

Az acélipar zöld átállásának technológiai áttekintése, annak műszaki gazdasági vonatkozásai

Technological overview of the green transition of the steel industry and its techno-economic implications

BURÓ BEÁTA

CEng, MIMMM, Projekt manager, Doktorandusz,
SteelTech-Center Hungary, H-3530 Miskolc, Egyetemváros
E-mail: beata.buro@uni-miskolc.hu



A vas- és acélipar felelős a világ üvegházhatású gázkibocsátásának több mint 7%-áért. A Párizsi Megállapodás hőmérsékleti céljainak elérése érdekében a CO₂-kibocsátás drasztikus csökkentésére van szükség. Számos alacsony vagy nulla CO₂-kibocsátású vas- és acélgyártási projekt van tervben vagy folyamatban a zöldacél előállítás érdekében. Számos megközelítés létezik a szén-dioxid-kibocsátás jelentős csökkentésének elérésére az acéliparban, mint körforgásos gazdaság, illetve az egyes technológiák CO₂-csökkentésére és közvetlen szén-dioxid-kibocsátás elkerülése is. A vas- és acélipar zöld átállásának viszont számos műszaki-gazdasági vonatkozása van a technológia, infrastruktúra, tőke, működési költségek, kereslet és a politikai irányelvek szempontjaiból. Az átállás globális kihívást jelent, amely globális választ tesz szükségessé.

Kulcsszavak: szén-dioxid-kibocsátás, alacsony szén-dioxid-kibocsátású fejlesztés, zöld vas- és acélipar, gazdasági kapcsolat

The purpose of the Paris Agreement is to coordinate the global response to climate change caused by global warming. Global greenhouse gas emissions must fall by 33–41 Gt CO₂e (Gigatons of CO₂ equivalent) by 2030 and by 8–20 Gt CO₂e by 2050 to meet the Paris Agreement's temperature target. Steel is an essential material in modern life. Although the iron and steel industry is responsible for more than 7% of the world's greenhouse gas emissions. A number of low- or zero-carbon steelmaking projects are planned or underway to reduce carbon footprints and produce green steel. However, achieving drastic reductions in CO₂ emissions requires a new, transformative approach to iron and steel production.

Globally, the largest share of steel greenhouse gas emissions from the iron and steel industry comes from integrated processes, where coal, coke and gas is used to reduce iron ore to produce pig iron. The other significant proportion of the emission comes from the power generation required to operate electric arc furnaces (EAF) and rolling mills. There are several approaches to achieving significant reductions in carbon dioxide emissions in the steel industry. The main approaches can be grouped as circular economy, technologies for CO₂ reduction and avoidance of direct carbon dioxide emissions. The green transition of the iron and steel industry, on the other hand, has many technical and economic aspects: technology, infrastructure, capital, operating costs, demand and policies. The transition is a global challenge that requires a global response and will require collaboration between countries, public and private stakeholders.

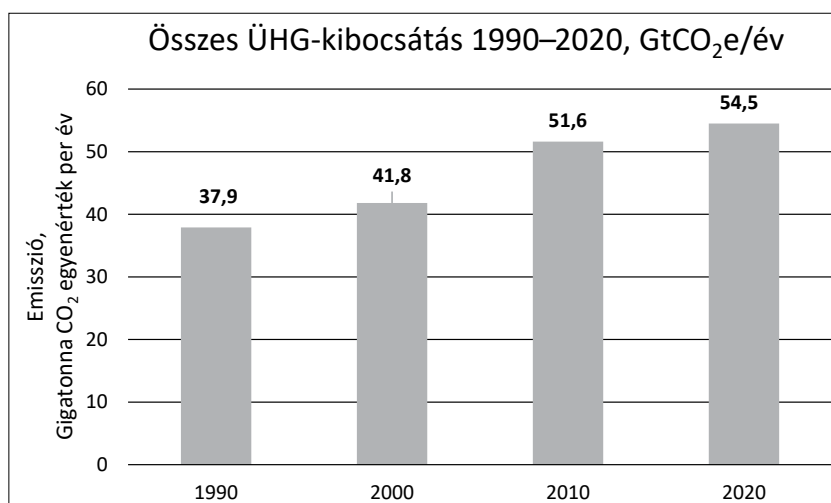
Keywords: carbon dioxide emissions, low carbon development, green iron and steel industry, economic implication

1. Bevezetés

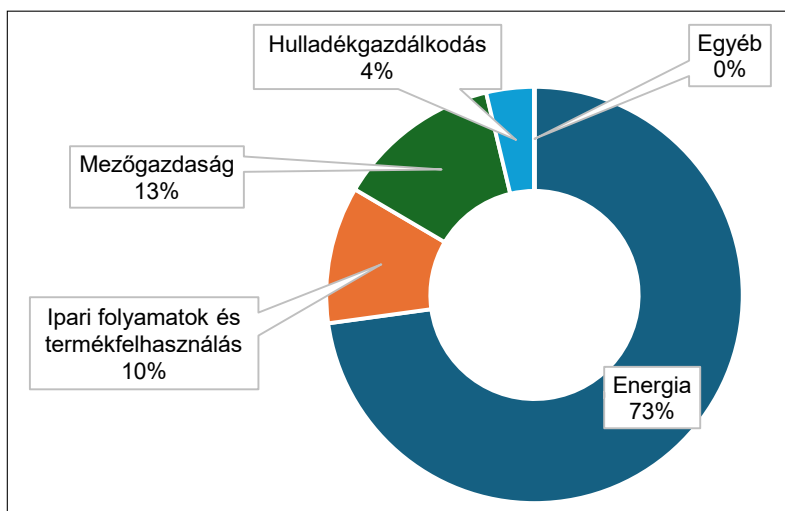
Az üvegházhatású gázok (ÜHG-k) azok a gázok, amelyek megkötik a hőt a légkörben, és üvegházhatást okoznak. A megnövekedett üvegházhatás okozta globális felmelegedés jelentős környezeti kockázatok elé állítja a Föld bolygó lakóit (Griffin 2021).

A Párizsi Megállapodás célja a globális felmelegedés okozta klímaváltozásra adott globális válasz koordinálása, hét üvegházhatású gázra vonatkozik (CO₂ – szén-dioxid, CH₄ – metán, N₂O – dinitrogén-oxid, HFC – fluor-szénhidrogén, PFC – perfluor-karbon, SF₆ – kén-hexafluorid, NF₃ – nitrogén-trifluorid). (KSH 2023) A CO₂ a világ összes ÜHG-kibocsátásának 81%-át teszi ki, ezért a klímaváltozás és a globális felmelegedés kezelésének kulcsa a CO₂-kibocsátás csökkentése (Wang 2021).

Az 1. ábra mutatja az összes ÜHG-kibocsátást 1990, 2000, 2010 and 2020-ban. A globális ÜHG-



1. ábra. Teljes nettó ÜHG-kibocsátás. Forrás: saját szerkesztés UN-dokumentum alapján (UN 2023)



2. ábra. Globális üvegházhatású gázok kibocsátása szektorokként. Forrás: saját szerkesztés OECD.Stat- adatok alapján (OECD.Stat, 2023)

kibocsátás 2022-ben rekord magas értéket ért el, 57,4 GtCO₂e (Gigatonna CO₂-egyenérték), ami 50% emelkedés a 1990-es értékekhez képest.

A globális üvegházhatású gázok kibocsátásának 2030-ra 33–41 GtCO₂e-re, 2050-re pedig 8–20 GtCO₂e-re kell csökkennie, hogy elérje a Párizsi Megállapodás hőmérsékleti célját (UN 2023).

Világszerte a legtöbb ország már elkötelezte magát a CO₂-kibocsátás csökkentésére a közelmúltban bejelentett gyorsított céloknak megfelelően. Az EU az üvegházhatást okozó gázok 1990-es nettó kibocsátásának 55%-os csökkentését tűzte ki célul 2030-ra és a nettó nulla kibocsátást 2050-re (European Commission 2023),

Az USA ismét csatlakozott a Párizsi Megállapodáshoz (Blinken 2021), és kötelezettséget vállalt arra, hogy 2030-ra 50–52%-kal csökkenti a nettó ÜHG-kibocsátást a 2005-ös szinthez képest (US Department of State 2021), valamint kötelezettséget vállalt a nettó nullakibocsátás mellett 2050-re. Kína célja, hogy a csúcskibocsátás 2030-ban lesz, és eléri a nettó nulla emissziót 2060-ra (Zhang 2023).

E kötelezettségvállalásokhoz való igazodás érdekében a vas- és acéliparnak alapvető átalakulásra van szüksége a zöld átmenet elősegítése érdekében.

Ennek a tanulmánynak a célja, hogy a vas- és acélipar zöld átmenet technológiai szempontjait áttekintse és különböző publikációkból azonosítsa a zöld átmenet műszaki-gazdasági vonatkozásait.

2. Acélipari áttekintés

Az acél a modern életben nélkülözhetetlen anyag és kulcsfontosságú eleme a dekarbonizációnak is, mivel alapvető szerepet tölt be a különféle technológiákban, például az elektromos járművekben és a szélturbinákban.

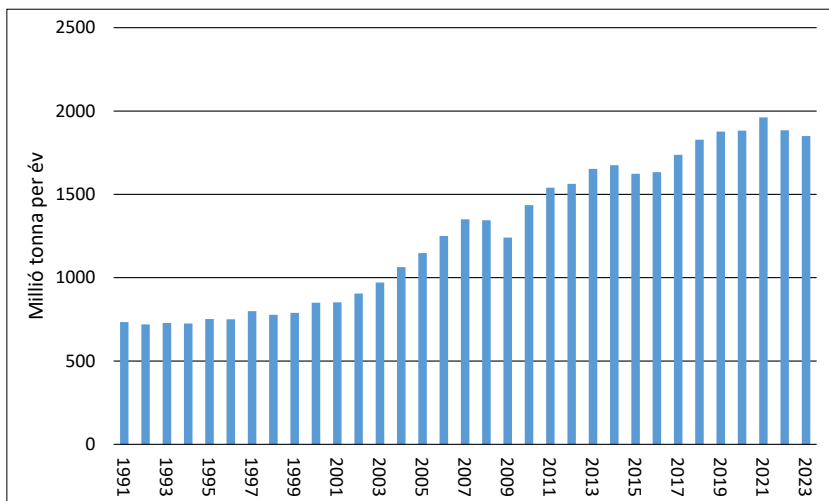
A 2. ábra az ÜHG-kibocsátás megoszlását mutatja a különböző szektorok szerint. A vas- és acélipar az energia kategóriába tartozik és a világ üvegházhatású gázok kibocsátásának több mint 7%-áért felelős.

Globális dinamika mutatkozik a karbonsemleges és fenntartható acélgyártás, az úgynevezett „zöld acélgyártás” megvalósításának irányában. Az, hogy egy acéltermék zöld legyen,

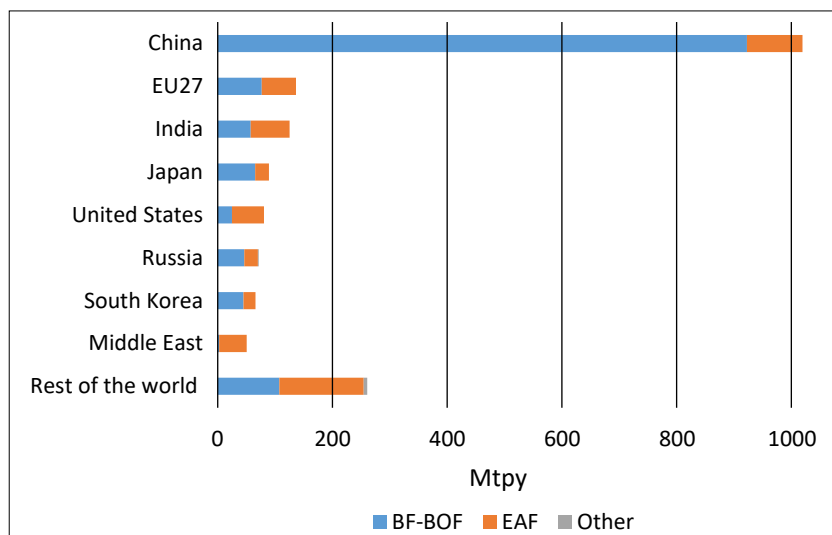
elsősorban a karbon lábnyoma vagy a magában foglalt karbonkibocsátás határozza meg (Muslemeni 2021). Ezért számos alacsony vagy nulla CO₂-kibocsátású acélgártási projekt van tervben vagy folyamatban a karbonlábnyom-csökkentése és a zöldacél előállítás érdekében. A CO₂-kibocsátás drasztikus csökkentésének eléréséhez azonban a vas- és acélgártás új, átalakuló megközelítésére van szükség.

2.1. Nyersacéltermelés

A nyersacél teljes termelése 2023-ban 1850 millió tonna volt (WorldSteel Association 2023). A 3. ábra a nyersacél előállításának időbeli, történelmi alakulását mutatja be. A nyersacéltermelés az elmúlt húsz évben csaknem megduplázódott, különösen a kínai termelés növekedése miatt (WorldSteel, WorldSteel Association 2023).



3. ábra. Nyersacéltermelés. Forrás: saját szerkesztés WorldSteel Association (WorldSteel Association 2023)



4. ábra. A nyersacéltermelés technológia szerint 2022-ben, millió tonna/év. Forrás: saját szerkesztés a WorldSteel alapján (WorldSteel WorldSteel Association 2023)

2.2. Nyersacéltermelés technológia szerint

A világ acélszükségletének nagy részét továbbra is integrált úton állítják elő, nagyolvasztó és konverter- (BF-BOF) technológiával, amely az iparág legnagyobb CO₂-kibocsátását eredményezi. A primer acélgártási folyamat során a vasércet a nagyolvasztóban koksszal vagy szénnel elegyítve redukálják nyersvasvá, amelyet ezt követően a konverterben nyersacéllá finomítanak.

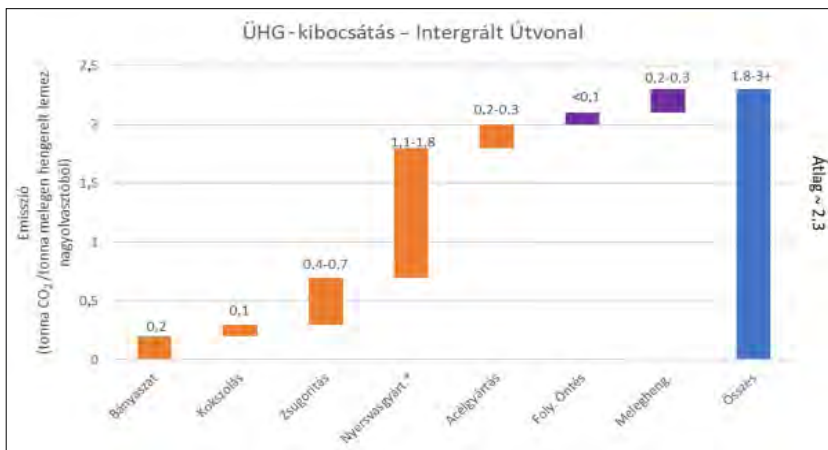
Az acél az egyik legnagyobb arányban újrahasznosított anyag a világon, mivel az acélhulladékok legnagyobb részét az elektromos ívkemencékben (EAF) hasznosítják újra. Amikor a „minimill”-ek (kis kapacitású lineárisan elrendezett, kizárólag újrahasznosításra létesült acélművek) először megjelentek, alacsony költségű, hulladék alapú alternatívát kínáltak a főleg érc alapú integrált acélgártás helyett.

Manapság vasszivacs (Direct Reduced Iron – DRI és Hot Briquetted Iron – HBI) alapú EAF üzemek is működnek. A DRI egy alternatív nyersanyag az acélgártásban a hulladék helyett, és a vasérc szilárd halmazállapotú közvetlen redukciójából (azaz teljes átolvasztás nélkül) redukálószerrel, például földgázzal, szintézisgázzal vagy szénnel állítják elő. HBI a vasszivacs brikettálásával állítható elő.

2022-ben a világ acéltermelésének körülbelül 71,5%-át nagyolvasztó és konverter- (BF-BOF) technológiával, körülbelül 28,8%-át pedig EAF útvonalon állították elő (WorldSteel Association 2023). A 4. ábra a nyersacéltermelést mutatja be technológiák és országok szerint. A grafikonon jól látható, hogy bár egyes országokban az EAF technológia a domináns, a legnagyobb acélgártók, mint például Kína, integrált, BF-BOF útvonalon állítják elő a nyersacél nagy részét (WorldSteel Association 2023).

2.3. Üvegházhatású gázok kibocsátása technológia szerint

Az üvegházhatású gázok kibocsátása kategóriákba sorolható. A közvetlen (Scope 1) ÜHG-kibocsátások, amelyek egy vállalat



5. ábra. Üvegházhatású gázok kibocsátása az integrált acélgyártás lépéseiben (* min. tartalmaz biokarbonhelyettesítőt). Forrás: saját szerkesztés Carbon Trust alapján (Carbon Trust 2023)

tulajdonában vagy ellenőrzése alatt álló forrásokból származnak. A közvetett ÜHG-kibocsátás (Scope 2) a vállalat által felhasznált vásárolt villamosenergia-termelésből származó ÜHG-kibocsátást jelenti. A rendszer további kiterjesztésének lehetősége a „Scope 3” kategória bevonása, amely lehetővé teszi az összes többi közvetett kibocsátás kezelését, de ez a tanulmány a közvetlen és közvetett kibocsátásra összpontosít (World Resources Institute 2004).

Globálisan a vas- és acéltipar üvegházhatású gáz-kibocsátásának legnagyobb hányada az integrált acélgyártáshoz köthető, ahol a szénből, kokszból és gázból származó szén-monoxidot vasérc redukálására, azaz nyersvas előállítására használják fel, majd azt dolgozzák fel folyékony acéllá a folyékony nyersvas oldott kísérőelem tartalmának, főleg karbon eltávolításával, ami további CO₂-kibocsátást okoz. A kibocsátás másik

jelentős hányada az elektromos ívkemencék (EAF) működtetéséhez szükséges energiatermelésből és a hengerművek földgáz üzemű hevítőkemencéiből származik, amelyek az acél féltermékek feldolgozására szolgálnak.

Az integrált acélművek közvetlen kibocsátása jellemzően 1,8–3 tonna CO₂/tonna előállított acél (Steelonthenet 2023). Az 5. ábra összegzi a BF-BOF technológia átlagos becsült kibocsátásait.

A hulladék alapú elektromos ívfényes kemencével gyártó (EAF) üzemek kibocsátása többnyire közvetett. A CO₂-kibocsátást többségét nem közvetlenül az acélgyár termeli,

hanem a kemencét villamos energiával ellátó villamosenergia-termelők. Egy tipikus EAF esetében a közvetlen kibocsátás általában 0,06–0,1 tonna CO₂/tonna acél, a közvetett kibocsátások pedig további jellemzően 0,4 tonna CO₂-t jelenthetnek egy tonna acél esetén (Steelonthenet 2023).

A vasszivacs alapú EAF-ek CO₂-kibocsátása becslések szerint 2–3 tonna CO₂/tonna acél, ha az eljárás karbon alapú, vagy 0,7–1,2 tonna CO₂/tonna acél, ha az eljárás gáz alapú (Steelonthenet 2023).

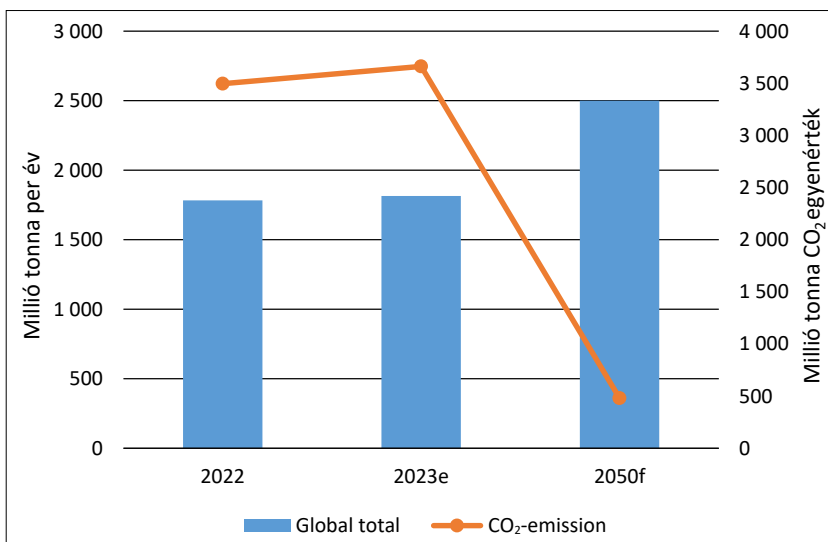
2.4. Acélkereslet

Az acél iránti kereslet 1815 millió tonnára becsülhető 2023-ban (Worldsteel 2023), és becslések szerint 2050-re 2500 millió tonnára emelkedhet (World Economic Forum 2022, IEA 2020), ami körülbelül 40%-os növekedés a mai szinthez képest.

A Worldsteel adatai alapján az acéltipar CO₂-kibocsátása 2022-ben 3,5 milliárd tonna volt. Az iparág változásai nélkül az igények kielégítése érdekében megnövekedett termelés mellett ez a szám körülbelül 4,8 milliárd tonna CO₂ lenne 2050-ben.

A 6. ábra mutatja az acéltipar 2022-es és 2023-as teljes CO₂-kibocsátását és a 2050-ben várható kibocsátást technológiai változtatások nélkül, valamint a Párizsi Megállapodás szerinti CO₂-kötöletességi szintet.

A Párizsi Megállapodás és hosszú távú céljainak betartása nemcsak marginális fejlesztést



6. ábra. Az acél iránti kereslet és előrejelzés, valamint a CO₂-kibocsátási intenzitás és a vállalt CO₂-szint a Párizsi Megállapodás szerint 2050-ben. Forrás: saját szerkesztés a WorldSteel alapján (WorldSteel, Sustainability Indicators 2022, Hornby 2022)

tesz szükségessé, hanem az uralkodó társadalmi-gazdasági rendszer „alapvető szerkezeti átalakítását” (Mayer 2019). Körülbelül 90%-os CO₂-kibocsátás-csökkentés lenne szükséges az acéliparban. Ezért az ambíciók és a végrehajtás szintjei között megfigyelt szakadék megszüntetése számos kihívással néz szembe (OECD 2022).

2.5. Általános dekarbonizációs stratégiák

Számos megközelítés létezik a szén-dioxid-kibocsátás jelentős csökkentésének elérésére az acéliparban. A fő megközelítések csoportosíthatók, ezek a körforgásos gazdaság, technológiák CO₂-csökkentése és közvetlen szén-dioxid-kibocsátás elkerülése.

2.5.1. Körforgásos gazdaság

A körforgásos gazdaság a lineáris üzleti modellekről – amelyekben a termékeket nyersanyagokból állítják elő, majd hasznos élettartamuk végén eldobják – a körforgásos üzleti modellek felé való elmozdulást jelenti, melynek során az intelligens tervezés a termékek vagy alkatrészek javításához, újrafelhasználásához és újrahasznosításához vezet (Forum 2014). Az acélipar már ma is a globális körforgásos gazdaság szerves része, mivel az acél az egyik legtöbbet újrahasznosított anyag a világon.

A 100%-os acélhulladék-alapanyag és a nulla szén-dioxid-kibocsátású villamosenergia-ellátás kombinálása máris csökkenti az ágazat szén-dioxid-kibocsátását. A szennyező elemek felgyülemelése és az acélhulladék korlátozott elérhetősége miatt azonban a teljesen hulladék alapú acélgyártás elterjedése korlátozott (Radloff 2023). Ez azt jelenti, hogy 2050-ig és azt követően is nagy mennyiségű primér vashordozóból előállított acélra lesz szükség. A fő CO₂-kibocsátás a nagyolvasztókból származik a vasgyártás során, ezért ebből a folyamatból származó szén-dioxid-kibocsátás csökkentése a dekarbonizáció legfontosabb első lépése.

2.5.2. CO₂-csökkentésre irányuló technológiák

Ezek a technológiák magukban foglalják a meglévő folyamatokban a karbonfelhasználás csökkentését, a belső folyamatgázok felhasználását, valamint a CO₂ hasznosítását nyersanyagként, kémiai átalakítással (karbonleválasztás és -hasznosítás (CCU) és/vagy karbonleválasztás és -tárolás (CCS)).

A kibocsátás növekedésének jelentős költség nélküli leggyorsabb lassításának kulcstényezője a nagyolvasztó energiahatékonyságának javítása (Holappa, MDPI 2020). A hatékonyság optimalizálása érdekében különféle lehetőségeket vizsgáltak meg:

- új vas-szén agglomerátumok,
- vasszivacs- (HBI) adagolás nagyolvasztóba,
- hidrogénhasználat nagyolvasztóban.

A karbon helyettesítése kihívást jelent, azonban a biomassza, amely megújuló nyersanyag alacsony karbonlábnyommal (dokumentáltan élelciklus során) megoldást jelenthet. Egyes tanulmányok azt találták, hogy az előre feldolgozott biomassza, mint például a faszén használata akár 57%-os CO₂-kibocsátást is elenyészlyözhat (Mandova és mtsai. 2018).

A technológiák fejlettségi szintje miatt előfordulhat, hogy a BF-BOF technológia CO₂-kibocsátásának további csökkentése érdemben nem lehetséges (Bhaskar 2022). A további csökkentés eléréséhez szükség van a szén-dioxid leválasztására, hasznosítására és tárolására (Cachola 2023).

Az elmúlt évtizedekben megnőtt az érdeklődés a CCS alkalmazások iránt a különféle iparágakban. Ennek ellenére csak egyetlen, már működő CCS megoldás létezik a vas- és acéliparban, az Emirates Steel Abu-Dhabiban található üzemében (Global CCS 2022).

A CCS nem tekinthető hosszú távú megoldásnak a CO₂-kibocsátás csökkentésére, csak átmeneti módszerként használható. Ennél jobb módszer lehet a szén-dioxid leválasztása, felhasználással kombinálva (CCU) (Holappa, MDPI 2020).

Különféle technológiák is fejlesztés alatt állnak a megkötött CO₂ hasznosítására. A CO₂ kémiai átalakítható más termékekké, például műanyagokká, betonná vagy bioüzemanyaggá, illetve felhasználható az olajkinyerés fokozására (WSA CCUS 2023).

Megemlíthetők még a következő technológiák, úgymint redukciós olvadéktechnológiák és fluidágyas reaktoreljárások.

Az olvadékredukció olyan vasgyártási folyamatok csoportjára használatos kifejezés, melyeknek célja a meglévő nagyolvasztó-útvonal alapvető problémáinak leküzdése, mint például a nagyüzemi működéstől, a koksztól és a dúsított vashordozóktól való függés. A legtöbb ilyen technológia azonban jelentéktelen mértékben csökkenti a CO₂-kibocsátást, és a CCS és CCUS technológiák integrációján alapul (Rhamdhani 2023, Jun Zhao 2020).

A biomassza alkalmazásával is csökkenthető a CO₂-kibocsátás, amely az olvadékredukciós eljárásoknál is használható, mint például a braziliai Vale tulajdonában lévő Tecored technológia (Nodin 2008).

Az olvadékredukciós technológián alapulva léteznek forradalmi áttörést ígérő, azaz „breakthrough” technológiák is, mint például az IBRSR (iron bath reactor smelting reduction), a HIsarna olvadék-redukciós reaktor és a HPSR (hydrogen plasma smel-

ting reduction) technológiák (Draxler, Greensteel for Europe 2021).

A HIsarna az EU ULCOS (Ultra Low CO₂ Steel-making) projekt kezdeményezésének része, amelyet a Tata Steel Europe vezetett európai acélipari konzorcium fejlesztett ki (Yan 2023). Az eljárás során a hagyományos vasgyártási módszerekhez képest számos előfeldolgozási lépés kimarad, a vasérc közvetlenül a folyékony nyersvasat és salakot tartalmazó reaktor-terbe kerül, ahol a befűvatott karbonnal és reakciógázokkal keveredve megolvad és folyékony nyersvas-sá alakul (Steel 2020, Yan 2023).

Fluidágyas reaktortechnológiák alkalmasak finom méretű anyagok feldolgozására. Számos eljárásból a következő technológiák működtek ipari méretben: FINMET, a CIRCORED és a FINEX (Li 2023). Viszont a legtöbb ilyen technológia alig csökkenti a CO₂-kibocsátást az integrált útvonalhoz képest. Hidrogén és megújuló energia alkalmazásával lényegesen nagyobb mértékű emissziócsökkentés érhető el, mint például HYREX (POSCO, Dél-Korea) vagy HYFOR (Primetals, Ausztria) technológiák. Eddig csak a CIRCORED technológiában használtak kizárólag hidrogént redukálószerként (Lang, Köpf, Valery n.d.), bár az üzem 2006-ban kereskedelmi problémák miatt bezárták (Martin Pei Markus, MDPI 2020).

2.5.3. A közvetlen szén-dioxid-kibocsátás elkerülése

Ebbe a kategóriába a „breakthrough”, azaz áttörést jelentő technológiák tartoznak, mint például a karbon helyettesítése megújuló villamos energiával és/vagy fosszilis karbonmentes redukálószerrel (EUROFER 2019). Ide tartozik még a nagyobb mértékű termelés megújuló energiával, elektromos ívfényes kemencékben, illetve az acél közvetlen elektrolízise (Fleischanderl 2023).

Az acélhulladék újrahasznosítás lényegesen kevesebb CO₂-t bocsát ki, mint a nagyolvasztó és konvertertechnológia, és a termelés elérheti a nulla kibocsátást, ha teljes mértékben megújuló villamos energiát és megújuló karbonhordozókat használnak a technológia üzemeltetéséhez.

Alternatív vasgyártási technológiák közül a gázalapú DRI-gyártás már lényegesen alacsonyabb üvegházhatású kibocsátással és gazdaságosan működhet. A redukciós folyamatban a szén-monoxid mellett a földgázból származó hidrogén is részt vesz – arányának növelését évtizedek óta vizsgálják –, ami csökkenti a CO₂-kibocsátást. Hidrogénes eljárással a CO₂-kibocsátás akár 80%-kal is csökkenthető az integrált acélgyártási útvonalhoz képest (MIDREX 2017).

A három svéd cég, az SSAB, LKAB és a Vattenfall AB által indított HYBRIT kezdeményezés célja, hogy létrehozzák az első fosszilis karbonmentes

értékláncot a bányászattól a kész acélig (Martin Pei Markus, MDPI 2020). A projekt a vasércpellet aknakemencében történő redukcióját valósítja meg a víz elektrolízisével előállított hidrogén- és a fosszilis, karbonmentes tüzelőanyag alapú villamos energia felhasználásával. (Green Steel World Editorial Team 2022). A projekt megkezdte kísérleti működését, és 2021-ben legyártották az első fosszilis karbonmentes acélt.

A hidrogénplazma-olvasztási redukció (HPSR) ionizált hidrogénplazma segítségével, közvetlenül redukálja a vasércet folyékony nyersvassá (Rhamdhani 2023, Zarl, Farkas, Schenk 2020).

A Voestalpine Stahl Ausztriában a SuSteel projekt keretében építette fel kísérleti üzemét. Lehetőség van arra, hogy ez a módszer 2050-re áttörést jelentő acélgyártási technológiává váljon.

A lúgos vasérc-elektrolízis (alkaline iron ore electrolysis), vagyis az „electrowinning” eljárás során az áramot, egy inert anódról kis vasrészecskéket tartalmazó, folyékony, lúgos oldaton vezetik át, amikor a részecskék lerakódnak és redukálódnak a katódra alacsony hőmérsékleten (Draxler, Greensteel for Europe 2021). Ezt a technológiát különböző projektek részeként tanulmányozzák laboratóriumi léptékben, mint például az ULCOS és a SIDERWIN (SIDERWIN 2023).

Az Electra egy alacsony hőmérsékletű, zéró szén-dioxid-kibocsátású elektromos eljárás, amellyel alacsony minőségű vasércet finomíthatóak nagy tisztaságú vassá 60 °C-on, bevált ipari méretű elektrokémiai és hidrometallurgiai eljárások felhasználásával (Electra, n.d., John 2023).

Az olvadt állapotú oxidelektrolízis (Molten Oxide Elektrolízis) elektrometallurgiai technológia a nyersacél előállítására közvetlenül vasércből. Ezt a technológiát jelenleg az EU-ban fejlesztik, főként az ArcelorMittal (ULCOS, IERO és VALORCO projektek), az USA-ban pedig az MIT és a Boston Metal cég (Draxler, Greensteel for Europe 2021). A folyamat gazdasági megvalósíthatósága továbbra is kihívást jelent, főként a megfizethető, karbonmentes anód hiányának tulajdonítható, amely képes ellenállni a korrózív környezetnek (Rhamdhani 2023).

Ezek a technológiák azonban egyelőre nem állnak rendelkezésre, egyesek a kutatás korai szakaszában, mások pedig csak a kísérleti/demonstrációs fázisban vannak (Muslemani 2021, Fan 2021).

3. Műszaki-gazdasági következmények

Globálisan az acélipari vállalatok 14%-a találhatja veszélyben magát gazdasági szempontból, ha nem tudják csökkenteni környezeti hatásukat. Következésképpen a szén-dioxid-mentesítést kiemelt prioritásként kell kezelni a gazdasági versenyképesség és az

iparág működési engedélyének megőrzése érdekében (McKinsey 2020). Ez nemcsak a fenntarthatóság, hanem a vállalatok túlélése szempontjából is kérdés.

Számos tanulmány kiemeli, hogy a vas- és acélágazatban 2050-re a nulla CO₂-kibocsátása technológiailag lehetséges. Ennek eléréséhez több rendelkezésre álló és kialakulóban lévő technológia alkalmazására lesz szükség. A haladás üteme a 2020-as években attól függ, hogy a politikai és vállalati döntések milyen mértékben tudják előre hozni az alacsony kibocsátású acélgyártásra irányuló beruházásokat a következő évtizedben, amikor a kapacitások többségének várhatóan jelentős beruházásokon kellene keresztülmennie (Mission Possible Partnership 2022).

Sok technológia ma nincs ipari méretű szinten, és az áttörést jelentő technológiák nagy részének fejlettségi szintje alacsony. Ezért a CO₂-csökkentések elérése és a közel nulla kibocsátású technológiákra való átállás valószínűleg sokáig eltarthat (IEA 2020). A globális zöld átállás felgyorsítása érdekében számos beruházási igényt kell kielégíteni (Financing the green transition 2023).

Az alacsony károsanyag-kibocsátású iparhoz szükséges infrastruktúrát szinte teljes egészében ki kell fejleszteni. A termelési eszközökbe történő befektetések mellett a szén-dioxid-mentesítési stratégiák alapját képező technológiák legalább kétbillió dollár értékű infrastrukturális beruházást igényelnek, a zöld hidrogéntermelés, a szén-dioxid-leválasztás és -tárolás, valamint az alacsony kibocsátású energiatermelés terén (World Economic Forum 2022).

Az infrastruktúrába szükséges beruházások relatív mértéke mellett végső soron eltörpülhetnek az acélgyárak saját igényei. Ez az infrastruktúra magában foglalja a hidrogéninfrastrukturát is, amely végül alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrásból származik, és a villamos energiát elegendő mennyiségű zöld hidrogén előállítására, valamint az egyre inkább villamosított eszközök igényeinek kielégítésére használja fel. Összességében az acélipar szén-dioxid-mentesítése 5,2 és 6,1 billió dollár közötti kumulatív beruházást igényel, és a beruházások több mint kétharmada az acélgyárakon kívülre hárul (Mission Possible Partnership 2022).

Az acélipar szén-dioxid-mentesítését célzó beruházások a becslések szerint 300 milliárd dollárt tesznek ki a szokásos üzleti befektetéseken felül, azaz 2050-ig körülbelül évi 10 milliárd dollárt. A jelenlegi üzleti helyzet és az alacsony kibocsátású eszközök megtérülése azonban nem ösztönzi az iparági befektetéseket (World Economic Forum 2022). A legtöbb zöldacél-projektet hagyományos projektfinanszírozási modellel vizsgálják. Az olyan újabb technológiák esetében azonban, mint a hidrogén, a karbonleválasz-

tás és az elektrolízis, más megközelítésre lesz szükség (Attwood 2023).

Egy másik tanulmány becslése szerint a nettó nulla eléréséhez szükséges technológiák kereskedelmi forgalomba hozatala és bevezetése jelentős, évente 170–200 milliárd dolláros beruházást igényel az acéliparon belül és kívül (Mission Possible Partnership 2022). A szükséges beruházások jelentősek, de a befektetők és a közvélemény egyre nagyobb érdeklődést mutat a fenntarthatóság iránt (McKinsey 2020).

A működési költségek növekedésének elsődleges oka az alternatív anyagok, például a karbonsemleges biomassa, az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogén és a nulla szén-dioxid-kibocsátású villamos energia közötti jelentős árkülönbség a fosszilis tüzelőanyagokhoz képest. Bár ezeknek az alternatíváknak a költségei csökkennek, nem valószínű, hogy az elkövetkező 10–20 évben versenyképesek lesznek a nem csökkenő fosszilis rendszerekkel szemben (Fan 2021). Az alacsonyabb és közel nulla kibocsátású primer acél többé fog kerülni. Szakpolitikai beavatkozásokra és értéklánc-koordinációra lesz szükség ennek a prémiumnak a kezelésére (Mission Possible Partnership 2022).

2050-re az acélgyártás átlagos költsége (a tökegeköltségek nélkül) egy nagymértékben szén-dioxid-mentesített világban még mindig 15%-kal magasabb lehet. Ennek a végső fogyasztóra gyakorolt hatása azonban viszonylag kisebb, mivel az acél féltermékek gyakran csak egy részét teszik ki számos olyan végterméknek vagy szolgáltatásnak, amelyben felhasználják azokat (Mission Possible Partnership 2022).

Az újrahasznosítási arányok és a felhasználás javítása nélkül a hulladék alapú acélgyártásra való áttérés erősen szűkülő acélhulladék-ellátást eredményez. A kilátásokat befolyásolja, hogy a növekvő mennyiségű hulladék milyen gyorsan és hatékonyan gyűjthető össze, válogatható és alakítható át végtermékké (Pickens 2023).

A hidrogén alapú acélgyártás lehetővé tételéhez elengedhetetlen, hogy a zöld hidrogén költsége, amelyet nagyrészt a megújuló villamos energia költsége befolyásol, egyidejűleg csökkenjen, hogy a gazdaságosság elve teljesüljön, összekapcsolva a hidrogénellátás biztonságát a megújuló energiaellátás fontosságával. A hidrogén alapú acélgyártásra való nagymértékű átállás esetén a nyersanyagellátás bizonytalan és emelkedő költségszerkezethez vezethet, illetve negatívan befolyásolva az új gyártási módszerek gazdaságosságát (McKinsey 2020).

Tekintettel a tiszta technológiák magas költségeire, az alacsony kibocsátású acél várhatóan zöld prémiummal, felárral jár majd együtt. Az alacsony CO₂-kibocsátású acél várhatóan 2025-re kerül a piacra, mintegy 25–50%-os zöld prémiummal az acélvásárlók számá-

ra. A befektetések ösztönzése érdekében kritikus fontosságúak az acélvásárlók keresleti visszajelzései. Ehhez meg kell erősíteni az acélvásárlók bizalmát abban, hogy képesek lesznek áthárítani a prémiumot a végfelhasználókra (World Economic Forum 2022). Rendkívül fontosak az átvételi megállapodások, amelyek a zöld acél vásárlására és a partnerségek kialakítására irányulnak még a termelési létesítmények tervezése előtt (Attwood 2023).

A vevői igények is változnak, és a karbonsemleges acéltermékek iránti kereslet nő. Ez a tendencia, amely már megfigyelhető számos iparágban, beleértve az autóipart is, ahol a gyártók, például a Volkswagen vagy a Toyota ambíciózus célja, hogy teljes értékláncukból százszázalékosan kiküszöböljék a szén-dioxid-kibocsátást (McKinsey 2020).

A globális acélgyártási kapacitásnak csak kis hányadára vonatkozik a szén-dioxid-kibocsátási adóteher. Az alacsonyabb kibocsátású technológiák felé történő elmozdulás ösztönzése érdekében a szén-dioxid-árzás/adó az egyik olyan politikai eszköz, amelyet a kibocsátáscsökkentés támogatására használnak. A meglévő, világszerte alkalmazott szén-dioxid-árzási mechanizmusok a szén-dioxid-adókra és az uniós kibocsátás kereskedelmi rendszerére (ETS) egyaránt vonatkoznak. Azonban ez nem minden kereskedelmi rendszerben releváns, mivel a szén-dioxid-árzás 2021-ben a globális acélgyártási kapacitás és termelés körülbelül 20%-át fedte le (OECD 2022).

A globális piacokon a versenyképesség elvesztésének kockázata, valamint a kibocsátás áthelyeződési (carbon leakage) aggodalmak olyan okok, amelyek aláárasztják az acélágazatban megfigyelt szén-dioxid-adómentességet. Ezért a globális egyenlő versenyfeltételek javításának egyik eszközeként központi szerepet kap a nemzetközi együttműködés, a hatékony alacsony szén-dioxid-kibocsátású átállás biztosításához (OECD 2022).

Míg Európa elsősorban az úgynevezett piaci alapú intézkedésekkel élen jár a szabályozási reformban, amely szerint az acélgyártóknak minden egyes tonna CO₂-kibocsátásért fizetniük kell, az acélipar termelési volumenének nagy részére ingyenes kibocsátási egységekben részesül. Az acélimportra 2026-tól tervezett szén-dioxid-határkiigazítási mechanizmus (CBAM) bevezetésével az ingyenes kiosztások teljes eltávolítását tervezik 2035-ig (BCG 2022). Ezzel egyidejűleg Kínában – amely a legnagyobb acéltermelő ország – is folyamatban van a nemzeti szén-dioxid-árzási rendszer bevezetése.

Az USA más megközelítést alkalmaz, és nem vezet be a szövetségi szén-dioxid-árzást. Míg az Egyesült Államokban létezik néhány regionális szén-dioxid-árzási rendszer, a nemzeti intézkedé-

sek elsősorban a kibocsátások és a termékszabványok szabályozására, a környezetbarát beszerzésekre és az adókedvezményekre összpontosítanak (BCG 2022). Az USA-ban 2022-ben elfogadott inflációcsökkentési törvény széles körben alkalmazott jogszabály, amely termelési adójóváírást kínál az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogéntermelésre. (INVESTMENTS 2023).

Korlátozott politikai irányelvek támogatják jelenleg az alacsony CO₂-kibocsátású ipar növekedését. A szén-dioxid-árzás és kibocsátási adó kiigazítása vagy a termékleírási szabványok terén a közpolitika és a nemzetközi együttműködés segíthet egy differenciált és gazdaságilag életképes piac létrehozásában, ami az alacsony kibocsátású acélipar első lépése (World Economic Forum 2022).

Ami a másodlagos nyersanyagellátást illeti, a szabályozás korlátozni fogja az acélhulladék globális kereskedelmét, és ösztönözni a hazai fogyasztást. A kormányok már most is az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hazai ellátás stratégiai forrásának tekintik az acélhulladékot. Egyre gyakoribbá válnak a hulladékszállítás „onshore” kidolgozására és az export visszaszorítására irányuló szabályozások, különösen a szigorúbb minőségi előírások és az importkorlátozások formájában (Pickens 2023).

4. Következtetések

Számos technológiai kezdeményezés létezik a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére az acéliparban. A meglévő nagyolvasztó és konverteres létesítmények sajátos kihívásokat jelentenek a szén-dioxid-mentesítés terén. Ezeket a kihívásokat a hidrogén, a biomassa és a CCU/S különböző kombinációival lehet megoldani. A hidrogénnel és EAF-fel kombinált DRI a legalacsonyabb szén-dioxid-kibocsátás elérésének legfejlettebb módja, ennek ellenére a meglévő gázüzemű művek átalakításának vannak korlátjai. Létfonosságú az új technológiák, kísérleti és demonstrációs üzemek ösztönzése.

Az üvegházhatást okozó gázok csökkentésére vonatkozó éghajlati célkitűzések teljesítéséhez a vas- és acélgyártóknak is összhangba kell hozniuk környezetvédelmi és pénzügyi céljaikat. De nyilvánvaló, hogy az acélipar átalakulásának számos technikai-gazdasági kihatása van. Az átállás globális kihívást jelent, amely globális választ tesz szükségessé, és együttműködésre lesz szükség az országok, az állami és magán érdekelt felek között.

Általánosságban jól látható, hogy az összes elemzett szempont globális szinten összefügg egymással, ennek ellenére előfordulhatnak eltérések a helytől függően. Különböző országok eltérő gazdasági háttérrel és infrastruktúrával rendelkeznek, amelyek meghatározzák a legéletképesebb forgatókönyvet.

IRODALOM

- Attwood D. J. (2023. 06. 26): Green Steel Demand is Rising Faster Than Production Can Ramp Up. Forrás: <https://about.bnef.com/blog/green-steel-demand-is-rising-faster-than-production-can-ramp-up/>
- BCG (2022. 02. 16): Transforming the Steel Industry May Be the Ultimate Climate Challenge. Forrás: Metals and mining industry: <https://www.bcg.com/publications/2022/steel-industry-carbon-emissions-challenge-solutions>
- Bhaskar A. A. (2022): Journal of Cleaner Production. Decarbonizing primary steel production: Techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339>.
- Blinken (2021. 02. 1.): Forrás: US Department of State: <https://www.state.gov/the-united-states-officially-rejoins-the-paris-agreement/#:~:text=On%20January%2020%2C%20on%20his,unprecedented%20framework%20for%20global%20action.>
- Cachola C. S. (2023): Capture technologies: Improvements and promising developments. Carbon Capture Science & Technology, <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2023.100102>.
- Carbon Trust (2023. 06. 20.): Forrás: Carbon Trust: <https://ctprodstorageaccountp.blob.core.windows.net/prodrupal-files/documents/resource/public/International%20Carbon%20Flows%20-%20Steel%20-%20REPORT.pdf>
- Draxler S. K. (2021. 03.): Greensteel for Europe. forrás: Technology Assessment and Roadmapping: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/D1.2-Technology-Assessment-and-Roadmapping.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Electra (dátum nélk.): Low-temperature iron with zero carbon emissions. Forrás: <https://www.electra.earth/technology/> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- EUROFER (2019. 11.): Low carbon roadmap. Forrás: Pathways to a CO₂-neutral European steel industry: <https://www.eurofer.eu/assets/publications/reports-or-studies/low-carbon-roadmap-pathways-to-a-co2-neutral-european-steel-industry/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 06.)
- European Commission (2023. 10. 9.): Commission welcomes completion of key 'Fit for 55' legislation, putting EU on track to exceed 2030 targets. Forrás: European Commission: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_4754
- Fan F. (2021): Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. Joule, P829-86.
- Financing the green transition (2023. 1.): Forrás: https://issuu.com/stateofgreen/docs/sog_whitepaper_financing2023_210x297_v06_web?fr=sMmNkZDY4NTc4O-TA&submissionGuid=c0097cb3-e5d9-44d2-a47e-d7130d788f55 (Letöltés dátuma: 2024. 03. 10.)
- Fishedick M. W. (2014): Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. Journal for Cleaner Production, pp. 563–580.
- Fleischanderl, D. A. (2023): Green steel in motion – iron feedstock meets renewable energy. (old.: Primetals). Abu Dhabi: WSA-Breakthrough Technology Conference.
- Forum W. E. (2014): Scoping paper: Mining and metals in a sustainable world. Forrás: https://www3.weforum.org/docs/WEF_MM_MiningMetalSustainableWorld_ScopingPaper_2014.pdf
- Global CCS (2022): Forrás: Global status of CCS 2022. <https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Status-of-CCS-2022-Report-Final-compressed.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Green Steel World Editorial Team (2022. 08. 11.): Green steel world. Forrás: HYBRIT – A trailblazer in steel industry's green revolution: <https://greensteelworld.com/hybrit-a-trailblazer-in-steel-industrys-green-revolution> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Griffin H. (2021): The prospects for 'green steel' making in a net-zero economy: A UK perspective. Global Transitions, Vol. 3, pp. 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2021.03.001>
- Holappa L. (2020. Aug. 19.): Mdpi. Forrás: A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- Hornby S. (2022): Forrás: https://www.researchgate.net/publication/354477453_Impact_of_Hydrogen_DRI_on_EAF_Steelmaking
- IEA (2020. 10.): Iron and steel technology roadmap. Forrás: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (Letöltés dátuma: 2023. 10.)
- IEA (2021. 09.): An energy sector roadmap to carbon neutrality in China. Forrás: <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>
- INVESTMENTS, U. T. (2023. 04.): Forrás: <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/04/Unlocking-the-First-Wave-of-Breakthrough-Steel-Investments-International-Opportunities-April-2023.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 29.)
- John J. S. (2023. 10. 15.): Electrowinning' could help win the race to clean up dirty steel. Forrás: Canary Media: <https://www.canarymedia.com/articles/clean-industry/electrowinning-could-help-win-the-race-to-clean-up-dirty-steel> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- Jun Zhao H. Z. (2020): Ironmaking & steelmaking. Review of green and low-carbon ironmaking technology: <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1639029> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- KSH (2023): Az üvegházhatású gázok kibocsátása. Forrás: Fenntartható fejlődés indikátorai. <https://www.ksh.hu/ffi/3-1.html>
- Lang, Köpf, Valery. (dátum nélk.): Metso. Forrás: Circored fine ore direct reduction – a proven process to decarbonize steelmaking. <https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/circored-fine-ore-direct-reduction-a-proven-process-to-decarbonize-steelmaking/?r=3> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Li L. W. (2023. 02. 12.): Simulation of fluidization quality for various reduced-gas composition and agitation speed circumstances in a gas-solid fluidized bed with an inclined agitator. Forrás: MDPI: <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/2/376> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- Mandova H., Leduc S., Wang C., Wetterlund E., Patrizio P., Gale W., Kraxner F. (2018): Biomass and bioenergy. Forrás: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418301107?via%3Dihub>
- Martin Pei Markus P. A. (2020. 07. 18.): MDPI. Forrás: Toward a fossil free future with HYBRIT: Development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/972> (Letöltés dátuma: 2023. 02. 01.)

- Mayer B. S. (2019): Macroeconomic implications of switching to process-emission-free iron and steel production in Europe. *Journal of Cleaner Production*, pp. 1517–1533.
- McKinsey (2020): Decarbonization challenge for steel. Forrás: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel>
- MIDREX (2017. 09.): MIDREX. Forrás: MIDREX H2: Ultimate low CO₂ ironmaking and its place in the new hydrogen economy. <https://www.midrex.com/tech-article/midrex-h2-ultimate-low-co2-ironmaking-and-its-place-in-the-new-hydrogen-economy/> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 01.)
- Mission Possible Partnership (2022. 06.): Making net-zero steel possible. Forrás: Steel transition strategy. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>
- Muslemani L. K. (2021): Opportunities and challenges for decarbonizing steel production by creating markets for ‘green steel’ products. *Journal of Cleaner Production*, 128127.
- Nodin D. (2008. 05.): The tecnored ironmaking process. Part 1 – Competitiveness and pilot development work. Forrás: *Ironmaking & Steelmaking* 35(4), 245–250. https://www.researchgate.net/publication/233547836_The_Tecnored_ironmaking_process_Part_1_-_Competitiveness_and_pilot_development_work (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- OECD (2022. 11.): Assessing steel decarbonisation ready for the decade of delivery? Forrás: <https://www.oecd.org/industry/ind/assessing-steel-decarbonisation-progress.pdf>
- OECD.Stat. (dátum nélk.): Forrás: Greenhouse gas emissions: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=air_ghg#
- Pickens N. (2023. 06. 26.): Why scrap metal is an opportunity too good to waste. Forrás: Wood Mackenzie: <https://www.woodmac.com/news/opinion/scrap-metal-opportunity/>
- Radloff A. W. (2023): An integrative and prospective approach to regional material flow analysis: Modeling the decarbonization of the North Rhine-Westphalian steel industry. <https://doi.org/10.1111/jiec.13387>
- Rhamdhani M. S. (2023): Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136391> (Letöltés dátuma: 2024. 01. 24.)
- SIDERWIN (2023. 03. 23.): Siderwin. Forrás: SIDERWIN_Concluding_webinar2023_slides. <https://zenodo.org/records/7785032#.ZCVyxXZByUk> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Steel T. (2020): HISARNA. Forrás: Building a sustainable steel industry: <https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/tata-steel-europe-factsheet-hisarna.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 06.)
- Steelonthenet (2023): Steel industry emissions of CO₂. Forrás: <https://www.steelonthenet.com/kb/co2-emissions.html>
- Team G. S. (2022. 08. 11.): Green steel world. Forrás: HYBRIT – A trailblazer in steel industry’s green revolution: <https://greensteelworld.com/hybrid-a-trailblazer-in-steel-industrys-green-revolution> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- UN (2023): Forrás: Broken Record. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- US Department of State (2021. 11.): The long-term strategy of the United States. Forrás: Pathways to net-zero greenhouse gas emissions by 2050. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf>
- Wang Z. B. (2021): Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry – An overview of challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 129797.
- World Economic Forum (2022): Net-Zero Industry Tracker 2022 Edition.
- World Resources Institute (2004): World Business Council for Sustainable Development. Forrás: The Greenhouse Gas Protocol – A corporate accounting and reporting standard. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>
- WorldSteel (2021): Electrolysis in ironmaking. Forrás: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Electrolysis-in-ironmaking.pdf>
- WorldSteel (2022): Sustainability indicators. Forrás: WorldSteel Association. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2022-report.pdf>
- WorldSteel (2023. 11.): Steel demand forecasts. Forrás: WorldSteel Association. https://worldsteel.org/wp-content/uploads/worldsteel-Short-Range-Outlook-October-2023_table.pdf
- WorldSteel (2023): WorldSteel Association. Forrás: September 2023 crude steel production. <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/september-2023-crude-steel-production/>
- WorldSteel Association (2023): World steel in figures 2023. Forrás: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2023-4.pdf>
- WSA CCUS (2023): Fact sheet – Carbon capture and storage and use (CCSU). Forrás: World Steel Association. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Carbon-capture-use-and-storage-2023.pdf> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 02.)
- Yan H. H. (2023. 02. 15.): Metallurgical and materials. Forrás: SpringerLink. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-023-02732-5> (Letöltés dátuma: 2024. 02. 04.)
- Zarl, Farkas, Schenk (2020. 10.): MPDI. Forrás: A study on the stability fields of arc plasma in the HPSR process. <https://doi.org/10.3390/met10101394> (Letöltés dátuma: 2024. 0. 02.)
- Zhang S. X. (2023): The CO₂ emission reduction path towards carbon neutrality in the Chinese steel industry: A review. *Environmental Impact Assessment Review*, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107017>