{pox}) parciálisan oxidálódik. A direkt redukció (r_d) részesedése a redukciós folyamatokban az

$$r_d = \frac{0{,}5 \cdot (CO_2 + CO) - d \cdot N_2}{CO_2 + 0{,}5 \cdot CO - d \cdot N_2} \cdot 100 \quad \% \qquad (4)$$

összefüggéssel [1] határozható meg, melyben
– CO_2, CO, N_2 a torokgáz %-os alkotói
– d a nedves fúvószélben lévő O_2/N_2 hányados, mely 1% nedvességtartalomnál 0,272.

Minthogy a redukcióval eltávolítandó fajlagos O_2-mennyiség az ISD Dunaferr Zrt. nagyolvasztóiban (zsugorítványban: Fe_2O_3 = 62,71%; FeO = 9,5%, pelletben: Fe_2O_3 = 82,79%; FeO = 2,57%; zsugorítvány: 50%, pellet: 50% a betétben) 392, 45 kg/t nyv., a direkt redukciós során a C + 0,5 O_2 = CO reakció szerint elfogyasztott fajlagos C-mennyiség:

$$C_d = \frac{12}{16} \cdot r_d \cdot 10^{-2} \cdot 392{,}45 = 2{,}94 \cdot r_d \quad \text{kg/t nyv} \qquad (5)$$

A parciális oxidációban részt nem vevő másik C-tétel a nyersvas C-tartalma (C_{nyv}), melynek elfogadható általános értéke 4,5%, vagyis 45 kg/t nyersvas.

Mindezek alapján a nagyolvasztóban parciális oxidációban résztvevő fajlagos karbonmennyiséget (C_{pox}) az alábbi egyenlet adja:

$$C_{pox} = G_k \cdot 0{,}87 + V_{fg} \cdot 0{,}514 - 2{,}94 \cdot r_d - 45 \quad \text{kg/t nyv} \qquad (6)$$

melyben:
C_{pox} – parciális oxidációban résztvevő C-mennyiség, kg/t nyv
G_k – a fajlagos kokszmennyiség, kg/t nyv
V_{fg} – a fajlagos földgázmennyiség, m^3/t nyv
r_d – a direkt redukció részesedése (4), %

2.1.3. A fajlagos fúvószél-, valamint medence- és torokgáz-mennyiség

A fajlagos fúvószél-mennyiség a (3) összefüggés szerint:

$$V_l = 4{,}44 \cdot C_{pox} \quad \text{m}^3\text{/t nyv} \qquad (7)$$

melynek birtokában a fúvószéllel a nagyolvasztóba vitt fajlagos H_2-mennyiség a (2) képlettel meghatározható. Az összes fajlagos H_2-mennyiséget pedig az alábbi egyenlet adja:

$$\Sigma V_{H_2} = V_{H_2}^{fg} + V_{H_2}^{l} = 1{,}95 \cdot V_{fg} + 0{,}00124 \cdot V_l \quad \text{m}^3\text{/tnyv} \qquad (8)$$

A η_{H_2} számítása – az (1) egyenlet szerint – már csak a torokgázzal távozó H_2-mennyiség ismeretét igényli. Minthogy a torokgáz H_2-koncentrációja ismert, így a torokgáz fajlagos mennyiségi adatára van szükség, ami a medencegáz-mennyiségének felhasználásával, a N_2-mérleg alapján számítható.

A parciális oxidációt leíró (3) reakció értelmében a medencegáz:

$$V_{mg} = \frac{2{,}88 \cdot 22{,}41}{12} = 5{,}38 \quad \text{m}^3\text{/kg C}$$

illetve

$$V_{mg} = 5{,}38 \cdot C_{pox} \quad \text{m}^3\text{/t nyv}$$

A medencegáz N_2-tartalma a (3) reakció alapján 1,88 · 100/288 = 65,28%, a torokgáz

$$N_2^{tg} = 100 - CO_2^{tg} - CO^{tg} - H_2^{tg} \quad \%$$

A vonatkozó N_2-mérleg szerint

$$V_{mg} \cdot N_2^{mg} \cdot 10^{-2} = V_{tg} \cdot N_2^{tg} \cdot 10^{-2}$$

amiből

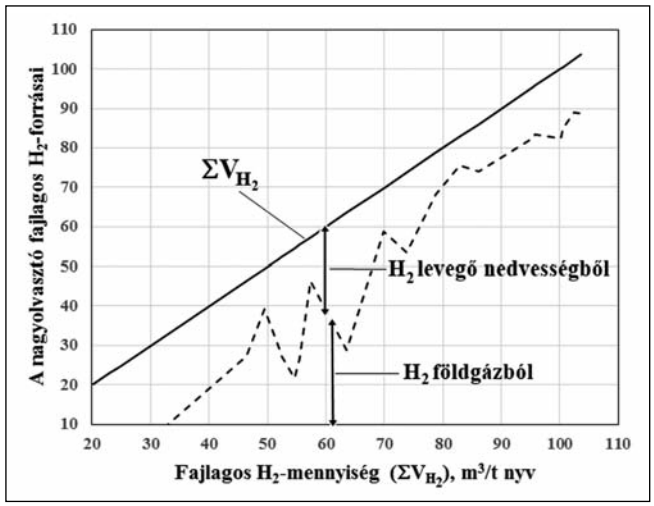
$$V_{tg} = \frac{V_{mg} \cdot N_2^{mg}}{N_2^{tg}} \quad \text{m}^3\text{/t ny} \qquad (9)$$

a torokgázzal elvitt kihasználatlan fajlagos H_2-mennyiség pedig:

$$V_{H_2}^{tg} = V_{tg} \cdot H_2^{tg} \cdot 10^2 \quad \text{m}^3\text{/t ny} \qquad (10)$$

ahol a H_2^{tg} a torokgáz H_2-tartalma térfogat%-ban.

A levezetések eredményeiként rendelkezésre állnak azok az összefüggések, melyekkel a H_2 kémiai kihasználását meghatározó (1) kifejezésben szereplő ΣV_{H_2} (8) és $V_{H_2}^{tg}$ (10) tételek kiszámíthatók és felhasználásukkal a H_2-mérleg alapján a η_{H_2} konkrét értéke megállapítható.



1. ábra. A nagyolvasztó H_2-forrásainak mennyiségi tartományai földgázbefúváskor

2.2. A H_2-források teljesítőképessége

A H_2-mérleg hitelességének és pontosságának biztosítása különösen a folyamatosan változó fúvószélnedvesség értékeinek gondos figyelembevételét is igényli. Az *1. ábra* szemlélteti, hogy a bevitt H_2-mennyiség forrás szerinti ingadozása – különösen kisebb fajlagos $V_{H_2}^{tg}$ esetén, amikor a fúvószélnedvesség adja a nagyobb H_2-mennyiséget – sokkal intenzívebb. Ez a hőtani egyensúly szempontjából is elhanyagolatlan lehet, minthogy a két H_2-forrás termikus disszociációjában a

$$\left.\begin{array}{lll} CH_4 = C + 2\,H_2 & \Delta H = 1664{,}82 & kJ/m^3\ H_2 \\ H_2O = H_2 + 0{,}5\,O_2 & \Delta H = 10\,826{,}59 & kJ/m^3\ H_2 \end{array}\right\} \quad (11)$$

szerint a vízgőzből származó H_2 képződése 6,5-szer annyi hőt igényel, mint a metánból kivált H_2.

2.3. A H_2 kémiai kihasználásának alakulása a fajlagos H_2-mennyiség függvényében

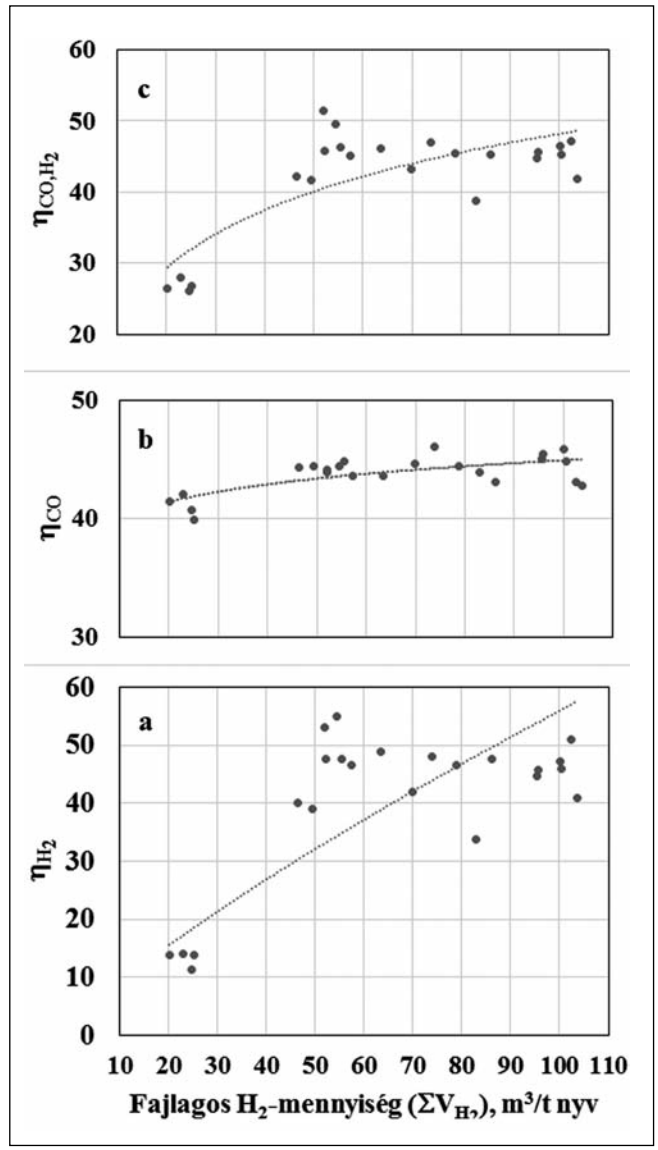
A H_2-kihasználás alakulását a ΣV_{H_2} függvényében a *2a ábra* szemlélteti. Látható, hogy az átlagosan elfogadható (45,85%-os, illetve összességében 40,18%-os) hasznosulás a ΣV_{H_2} = 45 m^3/t nyv érték fölötti tartományokban is számottevően ingadozik. Ezt feltehetően a H_2-források mennyiségi arányainak – 1. ábrán bemutatott – jelentős mértékű változásai okozzák. Átlagos értékeiben – a földgázbefúvást követően – nem mutat függőségi viszonyt a ΣV_{H_2}-vel.

A H_2-kihasználás alakulását – több szempontból – célszerű a CO-kihasználás változásával összevetni, esetleges összefüggések létének megerősítése vagy kétségbe vonása érdekében.

2.4. A H_2 és a CO kémiai kihasználásainak feltételezett kapcsolata

A CO kémiai kihasználása, a

$$\eta_{CO} = \frac{CO_2}{CO + CO_2} \cdot 100\ \%$$



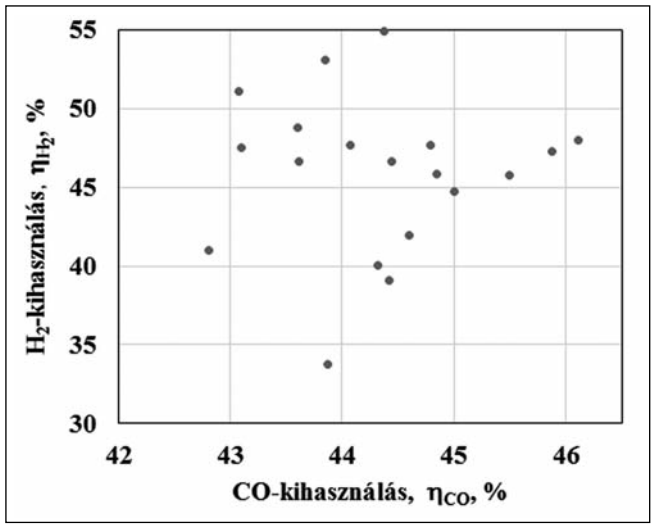
2. ábra. A redukáló gázok (H_2, CO) kémiai kihasználása a nagyolvasztóban lévő fajlagos H_2-mennyiség függvényében

egyenlet szerint – különösen önjáró zsugorítványok kohósításakor – a torokgáz megjelölt alkotóinak %-os részesedését felhasználva egyszerűen meghatározható. A *2b ábra* nyújt tájékoztatást a vizsgált időszakra vonatkozó, átlagosan 44,8%-os η_{CO}-ról. A ΣV_{H_2} = 45 m^3/t nyv H_2-mennyiséget meghaladó tartományokban – ellentétben az η_{H_2} módosulásaival – gyakorlatilag egyenletes metallurgiai tevékenységről ad tanúságot a különben is elfogadható η_{CO}-értéksor.

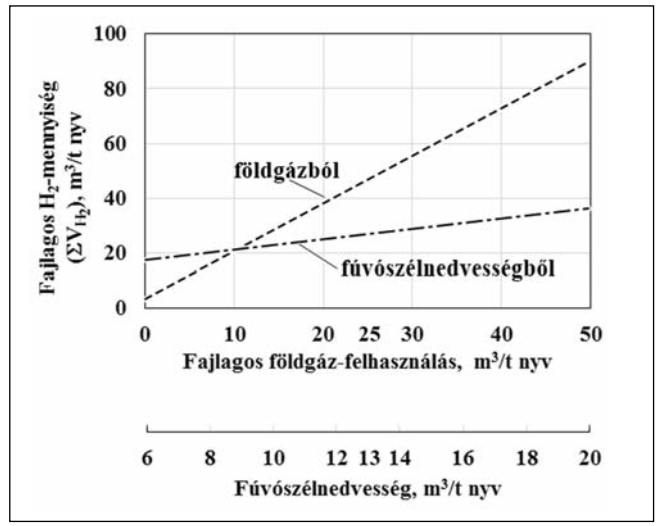
H_2-nel és a CO-dal lejátszódó vas-oxid-redukciós folyamatok közötti kapcsolat feltételezése egyrészt azon alapul, hogy mindkét redukciós folyamat legkedvezőbb hőmérséklete 800-1000 °C között van, tehát térben és időben azonos tartományban játszódnak le. Másrészt pedig azon nyugszik, hogy a

$$H_2O + CO = H_2 + CO_2$$

vízgázreakció feltételezett és kellő mértékű lejátszódása hatást gyakorolhat a H_2-es redukció H_2O-es és a CO-os redukció CO_2-termékeinek mennyiségi viszonyaira.



3. ábra. Az η_{CO} és az η_{H_2} közvetlen összefüggésének hiánya



4. ábra. A H_2-források fajlagos H_2-fejlesztése

A vonatkozó *3. ábra* egyértelműen jelzi, hogy a CO és a H_2 kémiai kihasználása között nem lehet egyértelmű közvetlen összefüggés. Az η_{CO} = 43-46% közötti tartományban ugyanis az η_{H_2} = 33,8-54,9%-os, sokkal kiterjedtebb értékei megférnek. Így a $H_2O + CO = H_2 + CO_2$ vízgázreakció (csak 900 °C-nál kisebb hőmérsékleteken van csekély termodinamikai támogatása) minden bizonnyal nem működik olyan mértékben, hogy jelentős hatásténye-zője legyen egy esetleges $\eta_{H_2} = f(\eta_{CO})$ összefüggésnek. A két redukálógáz kémiai kihasználása közötti összefüggés, és így a vízgázreakció számottevő lejátszódásának hiányát a 3. ábra jól szemlélteti.

Az η_{CO,H_2} nyilvánvalóan – a *2c ábrán* láthatóan – közel hozza és egységben kezeli a két gáz kémiai kihasználását, kiküszöbölve az esetlegesen fennálló értékbeli viszonylagos bizonytalanságokat.

A gázkihasználások mértékének pontos ismertetésére a redukciós alternatívák részesedésének meghatározásához is szükség van.

A *2a* és *2b ábra* együttesen érzékelteti, hogy az adott szilárd betétanyagok, elsősorban a vasérc-agglomerátumok szükséges gázpermeabilitásának és ezzel a gázkihasználás, illetve az indirekt vas-oxid-redukció lehetséges mértékének biztosításához a nagyolvasztónak minimálisan 50 m^3/t nyv H_2-nel kell rendelkeznie. Ez például 12,5 g/m^3 nedvességtartalmú fúvószél esetén – a *4. ábra* szerint – minimálisan 12 m^3/t nyv földgáz befúvását igényli az ISD Dunaferr Zrt. adottságai esetén. A nagyolvasztó fajlagos H_2-tartalmának további növelése esetén már nem áll fenn a szükséges gázpermeabilitás hiánya, így az már láthatóan nem növeli a gázok kémiai kihasználását, de állandó, s a H_2-re vonatkozóan kissé ingadozó értéken tartja.

3. A vas-oxid-redukciós folyamatok mértékei és részesedései a rendszerben

3.1. A H_2-es redukció mértéke a nagyon hiányos szakirodalmi közlemények alapján

A vas-oxid-redukciós folyamatokban részt vevő H_2-részesedés meghatározására utaló [1] szakirodalmi hivatkozás két ezirányú vizsgálat eredményeit is közli. Az egyik kutatás során földgázzal, koksszal, levegő-nedvességgel nagyolvasztóba vitt 135 + 32,7 + 26,3 = 194 m^3/t nyv H_2-mennyiségből 61,0 m^3/t nyv, azaz 30,5% végzett redukciós munkát.

A H_2-beviteli források némi módosításával egy következő vizsgálat során földgázzal 118,1 m^3, koksszal 32,4 m^3, szénporral 24,8 m^3, fúvószél-nedvességgel pedig 28,0 m^3, vagyis összesen 203,3 m^3/t nyv H_2-t vezettek a nagyolvasztóba, melyből 67,5 m^3/t nyv, azaz 33,20% vett részt a redukciós folyamatokban.

Ezeknél sokkal nagyobb mértékű redukciós részvételt mutatott egy, ugyanabban az [1] hivatkozási számú szakirodalomban közölt vizsgálat, melyben a földgázzal 8,92 kg/t nyv, a levegő nedvességtartalmával pedig 3,54 kg/t nyv, vagyis együttesen 12,46 kg/t nyv H_2 jutott a nagyolvasztóba. Itt 8,7 kg/t nyv, azaz a bevitt H_2 69,82%-a redukálta a vas-oxidokat.

Ez utóbbival gyakorlatilag egyező eredményhez jutott a [2] szakirodalmi forrásban közölt vizsgálat, amelyben a torokgáz H_2O = 4,95% (remélhetőleg csak a redukcióban képződött) és H_2 = 2,72% adatai alapján 68,75%-os redukciós részvételt állapítottak meg, a bevezetett H_2-mennyiség javára.

A nagyon eltérő (30,5-69,82%) redukciós részesedési, illetve H_2-kihasználási eredmények realitását (nem meggyőzően) csak az ottani feltételekre érvényesen elfogadva az állapítható meg, hogy a H_2 részvételi aránya a redukciós folyamatokban – a fajlagos H_2-mennyiség mellett – nehezen pontosítható, és számos sajátságos tényező (zsugorítvány-részesedés, a 900 °C-os adattartomány kiterjedése, a vízgázreakció mértéke, a diffúziós áram sebessége stb.) is függvénye. Minthogy a jelen vizsgálatok az ISD Dunaferr Zrt. nagyolvasztóinak munkájára jellemző alapadatokra épülnek, az eredmények elsősorban ott használhatók.

3.2. A H_2-es vas-oxid-redukció mértéke, illetve részesedése a teljes vas-oxid-redukcióban a jelen vizsgálatok alapján

A H_2 redukciós teljesítményének meghatározása a nagy-

olvasztóban nem merül ki a redukció mértékének és részesedésének megállapításával, minthogy a fajlagos energiafogyasztás szempontjából nagyon fontos, hogy a H_2-redukciós folyamat a CO-os vagy a C-os redukciós részesedését csökkenti, s ha mind a kettőt, akkor azokat milyen arányban.

Ebből következően a H_2-redukció *(r_{H_2})* mértékeinek meghatározása a CO-os és C-os redukciós folyamatok részesedéseinek megállapításait is szükségessé teszi.
Egy korábban kialakított szakirodalmi [1] közlés szerint a H_2-es redukció részesedése, *(r_{H_2})* az

$$r_{H_2} = \frac{\Sigma V_{H_2} \cdot 0{,}5\eta_{H_2}}{\frac{22{,}41}{32} \cdot O_r}$$

melyben az O_r = az eltávolítandó O_2, ami az ISD Dunaferrben 392,45 kg/t nyv. A vonatkozó egyszerűsítések révén:

$$r_{H_2} = \frac{\Sigma V_{H_2} \cdot \eta_{H_2}}{549{,}43} \cdot 100 \quad \% \qquad (12)$$

A vizsgálatokban felvett $\Sigma V_{H_2} = 20{,}15 - 103{,}68$ m^3/t nyv fajlagos H_2-mennyiségű tartományban a H_2-es redukció részesedése 0,50-9,13% volt, melynek részleteit az *5. ábra* tartalmazza, megközelítően egyenletesen növekvő mértékben a (ΣV_{H_2}) függvényében, arányosan a bevitt fajlagos H_2-mennyiséggel. Az összevetésre sor kerül az r_{CO} és az r_d tárgyalása után.

3.3. A CO-os vas-oxid-redukció mértéke, illetve részesedése a teljes vas-oxid-redukcióban

A CO-os redukció mértékének, illetve részesedésének (r_{co}) számítására a (13) számú képlettel elvileg azonos összefüggés szolgál, azaz

$$r_{CO} = \frac{\Sigma V_{CO} \cdot \eta_{CO}}{549{,}43} \cdot 100 \quad \% \qquad (13)$$

melyben (ΣV_{CO}) = a rendelkezésre álló összes, fajlagos CO-mennyiség, m^3/t nyv-ban.

3.3.1. A CO-os redukció C-szükségletének forrásai

Az indirekt (CO-os) redukcióhoz szükséges CO-mennyiségnek (hasonlóan a H_2-hez) két forrása van, éspedig:
– a parciális oxidációs folyamatban képződő CO,
– a direkt (C-os) redukcióban képződő CO.

A karbon parciális oxidációjában a

$$C + 0{,}5\ O_2 = CO$$

reakcióegyenlet szerint a képződő CO-mennyiség 22,41/12 = 1,87 m^3/ kg C.

A parciális oxidációban résztvevő C-mennyiség a (6) képlettel számítható, s így a medencegázban megjelenő CO-mennyiség:

$$V_{CO}^{mg} = c_{pox} \cdot 1{,}87 \quad m^3/t\ nyv \qquad (14)$$

ahol

V_{CO}^{mg} = a parciális oxidáció fajlagos CO-terméke, m^3/t nyv
C_{pox} = a parciális oxidáció fajlagos C-fogyasztása, kg/t nyv

A direkt redukció során képződő CO-mennyiség az előzőek szerinti 1,87 m^3/kg C figyelembevételével, a nyugvóban a kohéziós zóna alatt:

$$V_{CO}^{ny} = c_d \cdot 1{,}87 \quad m^3/t\ nyv \qquad (15)$$

az (5) egyenlet felhasználásával pedig

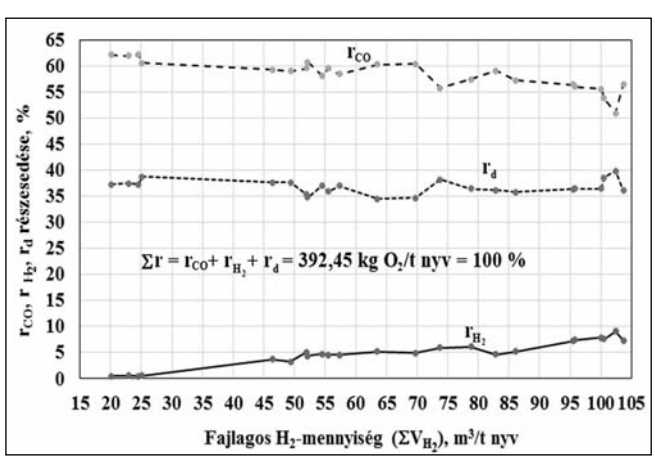
$$V_{CO}^{ny} = 2{,}94 \cdot r_d \cdot 1{,}87 \quad m^3/t\ nyv$$

A két forrásból származó CO-mennyiség összege (ΣV_{CO}) tehát a következő:

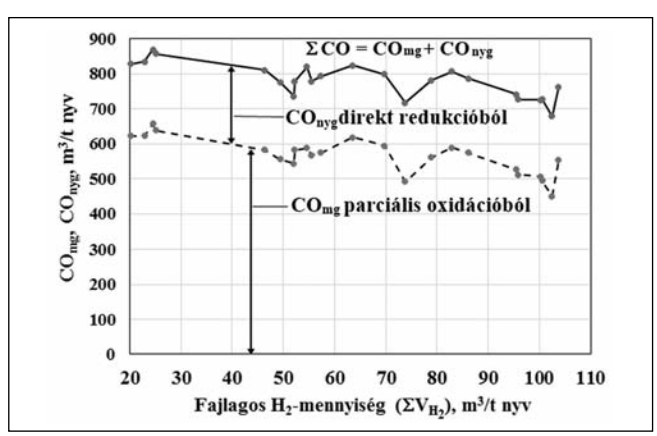
$$\Sigma V_{CO} = V_{CO}^{mg} + V_{CO}^{ny} = (C_{pox} + r_d \cdot 2{,}94) \cdot 1{,}87\ m^3/t\ nyv \qquad (16)$$

A medence és a nyugvó elkülönítése itt azért indokolt, mert a két CO-forrás a két elkülönített tartományban működik.

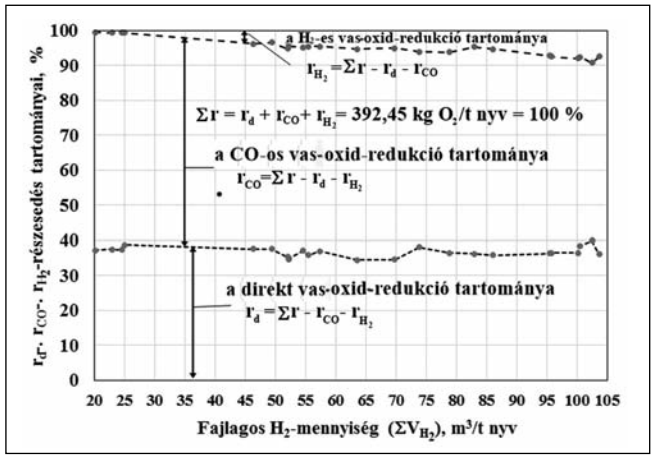
A két különböző forrásból származó CO-mennyiségekről a *6. ábra* ad részletes tájékoztatást, kifejezve egyben, hogy a parciális oxidáció a C_{pox}/C_d arányában több CO-t termel, mint a direkt redukció. A CO összmennyisége a vizsgált ΣH_2-tartományban 680–870 m^3/t nyv között változott, nyilvánvalóan csökkenő tendenciát mutatva a növekvő ΣV_{H_2}-vel.



5. ábra. A redukciós módozatok részesedése a nagyolvasztó fajlagos H_2-mennyiségének függvényében



6. ábra. A fajlagos CO-mennyiség forrástartományai a medencegázból (mg., parciális oxidációból) és a nyugvógázból (nyg., direkt redukcióból) a fajlagos H_2-mennyiség függvényében



7. ábra. A vas-oxid-redukciós folyamatok (C-os, CO-os és H_2-es) részesedésének mennyiségi tartományai

3.3.2. A CO-os redukció mértéke és változása a ΣV_{H_2} függvényében

A CO-dal lejátszódó indirekt vas-oxid-redukció mértéke a vizsgált tartományában 50,98-62,19%, melynek megoszlásáról az 5. ábra szintén nyújt tájékoztatást. Megfigyelhető az r_{CO} kismértékű csökkenése és az r_{H2} azonos mértékű növekedése a ΣV_{H2} növekedésének függvényében, amit az ábrán a vonatkozó két görbe, szinte tükörképű megjelenése is szemléltet. Mindez egyértelműen jelzi a H_2O + CO = H_2 + CO_2 vízgázreakció közreműködésének elhanyagolható mértékét, mely a H_2-es redukció rovására növelné a CO-os redukció részesedését.

3.3.3. A direkt redukció mértéke és stabilitása a ΣV_{H_2} függvényében

A vas-oxidok C-os, azaz direkt redukciójának (r_d) részesedése a redukciós módozatokban az előzőekben már szükségszerűen megadott (4) egyenlet szerint meghatározható. Elvileg – minthogy a $\Sigma r = r_d + r_{CO} + r_{H2} = 100\%$ – a direkt redukció mértéke az $r_d = 100 - r_{CO} - r_{H2}$ egyenlettel is kiszámítható, az r_{CO} és a r_{H2} eredményeinek birtokában. A feldolgozott üzemi adathalmaz esetenkénti elkerülhetetlen csekély pontatlansága természetesen nem engedi meg a (4) egyenlet mellőzését. A Σr pontosan 100%-os beállítása így is igényel minimális, elkerülhetetlen korrekciót.

Az r_d-részesedés számított eredményeit szintén az 5. számú ábra szemlélteti. Látható, hogy az r_d értékek a ΣV_{H2} függvényében, 34,49–39,89% között, gyakorlatilag kis ingadozással, stabil, átlagosan változatlan, vagyis – kedvezőtlenül – nem csökkenő tendenciát mutatnak.

A ΣV_{H2} növekedésével az r_{H2} és az r_{CO} mutat kis és azonos mértékű, ellenkező irányú távolodást, jelezve az r_{H2} + r_{CO} = konstans voltát a gyakorlatilag szintén konstans, de kedvezőtlen r_d mellett.

3.4. A redukciós alternatívák (r_{H_2}, r_{CO}, r_d) teljesítményeinek összehasonlítása és kapcsolatainak értelmezése

A redukciós alternatívák részesedésének összehasonlítását segíti a *7. ábra* is, mely a részesedések mértékeinek területnagyságát foglalja magában. Az ábra egyértelműen mutatja, hogy az r_d által birtokolt részesedési tartomány a ΣV_{H2} függvényében, gyakorlatilag és sajnálatos módon nem mutat csökkenő tendenciát. A H_2-es redukció a korábbi termodinamikai vizsgálatok [2] eredményei szerint sem alkalmas a direkt vas-oxid-redukció közvetlen, részleges kiváltására, de a gázokkal történő redukció részesedésének remélt növekedése révén megjelenő közvetett hatás következtében, a direkt redukció mértékének csökkenése látszott valószínűnek.

Látható, hogy az r_{CO}-részesedés tartománya a ΣV_{H2}-növekedés közvetett hatásaként annak következtében csökken károsan, hogy az ugyanazon hőmérsékletű és térbeli tartományban lejátszódó H_2-es redukció nem a CO-os redukció mellett, nem az indirekt (gázzal lejátszódó) redukció részesedésének növelésével, hanem a CO-os reakció adott mértékű kiváltásával játszódik le.

Ha a növekvő ΣV_{H2} mennyiség redukciós kinetikai képességei teljes mértékben érvényre jutnának és a termodinamikai lehetőség teljes kihasználásával végbe menő H_2-es vas-oxid-redukció H_2O képződményének számottevő része a H_2O + CO = H_2 + CO_2 reakció közreműködésével nagyobb mértékben növelhetné a r_{CO} nagyságát, és ezáltal a r_{H2} összegét, közvetve hozzájárulna ezzel az r_d részesedés csökkenéséhez. A jobb kinetikai értékekkel rendelkező H_2 támogató közreműködése a CO-os redukcióban, csak a kisebb fajlagos ΣV_{H2}-tartományban jelenik meg. Ebben feltételezhetően a gázkeverékben áramló különböző sebességű CO-, H_2-, CO_2-, és N_2-molekulák gyakori ütközéseinek, valamint az eltérő diffúziós képességek, koncentráció-kiegyenlítését szolgáló hatása jut érvényre.

Összefoglalás

A vizsgálatok eredményei alapján megfogalmazható kiemelkedő megállapítások a következők:

- Az ISD Dunaferr Zrt. nagyolvasztóinak vasércelegyből redukálandó fajlagos oxigénmennyisége 392,45 kg/t nyv (5);
- A vizsgálatok során a földgázból származó H_2-mennyiség 21,66–88,96 m^3/t nyv (11,11–45,82 m^3 földgáz/t nyv), a fúvószél nedvességéből eredő pedig 10,14–32,87 m^3/t nyv volt (8). A földgázból származó H_2, 6,5-szer kevesebb disszociációs hőt igényel, mint a fúvószélnedvességből származó (17). A számítások ΣH_2 = 0–103,68 m^3 H_2/t nyv. tartományban folytak;
- Elkészült a H_2 kémiai kihasználását meghatározó módszer, amely a nagyolvasztóba vezetett fajlagos H_2-mennyiség függvényében a H_2-mérleg alapján működik, elkerülve a torokgáz nedvességtartalmának származási bizonytalanságát (1);
- A H_2 kémiai kihasználása 33,8–54,9% között változva, de ~ 45 m^3/t nyv mennyiséget meghaladó ΣH_2/t nyv. értékeknél már nem növekedett, hanem kis ingadozással, átlagosan (~ 45,85%) konstans maradt (2. ábra);
- A CO kémiai kihasználása – hasonlóan az η_{H2}-höz – 45 m^3 H_2/t nyv-nál nagyobb értékeknél már szintén nem növekedett, hanem határozott, konstans (44%) értékeket mutatott (2. ábra);
- Az η_{H2} és az η_{CO} között fennálló közvetlen összefüggést a vizsgálatok nem mutattak, arra utalva, hogy a termodi-

namikailag is csekély valószínűségű $H_2O + CO = H_2 + CO_2$ reakció nem játszik jelentős szerepet a két redukálógáz hasznosulási mértékének kialakításában (3. ábra);
– Az indirekt redukciós folyamatok kellő mértékű érvényre jutása érdekében szükséges gázpermeabilitás biztosításához a nagyolvasztónak minimálisan 50 m^3/t nyv H_2-nel kellett rendelkeznie (pl. 15 m^3 földgázra volt szükség, 12 g/m^3 nedvességtartalmú fúvószél esetén). Ennél több H_2 már nem eredményezett a gázkihasználást tovább növelő nagyobb gázpermeabilitást (2. ábra);
– A parciálisan oxidálódó fajlagos C-mennyiség a direkt redukcióban és a nyersvasban szereplő mennyiségek levonása után 240,35–351,30 kg/t nyv között változott (6), a kapcsolódó fúvószél-szükséglettel (1067,15–1559,8 m^3/t nyv) együtt (7);
– A H_2 részesedésének mértéke a redukciós folyamatban a fajlagos H_2-mennyiség függvényében és vizsgálati tartományában (0–103,68 m^3/t nyv), azzal arányos összefüggésben növekedve, 0,5–9,13% volt (12);
– A CO-os redukcióhoz szükséges redukálógáz forrásaiból a parciális oxidáció 449,8–656,9 m^3/t nyv (13), azaz több CO származik, mint a direkt redukcióból (228,8–212,9 m^3 CO/t nyv) (15), ami összesen 678,6–869,8 m^3/t nyv CO-ot jelentett (16) (4. ábra, 6. ábra);
– A CO-os vas-oxid-redukció részesedése a ΣH_2 függvényében, a H_2-es redukció növekedését ellenirányban követve, kismértékben 62,19–50,98% között csökkent (13);
– A C-os, azaz direkt redukció a ΣH_2 növekedésének függvényében – bár észrevehető ingadozással, de – konstans, 34,49–39,89%-os közreműködésben részesült (4) meghatározott fajlagos C-fogyasztással (5);
– A H_2-es, ill. a CO-os redukció gyakorlatilag azonos mértékű növekedése, illetve csökkenése – a gyakorlatilag konstans mértékű direkt redukció mellett az $r_{H2} + r_{CO}$ = konstans értéket eredményez (5. ábra). Ebből következik, hogy a H_2-es redukció sem közvetlenül, sem közvetve nem csökkenti az energetikailag és a közvetlen C-fogyasztás szerint is káros direkt redukció részesedését, hanem az energetikailag kedvező CO-redukció gyakorlatilag azonos mértékét váltja ki, változatlanul hagyva a C-os és a (H_2+CO)-os redukciós teljesítményeket (7. ábra);
– Mindez arra utal, hogy a lejátszódásának csekély termodinamikai esélyével rendelkező $H_2O + CO = H_2 + CO_2$ reakciónak nincs számottevő szerepe a H_2-es vagy a CO-os redukció hatékonyságainak módosításában;
– A H_2-nek ~ 50 m^3/t nyv mennyiség (pl. 12 m^3 földgáz/t nyv és 12,5 g H_2O a fúvószélben) felett már nincs redukcióintenzitás szempontból a CO-nál kedvezőbb hatása. Előnye a kiváltott CO-dal csökkenő fajlagos C-hoz tartozó CO_2-emissziójának elmaradásából fakad.

Irodalom

[1] *Farkas Ottó:* Nyersvasmetallurgia. Tankönyvkiadó, Budapest, 1989.
[2] *Farkas Ottó, Farkasné Mayr Klára:* A nyersvasmetallurgia energetikai és ökológiai vonatkozásai, Digitális jegyzet, Miskolci Egyetem, 2013.
[3] *Farkas Ottó, Farkasné Mayr Klára, Harcsik Béla:* A kokszkemencegáz nagyolvasztókokszot részlegesen helyettesítő képessége. Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat, 2018. 5–6. pp. 1–6.
[4] *Farkas Ottó, Farkasné Mayr Klára, Harcsik Béla:* A kokszot részben helyettesítő gázok hatása a nagyolvasztók konkrét CO_2-emissziójára, Bányászati és Kohászati Lapok, Kohászat, 2019. 3. pp. 1–5.

KONDÁS BÉLA

Autóipari hatások a hengerelt acéltermékek európai kínálatára

A cikk az elérhető szakirodalmi források, valamint a szerző autóipari beszállításban szerzett szűk másfél évtizedes tapasztalata alapján kíván áttekintést nyújtani arról, hogy az elmúlt években hogyan bővült az európai hengerelt acélok termékkínálata az autóiparban végbement változások hatására. Az elemzés csoportokba foglalva ismerteti az új terméktípusokat, melyeket a szerző példákkal illusztrál.

1. Bevezetés

A gépjármű- és gépjárműalkatrész-gyártást az uniós gazdaság húzóágazataként szokás emlegetni, amely közvetlen hatást gyakorol számos további iparágra. Az elmúlt években sokat lehetett hallani az autóipar robbanásszerű fejlődéséről, amit a magas vevői igények, valamint az egyre szigorodó törvényi előírások kielégítésére irányuló nagyszámú innovatív technológiai megoldás alkalmazásának köszönhettünk. A 2020. évben sokak szerint végérvénye-

Kondás Béla *1999-ben szerzett gépész-, majd 2002-ben kohómérnöki oklevelet a Miskolci Egyetemen. 2009-től a thyssenkrupp Materials Hungary Zrt. (ex-Ferroglobus) minőségügyi vezetője. Kutatási területe az autóiparba beszállítást végző magyarországi kis- és középvállalatok kohászati kész- és félkész termék felhasználásának problémái és azok megoldásai.*