

Acélgyártási adatfeldolgozó alkalmazás egy ívkemence szimulációjának támogatására

Steelworks Data processing application for supporting an electric arc furnace simulation

GÁL Rajmond¹, FORGÁCS Zsófia², KAPTAY György¹

¹Miskolci Egyetem Fémtechnológiai, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, H-3515 Miskolc-Egyetemváros

²Miskolci Egyetem Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, H-3515 Miskolc-Egyetemváros

Abstract

In electric arc furnace (EAF) operation, the complex interactions of heat and mass flows make reliable balance calculations essential for process modelling and optimisation. This paper presents a data-processing application that integrates diverse operational and laboratory data sources to produce heat-specific material balances. The modular system standardises and filters the input data and subsequently aligns the main input and output mass streams through a template-based procedure. Following the initial simplified balances, iterative corrections can be applied to improve accuracy and reduce closure errors. The developed framework thus provides a robust foundation for subsequent thermal and thermodynamic simulations.

Keywords: steel production, electric arc furnace, material balance, data integration, template-based processing

Kivonat

A villamos ívkemence működésében a hő- és anyagáramok összetett kölcsönhatásai miatt a megbízható mérlegszámítások alapvetőek a folyamat modellezéséhez és optimalizálásához. A cikk egy olyan adatfeldolgozó alkalmazást mutat be, amely a különböző üzemi és laboratóriumi adatforrásokat integrálva adagszintű anyagmérleget állít elő. A moduláris felépítésű rendszer egységesíti és szűri az adatokat, majd sablonalapú módszerrel összerendezi a fő bemeneti és kimeneti anyagáramokat. Az első, egyszerűsített mérlegek után iteratív helyesbítésekkel javítható az eredmények pontossága és a zárási hibák csökkenthetők. A fejlesztett keretrendszer alapot nyújt a későbbi hőtani és termodinamikai szimulációkhoz.

Kulcsszavak: acélgyártás, ívkemence, anyagmérleg, adat-integráció, sablonalapú feldolgozás

1. BEVEZETÉS

Az ívfényes elektrokemence (Electric Arc Furnace, EAF) napjaink acélgyártásának meghatározó berendezése, amelyben a fémhulladék, a grafit elektródák, valamint a kiegészítő hőforrásként alkalmazott RCB égők (Regenerative Combined Burner) által termelt hő segítségével olvad meg. A technológia térnyerése az elmúlt évtizedben jelentősen felgyorsult: a hulladékpiac bővülése, az ellátási láncok rugalmassági igénye és mindenekelőtt a szén-dioxid kibocsátás mérséklésére irányuló, egyre szigorúbb iparpolitikai és piaci elvárások a „zöld acél” előállításának egyik elsődleges útvonalává tették az EAF-ot. E tendenciák az európai acéliparban is tetten érhetők [1]. A kontinens szerkezetileg sokszínű: a történetileg erős integrált útvonal (nagyolvasztó–konverter) mellé az elmúlt években folyamatosan zárkózott fel az EAF-technológia. Az Európai Unió 2024-ben mintegy 129,7 millió tonna acélt állított elő, amelyből az EAF-technológia részaránya 44% körüli volt.

Technológiai szempontból az EAF üzem olyan, egymással erősen kapcsolt fizikai és kémiai jelenségek terepe, amelyben az elektromos ív hő- és sugárzási mezői, a felsőtér áramlási viszonyai, a hő- és anyagátadás mechanizmusai, valamint az olvadék–salak–gáz fázisok közötti kölcsönhatások egyidejűleg érvényesülnek [2–4]. A folyamat az acélhulladék beolvasztásával és ötvözők beadagolásával indul. Az elektromos ívben és az égőkben felszabaduló energia 1500–1700 °C körüli tartományba emeli a kemence

belső terének hőmérsékletét, elősegítve a gyors olvadást. Az oxidáció, dekarbonizáció, foszformentesítés és salakképzés párhuzamosan zajlik, miközben a felsőtérben utánégetés történhet, amely visszanyeri a CO és H₂ oxidációja során felszabaduló kémiai energiáját. A fürdő keveredése többek között az elektromágneses erőkből és a termikus konvekcióból ered, ami a hő- és koncentrációgrádiensek kiegyenlítődének elsődleges motorja. A valós üzemi környezetben e jelenségek kísérleti vizsgálatát a szélsőséges hőmérséklet, a korlátozott hozzáférhetőség és a mérőeszközök ellenállósági korlátai nehezítik.

Mindez indokolja egy korszerű numerikus eszköztár alkalmazását. A számítógépes áramlástan (CFD), a hő- és anyagtranszport modellezése, valamint a kémiai termodinamika és reakciókinetika összekapcsolása olyan virtuális kísérleti teret kínál [5, 6], amelyben a kulcsparaméterek (például az energiaellátás ütemezése, az adagolási stratégia, a gázbefúvás jellemzői és az ötvözők beoldódása) érzékenysége és kölcsönhatásai szisztematikusan vizsgálhatók. A modellezés nem csupán alapkutatási értéket hordoz: közvetlenül támogathatja a termelékenység növelését, a kihozatali és minőségi mutatók javítását, valamint az energia- és anyagfelhasználás optimalizálását.

A kutatási program célja egy hőtani és termodinamikai alapokra épített elméleti modell kidolgozása a villamos ívkemencében zajló folyamatok leírására és előrejelzésére. A modell összehangolt energia- és anyagmérlegekre épül, a fázisátalakulásokat és kémiai reakciókat az adott esethez illő (kvázi-egyensúlyi, illetve kinetikai) leírással kezeli, és számszerű szabályokkal írja le a felsőtér és az olvadék kölcsönhatásainak paramétereit. A cél olyan keretrendszer kialakítása, amely (a rendelkezésre álló üzemi adatokkal kalibrálva és iteratív módon finomhangolva) képes az inputok és a technológiai lépések hatásainak kvantitatív leírására.

A cikkben az üzemi termelési, salak- és vegyelemzési adatok integrálását és feldolgozását végző alkalmazás kerül bemutatásra. Az alkalmazás feladata az anyagmérleg-számítások támogatása, a különböző adatforrások integrálása, valamint a vizsgálati eredmények dokumentálása. A szoftver így eszközként szolgál az előzetes értékeléshez, és alapot teremt a későbbi anyagmérleg fejlesztésekhez és a szimulációs modell kialakításához.

2. MÓDSZERTAN

Az alkalmazás három fő adatforráson alapul, amelyek eltérő jellegű, de egymással összekapcsolható információt tartalmaznak az egyes adagokra. A termelési adatok biztosítják a legátfogóbb képet: rögzítik az adag időbeli jellemzőit, a gyártási paramétereket, mint az acélhulladék minőségét, az öntési adatokat, mint a folyékony acél tömegét és hőmérsékletét, valamint az energiafelhasználást (áram, földgáz, oxigén). Ezen felül részletezi a fő anyagáramokat is, vagyis a különféle hulladékok, ötvözők és salakképzők mennyiségét. Ezzel párhuzamosan a vegyvizsgálatok adják az acél kimeneti összetételének referenciáját, a laboratóriumi minták számos elemre (pl. C, Si, Mn, ötvözők és szennyezők) szolgáltatnak mért adatokat. A harmadik adatsort a salakvizsgálatok jelentik, amelyek az adaghoz kapcsolódó salakminták oxidösszetételét (pl. Al₂O₃, CaO, FeO) és bázikussági mutatóit tartalmazzák.

E három adatforrás integrált feldolgozása teszi lehetővé, hogy adagszámokra vonatkozó anyagmérleg készüljön. A feldolgozás első lépése az eltérő formátumú adatok közös azonosító (adagszám, hőszám) mentén történő összerendezése, majd egységes adatmodellbe való betöltése, amely alapját adja a későbbi mérlegszámításnak és riportkészítésnek.

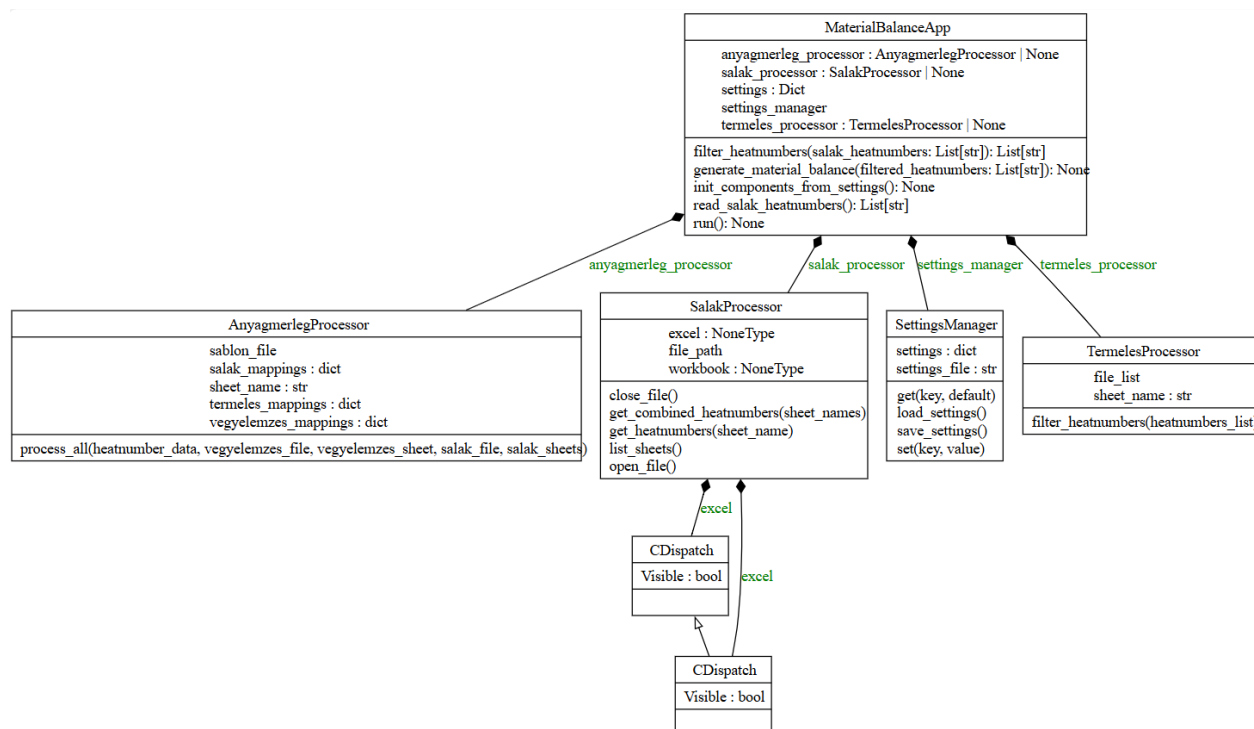
A Python-alapú adatfeldolgozó alkalmazás fejlesztése moduláris elven történt, amely lehetővé teszi a különböző funkciók egymástól független kezelését. A fejlesztett eszköz az adatok beolvasását és előfeldolgozását, a részadatok (termelés, salak, vegyelemzés) feldolgozását, az összesítő számításokat és a riportkészítést valósítja meg. A salakvizsgálati munkalapok jelentik a legszűkebb, ugyanakkor a modellezés szempontjából kulcsfontosságú adathalmazt, ezért az adagszám-lista előállítása ezekből indul ki. Ezt követően a termelési nyilvántartások bevonásával történik a hibás vagy tipikustól eltérő esetek kiszűrése, majd a fennmaradó adagokhoz rendelődnek hozzá a vegyelemzési és salakösszetételi eredmények. Ily módon minden releváns bemenő és kimenő komponens a megfelelő helyre kerül az anyagmérlegben.

A futás elején a beállítások JSON-állományból töltődnek be, a beállításkezelő egység („SettingsManager”) kizárólag az útvonalakat, munkalapneveket és egyéb paramétereket biztosítja a további modulok számára, így a fájlhelyek és lapnevek cseréje kódmódosítás nélkül elvégezhető. A salakadatok feldolgozását a „SalakProcessor” végzi. A modul az Excel COM-felületén keresztül megnyitja a salakvizsgálati munkafüzetet, a megadott munkalapokon kiolvassa az adagszámokat, egységes formátumra hozza őket, majd duplikátummentes, rendezett listát ad vissza.

A termelési adatok alapján történő előszűrést a „TermelésProcessor” látja el, amely a kiinduló listához illeszti a termelési nyilvántartás sorait, és általános minőségbiztosítási szabályokat érvényesít. A szűrés lényege, hogy kiszűrje azokat a rekordokat, amelyek későbbi mérlegszámítást torzíthatnak, például hiányos

vagy nullás kezdő adagsorokat, extrém hosszú állásidők utáni instabil tételeket, inkonzisztens vagy negatív mennyiségeket, illetve adott minőségi osztályokon kívüli eseteket. Az eredmény egy olyan adagszám-lista, amely minden tételhez hozzárendeli, hogy melyik termelési fájlból származik. Ez a halmaz időben és tartalmilag is reprezentatív, így a mérlegszámítás eredményei már a technológiai folyamatot tükrözik, nem az adatminőség hibáit.

A tényleges anyagmérleg-összeállítást az „AnyagmerlegProcessor” végzi. Minden adagszámhoz megnyit egy Excel-sablont, beírja az azonosítót, majd három irányból tölti fel a bemeneteket: a termelési táblákból a fő anyagáramokat (hulladékok, salakképzők, ötvözők, energia- és gázadatok), a vegyvizsgálati munkalapról az acél kimeneti összetételét, a salaklapokról pedig a salakoxidok százalékait és a bázikussági mutatókat. A cellakiosztás fix, kódban karbantartott térképek szerint történik, némely adatok esetén speciális átskálázásokkal. A sablon képletei érintetlenek maradnak, így a számítás az Excel oldalán fut, és a sablon későbbi módosítása automatikusan érvénybe lép az egész folyamatra. A fejlesztett adatfeldolgozó alkalmazás osztálydiagramja az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az adatfeldolgozó alkalmazás osztálydiagramja

Az adagszámonként létrejövő mérlegfájlok egy időbélyeges napló-mappába kerülnek. Ezeket dolgozza fel az „össz_anyagmerleg” segédprogram, amely kiolvassa a kulscellákat (bevitt és kivitt fő komponensek, eltérések, salak- és acéltömeg, oxigénigény és befűjt mennyiség stb.), és két munkalapot állít elő: egy táblát soronkénti adatokkal, valamint egy lapot átlag- és szórásadatokkal. Ez a kimenet már közvetlenül használható trendek, korrelációk vagy iteratív korrekciók vizsgálatára, illetve a reális anyagmérleg és a szimulációs modell későbbi kalibrálására.

A főprogram ezeket a komponenseket fűzi össze végrehajtható folyamattá. Elsőként beolvassa a beállításokat, előállítja a salaklapokból az adagszám-listát, a termelési fájlok alapján leszűri a vizsgálható tételekre, majd minden megmaradt adaghoz legenerálja a sablonra épülő anyagmérleg-fájlt. A kialakított struktúra így elkülöníti az adatok kinyerését, a szabályalapú szelekciót és a mérleg összeállítását, miközben a beállítási pontok (útvonalak, lapnevek) külső konfigurációból vezérelhetők. Ez a felépítés kifejezetten a későbbi bővítéseket készíti elő. Új szabályok és mezőtérképek vehetők fel, további laborparaméterek illeszthetők, illetve a mérlegfájlokból automatikus statisztikai és vizualizációs riportok generálhatók.

3. EREDMÉNYEK

Az anyagmérleg-számítás első lépése egy egyszerűsített, úgynevezett „naiv” mérleg felállítása volt. Ennek keretében a bemenetet kizárólag az acélhulladék és a salakképzők jelentették, míg a kimeneten az acél- és salakolvadék szerepelt. Ez az alapmodell gyors áttekintést nyújtott, azonban több elem esetében

(például króm, réz, szilícium, alumínium, illetve egyes oxidkomponensek) számottevő mérlegeltérést mutatott, ami jelezte, hogy a rendszer fontos forrásokat és veszteségeket hagy figyelmen kívül.

A következő lépésben a mérleg iteratív pontosítása történt. Az első iteráció során figyelembevételre kerültek a szennyező komponensek, például földdel, színesfémekkel szennyezett hulladékfrakciók, valamint a tűzálló falazatból származó beoldódás. Ezek beépítésével több kritikus elem (pl. foszfor, molibdén, nikkell, kén, ón) mérlege jelentősen javult, az összesített tömeghiba pedig mérséklődött. A második iteráció célja a rendszer érzékenységeinek feltárása volt. Ebben kísérleti jelleggel, a korrekciós tényezőket egyszerűen megduplázva futott le a számítás. Bár ez több esetben túlkompenzálást eredményezett, lehetővé tette, hogy a tényleges optimum irányát és nagyságrendjét lineáris közelítéssel meghatározzuk. A harmadik, finomhangolási iterációban elemenként eltérő, az előző futások alapján illesztett korrekciós tényezők kerültek alkalmazásra. Ez a megközelítés nagymértékben csökkentette a fő komponensek zárási hibáját, és a mérleg összességében konzisztens képet adott. Bizonyos elemek, mint a mangán esetében külön becslésekre volt szükség, de a legtöbb főkomponens mérlege a gyakorlati pontossági elvárásokhoz közel került.

Összességében a többkörös iterációs eljárás nemcsak a mérlegek pontosságát javította, hanem rávilágított azokra a tényezőkre is, amelyek a későbbi modellezés során elengedhetetlenül kezelendők. Ilyenek a szennyezőanyagok jelenléte, a falazat kopása és beoldódása, valamint a kisebb anyagáramok kumulatív hatása. Ezek az eredmények alátámasztják, hogy a szoftver által biztosított rugalmas, sablonalapú feldolgozási keret alkalmas az iteratív korrekciók gyors kipróbálására és a reális anyagmérleg fokozatos felépítésére.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az eddigi fejlesztés során egy olyan moduláris adatfeldolgozó keretrendszert hoztunk létre, amely integrálja a termelési, salak- és vegyelemzési adatokat, majd sablonalapú feldolgozással adagszintű anyagmérleget állít elő. Az iteratív javítások révén a zárási hibák fokozatosan csökkenthetők, így a rendszer megbízható alapot ad a későbbi pontosításokhoz és a szimulációs modell előkészítéséhez.

Következő munkaszakaszunk célja egy megbízható, elem-szinten is konzisztens anyagmérleg felállítása az ívkemence-folyamatra, amely szilárd alapot ad a későbbi modellezéshez. A jelenleg használt, iterációval pontosított „naív” anyagmérleg (acélhulladék + salakképzők $\approx$ acéolvadék + salakolvadék) csak kiindulópont. Célunk, hogy a globális és elem-szintű zárási hiba 1% alá csökkenjen a főbb elemekre (Fe, C, O, Si, Mn, V, P, Zn, Ca, Mg, Al). Ennek érdekében egy célzott mérési kampányt dolgoztunk ki. A bemeneti oldalon minden releváns hulladékminőséget kvalitatív és kvantitatív módon jellemzünk (ICP-OES, LECO-C/S), és meghatározzuk a hulladékokkal bevitt, ismeretlen porkeverékek, valamint a salakképzők és ötvözők összetételét (XRF). A kimeneti oldalon rendszeres acél- és salakvizsgálatokat végzünk, továbbá elemezzük a szállóport és a kemencegázokat. Az eredményeket az in-situ technológiai adatokkal vetjük össze az anyagmérleg további pontosítása érdekében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási témát a Miskolci Egyetem SteelTech-Center Hungary projektje támogatja.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Lopez G., Galimova T., Fasihi M., Bogdanov D., Breyer C. *Towards defossilised steel: Supply chain options for a green European steel industry*, Energy, 2023, 273, 127236., doi: 10.1016/j.energy.2023.127236.
- [2] Makki Abadi M., Tang H., Rashidi M. M. *A review of simulation and numerical modeling of electric arc furnace (EAF) and its processes*, Heliyon, 2024, 10(11), e32157., doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e32157.
- [3] Natschlager S., Stohl K. *Metallurgical simulation of the EAF-process*, IFAC Proceedings Volumes, 2007, 40(11), 207-211., doi: 10.3182/20070821-3-CA-2919.00030.
- [4] Elkoumy M. M., El-Anwar M., Fathy A. M., Megahed G. M., El-Mahallawi I., Ahmed H. *Simulation of EAF refining stage*, Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(4), 2781-2793., doi: 10.1016/j.asej.2017.10.002.
- [5] Karalis K. T., Karkalos N., Cheimarios N., Antipas G. S. E., Xenidis A., Boudouvis A. G. *A CFD analysis of slag properties, electrode shape and immersion depth effects on electric submerged arc furnace heating in ferronickel processing*, Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(21–22), 9052-9066., doi: 10.1016/j.apm.2016.05.045.
- [6] Yigit C., Coskun G., Buyukkaya E., Durmaz U., Güven H. R. *CFD modeling of carbon combustion and electrode radiation in an electric arc furnace*, Applied Thermal Engineering, 2015, 90, 831-837., doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.07.066.