

ILLÉS ISTVÁN BALÁZS – KÉKESI TAMÁS

A sóadagolás szerepe és fejlesztési lehetősége az alumíniumolvasztási salakok termomechanikai feldolgozásánál

Az alumíniumötvözet-hulladékok olvasztásánál keletkező primer salak közvetlen nagyüzemi meleg (termomechanikai) feldolgozásánál a fémkinyerés hatásfokát növeli a jelentős mennyiségű só adagolása. Az általában alkalmazott gáztüzelésű forgó dobkemencében visszamaradó szekunder salakban a kinyert fém csapó-lása után a betétben kialakított koncentrációjához viszonyítva erősen dúsulva jelentkezhet az általában NaCl és KCl alapalkotókat és egyéb vegyületeket is tartalmazó só, ami az oldhatósága miatt környezetvédelmi terhet jelent. A gazdaságos technológiát célzó laboratóriumi kísérletek szerint a fémkihozatal és a termelékeny-ség növelhető, az energiafogyasztás pedig csökkenthető a szokásos sóadalék összetételének és az adag-időnek a költségkímélő módosításával. A csapolva és a durva szemcsékben fizikailag kinyerhető fémfrak-ciók mennyiségéből számított hasznos fémkihozatal és a szükséges adagidő együtt jelezte, hogy a lokális hőfejlesztést elősegítő aktív összetevőt adagolva, valamint optimalizálva az adagidőt a meleg salakfeldolgo-zás hatékonyabbá tehető.

1. Bevezetés

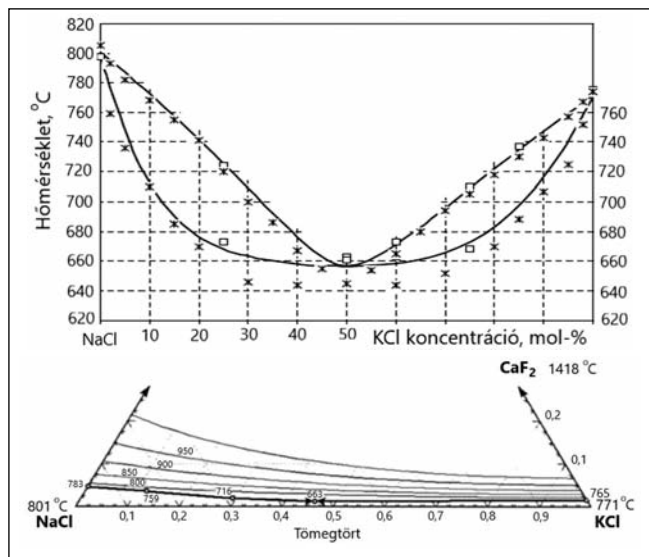
A világ alumíniumtermelésének több mint egyharmada a másodlagos forrásokból, vagyis az alumínium- és alumíniumötvözet-hulladékok metallurgiai feldolgozásából származik [1]. Az alumínium és ötvözei egyre szélesebb körű és növekvő mértékű felhasználása egyre nagyobb mértékű hulladékképződéssel jár. A fémhulladék gyűjtése és típus szerinti osztályozása, visszajáratása jelentős iparággá fejlődött az utóbbi évtizedek során, és ma már ez jelenti a „magyar ezüst” előállításának a fő nyersanyagforrását. A hulladék alapú szekunder alumínium-előállítás folyamatosan növekvő részarányát nemcsak a hulladékok növekvő tömege, hanem a szekunder fémelőállítási technológiának az energiafelhasználás és a környezetvédelem terén megmutató igen hangsúlyos előnyei is indokolják. A bauxit-kitermelésen, timföldgyártáson és elektrolízisen keresztül történő alumíniumkinyerés energiafelhasználása ~ 180 MJ/kg, amiből az elektrolitikus redukció elektromos energiafelhasználása ~ 50 MJ/kg. A primer technológia teljes energiaigénynek csak 5-6%-át jelenti a hulladék alapú alumíniumelőállítás. Azonban a hulladékok beolvasztásának elkerülhetetlen velejárója a nagy fémtartalmú olvasztási salakok keletkezése. Ezt a szilárd-folyékony fázisokat tartalmazó, az olvadákfürdő felszínén elhelyezkedő anyagot az

angol szakirodalom „dross”, azaz felzéknek nevezi. A szivacsos szerkezet miatt a felzék sok olvadt fémet is képes megkötni. Továbbá, a fürdő felületéről történő salaklehúzás során is jelentős mennyiségű fémolvadék kerül a salaküstökbe. Az alumíniumhulladékok olvasztásánál keletkező heterogén fizikai állapotú felzék salak legnagyobb arányú alkotója a fémes fázis, ami az olvasztásnál kialakuló szilárd oxidos vázhoz tapad [2]. Viszonylag kis mennyiségben jelen lehetnek még kloridos alkotók is, ha a beolvasztásnál kezelősót is alkalmaznak. A keletkező salakos felzék mennyisége és összetétele nagymértékben függ az olvasztott hulladékok minőségétől és az olvasztási eljárástól is. Nagy Mg-tartalmú ötvözetek gyártásakor több salak képződik, amiben a fémes fázis arányát nagymértékben befolyásolja az olvasztár gépi erővel végzett „salakhúzási” technikája. Ezért a „fehér” vagy „nedves” megjelenésű salakok fémes Al-tartalma [3] elérheti akár a 80-85%-ot is. A primer alumíniumelőállítás kb. 1%, a szekunder technológia azonban akár 3-5% salak képződésével is jár a termelt fémmre vonatkoztatva [4]. Ez Magyarországon is 10⁴ tonna nagyságrendű alumíniumsalak képződését jelenti évente.

2. Az alumíniumolvasztási salakok feldolgozási módszerei

A hulladékolvasztásnál eltávolított „primer salak” olvadt fémfázisának egy része közvetlenül is eltávolítható speciális edényekben csurogtatással, illetve préssel, ami viszont még jelentős mennyiségű fémes fázist hagy hátra az oxidos mátrixhoz ragadva. További kézenfekvő fizikai

Illés István Balázs a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán kémiai metallurgia szakirányos kutató/hallgató. Jelenlegi kutatási témája az alumíniumhulladékok és olvasztási salakok termomechanikai feldolgozásának teljes körű fejlesztése és a maradványsalakok komplex hidrometallurgiai kezelése. Dr. Kékési Tamás szakmai életrajzát 2018/1. számunkban közzöltük.



■ 1. ábra. A NaCl-KCl binér rendszer fázisdiagramja (a), valamint a likvidusz hőmérséklet módosulása a CaF_2 adagolás hatására (b) [8]

módszer a hidegfeldolgozás, ami a lehűlt salakban megszilárdult nagy mennyiségű fém mechanikai úton történő elkülönítését jelenti [1]. Ez megköveteli a leszedett forró salak előzetes lehűtését, ami által csökkenthető az olvadt cseppekben jelenlévő fémes fázisnak – a hőszigetelést is okozó – salaküstben önmagát gerjesztő utóoxidációját. Ez a káros jelenség különösen a nagy magnéziumtartalmú ötvözetek gyártásakor keletkező primer salakok jellemzője, amely során nemcsak a magnéziumtartalom „ég ki”, hanem az intenzív hőfejlődés miatt felgyorsul a finoman elszórt fémes fázis általános oxidációja is.

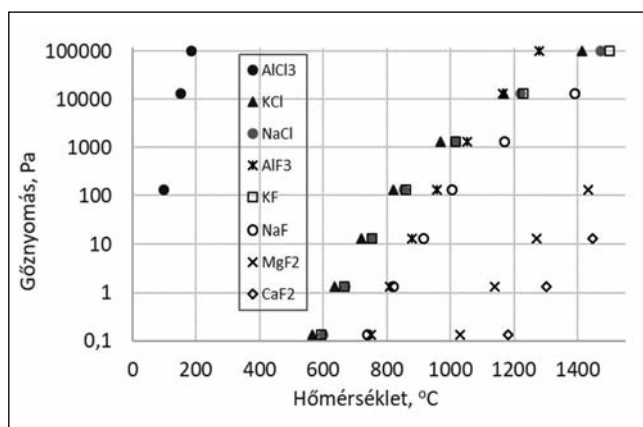
A nagyobb olvasztóművek elterjedtebben alkalmazzák a heterogén olvasztási salak oxidos mátrixában ragadt fémet nagy hőmérsékleten „kiolvasztó” melegfeldolgozó módszert. Ennek során a fémtartalom kiolvasztása a még forró primer olvasztási salak további hevítésével hatékonyan kivitelezhető. Utóbbi művelet hatékonyságát növeli [5] az oxidrétegek törését és eltávolítását elősegítő mechanikus agitáció és a fémcseppek koaleszcenciáját gyorsító sóadalék alkalmazása. A gyakorlatban elterjedt olvasztási sók alapvetően NaCl-ból és kb. fele mennyiségű KCl-ből állnak, de a fő alkotókhoz még néhány százalék fluoridsót (NaF , Na_3AlF_6 , AlF_3 , KF , LiF és CaF_2) is kevernek. Az alumínium felületi feszültségénél kisebb a sóolvadék és az alumínium közötti határfelületi feszültség, így a sóolvadék az alumínium felületét bevonni próbálja. Mivel a fluoridok csökkentik az alumínium és a sóolvadék közötti határfelületi feszültséget (energiát), így a „nedvesítés” még fokozódik. Ez fizikai okokból segíti az alumínium és a felületi oxidréteg elválását és így az apró alumíniumcseppek egyesülését. A fluorid adalékokat tartalmazó ekvimoláris NaCl-KCl sóelegyeiben mért határfelületi feszültségek ~ 710 mN/m értékétől a fluorid alkotó 1%-os aránya mellett a leggyengébb csökkenés az AlF_3 , a legerősebb (630-650 mN/m értéket adó) pedig a KF és NaF adagolásával érhető el [6]. Az Európában használt só általában 65-75% NaCl, 25-30% KCl és 2-5% CaF_2 alkotókból áll. Amerikában a klóridos alapalkotókhoz ~ 5% kriolit (vagy alkáli-fluorid) adagolása a gyakoribb [7], azonban az alumínium-fluorid

illékonyága környezeti szempontból is kedvezőtlen. Az 1. ábrán látható NaCl-KCl rendszert a tökéletes elegyedés és széles tartományban már viszonylag kis hőmérsékleten folyékony állapot jellemzi.

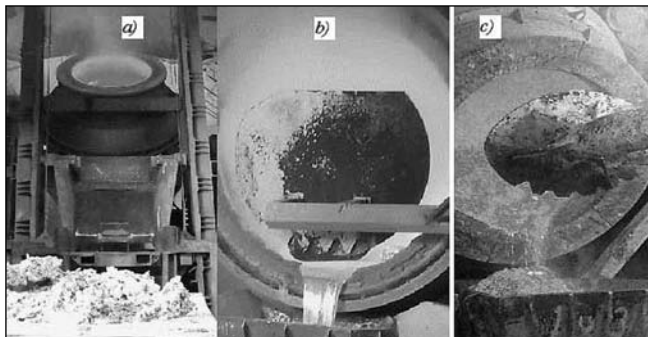
Az Európában elterjedt szilárd oldatot képező klóridos sóelegyben a CaF_2 adalék koncentrációja a 750 °C-on érvényes ~ 3% oldhatósági határa alatt van. A fluoridtartalmat az erősebben felületaktív NaF adagolással is lehet biztosítani, ami kevésbé növelné a likvidusz hőmérsékletet. Azonban a NaF vegyületnek kisebb a kémiai stabilitása és párolgásra hajlamosabb. A tiszta állapotú fő és adalék só alkotók gőznyomását az elérhető adatok [9] alapján szerkesztett 2. ábra mutatja a hőmérséklet függvényében.

A CaF_2 gőznyomása a 2. ábra szerint nagyságrendekkel kisebb, mint a két alapvető klóridos alkotóé. Így a nagy hőmérsékletű olvasztáskor az alapalkotók párolgása miatt a fluoridtartalom növekedhet. Az oldhatósági határt átlépve, az idegen fázisba lépő alkotó erősen megnövelheti a viszkozitást, rontva az oxid-fém határreteg közé behatolás képességét. Ugyanakkor a hőmérséklet mérsékelt és rövid időtartamú emelése kedvező is, hiszen a NaCl-KCl alapalkotókból álló sóolvadék viszkozitása [10] a 720–800 °C tartományban 2-ről 1,4 Pa · s értékre csökken. Az erősen oxidos betét esetében a leválasztott alumínium-oxid filmből a só olvadékba kerülő sok Al_2O_3 részecske viszont erősen megnöveli a sóolvadék viszkozitását.

A fluoridadalékoknak a sóolvadék fizikai jellemzőire gyakorolt hatása mellett a vékony oxidrétegek kémiai roncsolása is kedvező hatás lehet. Erre utal az is, hogy a klóridos sóolvadékban elsősorban az alkáli-fluorid vegyületek jelenléte biztosítja az alumíniumcseppek hatékony koaleszcenciáját, miközben a só olvadék valamennyi alumíniumot is felvesz, ugyanakkor a fluoridfogyás is kimutatható [8]. Ezek a jelenségek igazolják a fém és a só alkotók között valamilyen mértékben lehetséges kémiai reakciók fellépését is. Továbbá, a fém szemcsét, illetve cseppet burkoló és a kémiai hatások következtében egyenetlenné váló felületi oxid réteg felrepedezhet a fém nagyobb mértékű hőtágulása miatt is. Ezt követően a sóolvadék már könnyebben behatolhat a fém és az oxidburrok közé. Így a fentebbi fizikai hatások a fém és a só között fellépő kémiai reakciókkal együtt segíthetik az oxidréteg leválását és a cseppek egyesülését. Természetesen az oxidrétegek leválasztását külső mechanikai behatásokkal is elő lehet segíteni. Éppen erre



■ 2. ábra. Kezelősó alkotóinak egyensúlyi gőznyomása



■ 3. ábra. A meleg salakfeldolgozási folyamatok (a – primersalak-adagolás, b – a kinyert fém csapolása, c – a maradvány eltávolítása)

a legalkalmasabbak a salakkonverternek is nevezett forgó dobkemencék. A mechanikai hatások még keverő-nyomó eszközök használatával is kiegészíthetők. Működő üzemi salakkonverter-kemencét és a beadott nyers („primer”), valamint a maradvány „szekunder” salakokat mutatja a 3. ábra.

Az alumíniumolvasztási primer salakok nagy hőmérsékletű és kezelősókat is alkalmazó „termomechanikus” feldolgozásával nagy mennyiségű értékes fém nyerhető vissza, de emellett nehézséget jelent a „száraz” (fémes fázist már alig tartalmazó) „szekunder” salak. A primer salak tömegének kb. 60–65%-át kitevő mennyiségben kiolvasztott fémes fázis eltávolítása nyomán a visszamaradó szekunder salakban a „konverterezéshez” beadott kezelősó feldúsul. A teljes betétre vonatkozó koncentrációjának a duplájára emelkedik a fenti fémkihozatali arány mellett. A maradvány salak a vízben oldható sók és a vízzel reagáló egyéb alkotók miatt jelenleg értéktelen, sőt az Európai Unióban is veszélyesként van számon tartva, és általában nem engedélyezett a közönséges deponálás. A kloridos alapalkotók vízben jól oldhatók, miközben a kevés fluoridos adaléka vizes közeggel szemben inert. Így a szekunder salak vizes kezelése a nagy mennyiségű kloridos alapsó eltávolítását, illetve további lépésként a vizes oldatból bepárlással történő visszanyerését is lehetővé teszi [11]. Az alapvetően oxidos maradvány fémes fázisa csupán 5-10%-ot tesz ki, valamint erős oxidréteggel burkolt finom szemcsékben oszlik el. Így nem zavarja például az aszfalt, az üveg és kerámiahabok, a különleges cementek és betonok gyártásában [12], illetve az acélméttallurgiában [13] történő hasznosítását. Utóbbi esetben a néhány százalék maradék fémes alumíniumtartalom éppen hasznos is az üstmetallurgiai salakok redukciójánál. Az oldható kloridos sók eltávolítása nemcsak az alternatív hasznosítás, hanem az anyag veszélytelen deponálási lehetőségét is megnyitja. A konverterezési végmaradvány jól örölhető, ami a még fizikailag (szitálással) kinyerhető maradék fémtartalom eltávolításához mindenképpen szükséges. A keletkező porfrakcióból a kloridos sók már szobahőmérsékleten is igen jól kioldhatók vízzel [14]. A finom porból történő vizes kioldás ugyan könnyen kivitelezhetőnek hangzik, azonban fontos a sótartalom minél teljesebb eltávolítását minimális oldó-

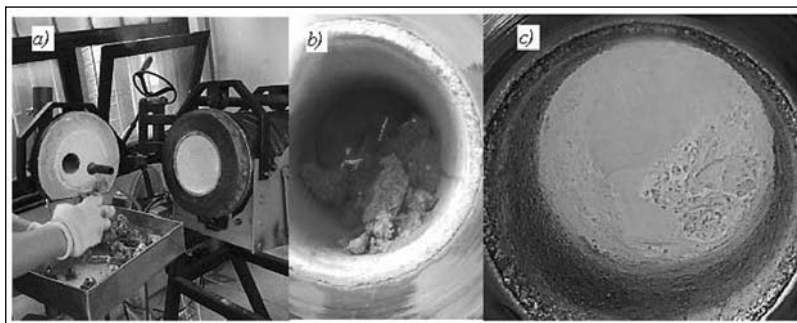
szerigény, minimális öblítési lépésszám, és műveleti idő mellett elérni [14], hiszen a kristályos só kinyeréséhez szükséges bepárlás energiaigénye a gazdaságosságot jelentősen befolyásolja.

Az alumíniumsalakok melegfeldolgozásánál elérhető gazdaságosság, hatékonyság és a végmaradvány sorsa szempontjaiból tehát alapvetően fontos kérdés az alkalmazott sókeverék típusa, mennyisége és visszajáráthatósága. Ezért láttuk érdemesnek egyéb „aktiváló adalék” összetevővel a só hatásmechanizmusát módosítva egy hatékonyabb melegfeldolgozási módszert keresni, miközben figyelemmel voltunk a sókeverék összetevőinek a beszerzési költségeire is. Továbbá szükséges lehet a primer salak hatékony melegfeldolgozásához kapcsolni a korábban már alapjaiban kifejlesztett vizes sókioldó módszert [11], a minimális víz felhasználását és a legrövidebb időt igénylő megoldást megtalálva.

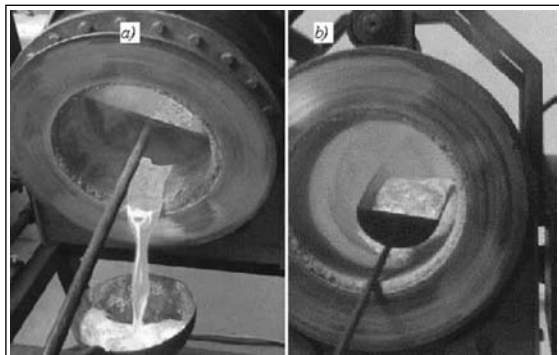
3. Kísérleti eljárás

A kis Mg-tartalmú (0,8 ~ 1,1%) ötvözetcsoporthoz tartozó alumíniumhulladékok üzemi olvasztásából származó darabos, fémes részeket láthatóan tartalmazó salakmintákat törés után hasonló darabokból álló, kb. 2 kg tömegű kísérleti adagokra bontottuk és a 4a, b ábrákon látható kb. 800 °C-ra előzetesen felfűtött kísérleti forgó dobkemencébe adagoltuk. A kemence 500 mm hosszú és 200 mm átmérőjű belső terét a homlokfelületi nyílást záró ajtóba szerelt 7 kW teljesítményű levegő-földgáz égő adta. A forgási sebesség 0–4 fordulat/perc tartományban volt szabályozható. A salakbetétnek a megfelelő hőmérsékletét biztosító előhevítés után számítottuk a termomechanikai kezelés „effektív adagidejét”, és juttattuk a kemencetérbe az előre kimért sóadagot. Míg az üzemi referenciát – az elterjedten alkalmazott só – a gyártó által zsákban kiszerelt és előre homogenizált állapot jellemezte, a saját sókeverékeinket a komponensekből – egyszerűen – mozsárban porítva és összekeverve igyekeztünk megfelelő állapotba hozni. Közben a betét fémes fázisából létrejött az olvadt fémfürdő (4c ábra) a hevítésből adódó termikus és a forgatásból eredő mechanikai hatások eredményeként.

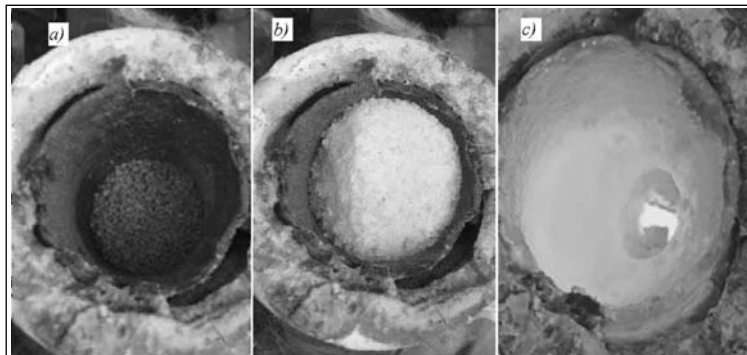
A megfelelő idejű kezelés végén a leállított kemencéből a fürdő felett felhalmozva maradt alapvetően oxidos salaktömeg csökkentése érdekében egy speciális kanállal „elősalakolást” végeztünk. Ezt követően az álló kemencetestet kis szögben előre billentve lecsapoltuk az összegyűlt fémolvadékot (5a ábra). Végül a csapolás után eltávolított-



■ 4. ábra. A nyers salakminta beadása (a, b), és a termomechanikus kezelése (c)



■ 5. ábra. A képződött fémfürdő csapolása (a) és a maradvány egy részének eltávolítása (b)



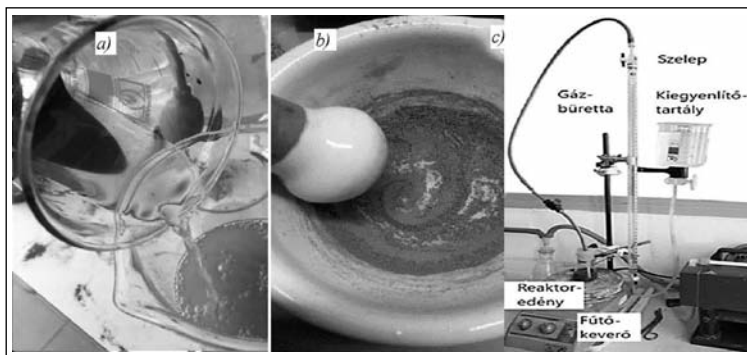
■ 6. ábra. A fémtartalom meghatározása a maradvány durva frakcióiban indukciós kiolvasztással, a – a frakció szemcséi, b – a szilárd kezelősoréteg, c – indukciós olvasztás

tuk a salakos maradványt a kemencéből egy erre készített speciális eszközzel (5b ábra).

A kinyert fém nagy része a kemence előrebilintésével volt csapolható, azonban a szekunder salakban visszamaradó különböző méretű fémszemcsék eloszlása is fontos információt hordoz. A kinyert fémnek a durvább szemcséi az üzemben alkalmazott nagy átmérőjű kemencetestben érvényesülő erősebb mechanikai törő hatások mellett jelentős részben a csapolt fémfürdőbe kerülhetnek volna. Ezért a szekunder salak fémtartalmát őrlés és ötfokozatú szitálás után a különböző szemcseméret-frakciókban (< 0,25 mm, 0,25–0,5 mm, 0,5–1 mm, 1–2,5 mm, 2,5–5 mm és > 5 mm) meghatároztuk. Erre két módszert fejlesztettünk ki, illetve tökéletesítettünk. A durvább frakciók esetében a fémes fázist nagy mennyiségű só olvadékában olvasztottuk ki egy nyitott fűtőterű, a betétet grafit-kerámia kettős falú tégelyben gyorsan hevíteni képes indukciós kemencében kb. 900 °C hőmérsékletre hevítve. Rövid hőn tartás után az olvadt keveréket fémlapra kiöntve és lehűtve, töréssel elkülöníthető volt az összeállt „fémregulusz”. Ennek a tömege mutatta az adott frakció fémkoncentrációját. Ezt a módszert szemlélteti a 6. ábra képsorozata.

A sóolvadékban történő kiolvasztási módszer a legkisebb szemcseméret (< 0,25 mm) esetében azonban nem volt járható út. A finom frakció jelentős oxidtartalma a sóolvadékot nagymértékben besűríti, valamint az egyes kis fémcseppek csupán kis koncentrációban és nagymértékben diszpergáltak jelen. Ezért a legfinomabb frakciókban található fémes fázis mennyiségének a meghatározására egy korábban kifejlesztett [2] módszernek a 7. ábrán szemléltetett pontosabb és továbbfejlesztett változatát alkalmaztuk. Ez a minta sótartalmának a vizes eltávolításából, a gázfejlesztést okozó AIN vegyület elbontását biztosító előkezelésből, szárításból, majd felületaktiváló mechanikus kezelésből, valamint a tömény (12 M) NaOH oldattal végzett reakcióban fejlődő hidrogéngáz (nyomás- és hőmérsékletkompenzációt is biztosító) továbbfejlesztett gázbürettás rendszeren alapuló mérésből állt.

A finom szemcséjű maradványanyag sótartalma desztillált vízzel közönséges körülmények között (7a ábra) is zömében eltávolítható. Azonban a nagy hőmérsékletű termomechanikai kezelés során a levegő-gáz égő haszná-

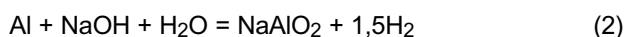


■ 7. ábra. A fémtartalom meghatározása a maradványsalak őrlött finom frakcióiban hidrogénfejlesztéses közvetett módszerrel, a – a sótartalom kioldása és az AIN-tartalom elbontása, b – mechanikus aktiválás, c – a fémtartalom reagáltatása

latakor elkerülhetetlenül képződő AIN vegyület

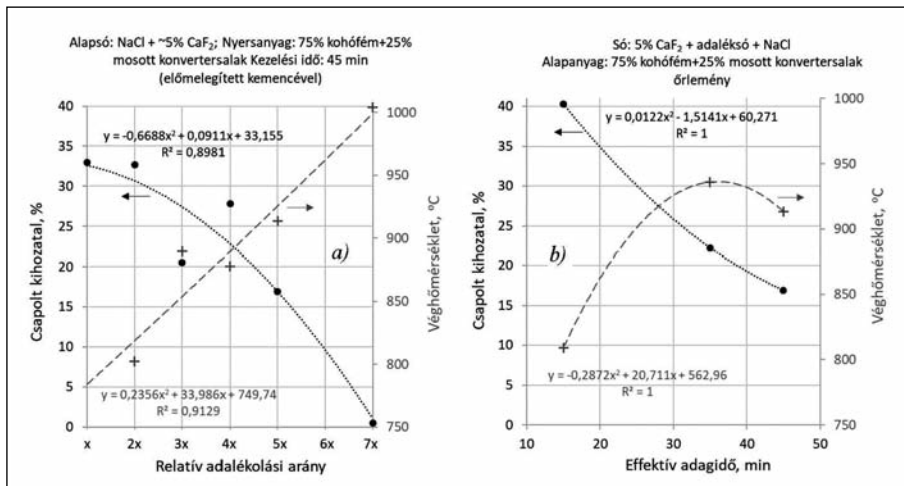


reakció szerint ammóniagázt fejleszt, ami zavaró a fémes Al forró NaOH oldattal történő



reakciójában keletkező hidrogén térfogatmérését. Ezért a fémtartalom meghatározása előtt közel 40 órán keresztül ~ 95 °C hőmérsékleten bontottuk el az (1) reakció szerint. Az ekkor alkalmazott nagy víztérfogat mellett a pH nem emelkedett a fémtartalommal reakcióra is képes szintre. A zavaró vegyületektől megtisztított porfrakciót ezután 150 °C hőmérsékleten szárazra pároltuk, majd a szemcsék felületét a 7b ábrán látható mozsárban dörzsölve aktiváltuk. Az így előkészített anyagból vett mintát a 7c ábrán látható kiegyenlített nyomású zárt reaktorban kevertük be a forró 12 M NaOH oldatba, ahol a keletkezett H₂ térfogatát gázbürettával mértük.

Mivel a kísérleti kemence kis átmérője mellett nem érvényesülhetett a forgatásból eredő mechanikai hatás olyan mértékben, mint az ipari konverterben, az oxidos mátrixból kiszabadult fémcseppekből az összefüggő fémfürdő kevésbé alakulhatott ki. Azonban, az adott minőségű primer salakkal elért átlagos üzemi fémkhozatalokkal összevetve, meghatároztuk a csapolt fém mellett kapott maradvány azon szemcsefrakcióit, amelyek fémtartalma a hasznosnak



■ **8. ábra.** Az aktiváló sóadalék relatív mennyiségének a hatása a csapolt fém kihozatalára és a 45 perces effektív adagidő alatt elért betéthőmérsékletre (a), valamint adott mértékű adagolás mellett különböző effektív adagidőkkel kapott csapolt kihozatalok és hőmérsékletek (b)

tekinthető fémkihozatalhoz sorolandó. Ennek megfelelően, a csapolt tömb, az 1–2,5 mm, a 2,5–5, valamint a > 5 mm örlött és osztályozott szemcseméret frakciók külön meghatározott fémtartalmainak az összege jelentette az indikáció adó „hasznos fémkihozatalt”.

4. Kísérleti eredmények és értékelés

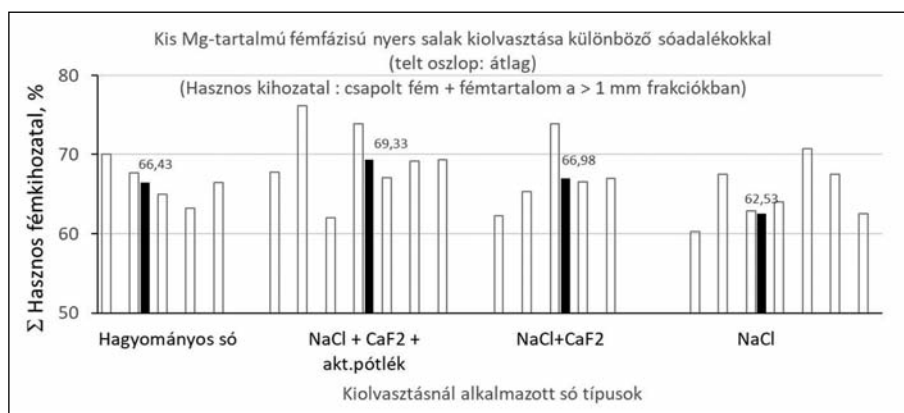
Elsősorban az üzemekben elterjedten alkalmazott NaCl-KCl + 3 ~ 5% CaF₂ alkotókból álló kezelősónak, valamint egy NaCl alapú, ~ 5% CaF₂-ot és a reakcióképes aktiváló alkotót tartalmazó sókeveréknek a hatását kívántuk összehasonlítani. Üzemi technológiából gyűjtött nyers alumínium-olvasztási salakminták kimért adagjaiban a fémes fázis arányát nem lehet rögzíteni. A minták fizikai összetételében jelentkező eltérések a kapott fémkihozatalokban – egy véletlenszerű zavaró hatásként – jelentős szórást okozva mutatkoztak meg. Ugyanakkor, több ismételt kísérleti beállítást is megvalósítva, a párhuzamos eredmények átlaga már alkalmas lehet a vizsgált hatások jellemzésére. Alternatív módszerként, azonos fémtartalmú „szintetikus” nyers salakot állítottunk elő a kísérlethez. Ekkor előzetesen örlött és sómentesített üzemi melegfeldolgozási maradványsalakot és adott mennyiségű kohóalumíniumot hevítettünk a fémfázist megolvastva, majd kevertünk össze lágyult állapotban.

Az utóbbi módszer szerint végeztünk előkísérleteket a reaktív sóadalék mennyiségének és az alkalmazott effektív adagidőnek a hatásvizsgálatára. Az eredményeket a 8. ábra szemlélteti.

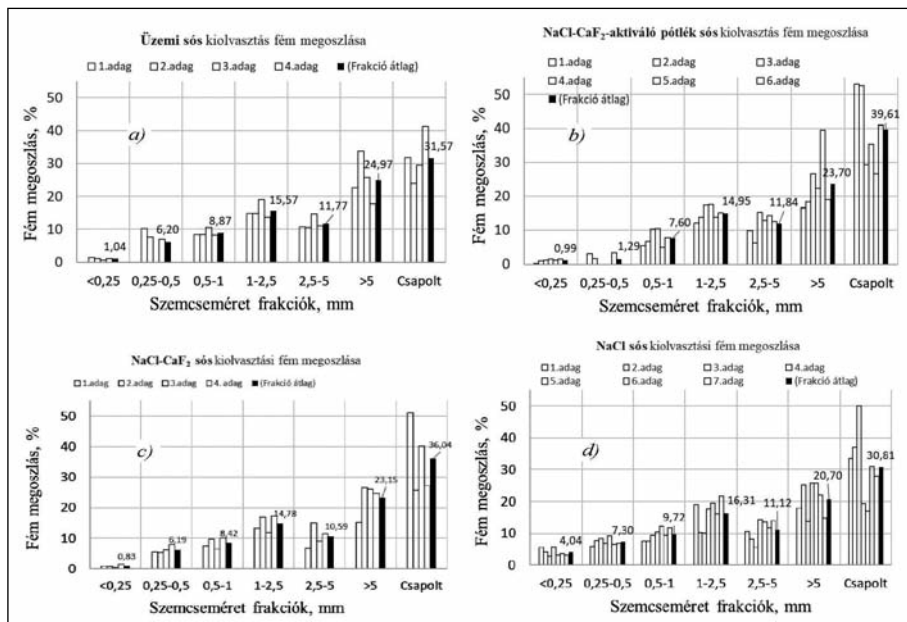
Az aktiváló sóadalék arányát növelve emelkedett a 45 perces effektív adagidő során elért betéthőmérséklet, de erőteljesen csökkent a csapolt fém kihozatali aránya a beadott szintetikus salakbetét tömegére vonatkozóan. Az összefüggés érthető, amennyiben az erős hőmérséklet-emelkedés éppen a fémfázis egy részének az

oxidációjával (leégésével) léphetett fel. A só hatásmechanizmusa azonban közvetlenül nem alapulhat egy vegyületfázisok közötti exoterm reakción, hiszen az alkalmazott mennyiség és a lehetséges komplex oxidképződés nem indokolná a tapasztalt hőfejlődés mértékét. Az aktiváló adaléksó azonban a szabad alumíniumfelületekkel reagálva jelentős hőt fejleszt. A fémcseppeket burkoló alumínium-oxid rétegben így nagyobb mértékben léphet fel a fajlagos térfogatcsökkenéssel járó $\gamma \geq \alpha$ fázisátalakulás, ami segíthette az alumíniumcseppeket burkoló vékony oxidréteg felszakadását. A szabadabbá váló diszpergált fémcseppek felü-

letéhez a CO₂ és H₂O alkotókból álló forró füstgáz is jobban hozzáférhet, és az így elősegített heterogén oxidáció már ~ 15–20 kJ/g Al in situ hőtermelést is okozhat. Az okozott további „fémleégést” túlkompenzálhatja a fém/oxidfázisok elválásának a lokális hőfejlődésből eredő kedvezőbb feltétele, valamint a szabadabbá váló apró cseppek koaleszcenciája. Azonban az eredményesség feltétele a feldolgozott nyers salak megfelelően darabos, nagyobb fémes agglomerációval is rendelkező állapota, valamint az adagidőnek legalább a hevítés gyorsulásának az arányában történő csökkentése. Ugyanakkor a kemence forgatását is célszerű mérsékelni, amivel a szabad cseppek egyesüléséhez megfelelő körülmények biztosíthatók. A 8b ábra szerint megfelelő adagolási arány esetén akár harmadára is csökkenthető az effektív adagidő, ami mellett a kihozatal még az adalékmentes referenciaérték feletti is lehet. A megfelelő technológia a betét hőmérsékletének a követését feltételezi, ami azonban a forgó kemencében nehezen kivitelezhető. Ennek ellenére a fenti eredmények jelzik, hogy a hagyományos „kezelősó” módosításával a fémkihozatal megtartása, illetve optimális beállítások mellett, akár emelése mellett, energiamegtakarításra és a termelékenység fokozására is van mód. A nagyobb mennyiségben rendelkezésre álló üzemi nyers alumíniumsalakból készített azonos tömegű és közel azonos méretű és jellegű dara-



■ **9. ábra.** A beadott só típusának a hatása a meleg salakfeldolgozás hasznos fémkihozatalára



■ 10. ábra. A meleg salakfeldolgozásból kapott fémnek a termék frakciói közötti megoszlása különböző (a–d) sóadalekok alkalmazásakor

bokból álló betéteket többször ismételt kísérleti kiolvasztásokkal vizsgáltuk. Ebben az esetben már nemcsak a csapolt fém, hanem a maradványsalak – őrlés és osztályozás után kapott – 1 mm-nél durvább szemcsefrakcióiban talált fémtartalmakat is figyelembe vettük, ami az üzemi berendezésben érvényes viszonyok között a csapolt fémbe kerülhet, így a kísérleti rendszerben a hasznos fémkhozatalhoz tartozik.

Az alapanyag változó fizikai összetétele jelentős szórást okozott, de a viszonylag nagyszámú párhuzamos eredmények átlagai összevethetők. Az aktiváló sóadalek alkalmazása mellett a hasznos fémkhozatal még nagyobbak adódott, mint amit az üzemben használt kereskedelmi beszerzésű sókeverék tudott biztosítani. Ugyanakkor, a fluoridos adalék jelentősége is látszik, hiszen csupán az alapalkotó NaCl adagolása esetében jelentősen kisebb fémkhozatal volt elérhető, mint a NaCl+CaF₂ keverékkel. Az eredményeket érdemes a 10. ábrán látható őrlött maradványfrakciók és a csapolt tömb közötti fémmegoszlás szempontjából is megvizsgálni.

A megfelelő sókeverékek a kiolvasztás során a legfino-

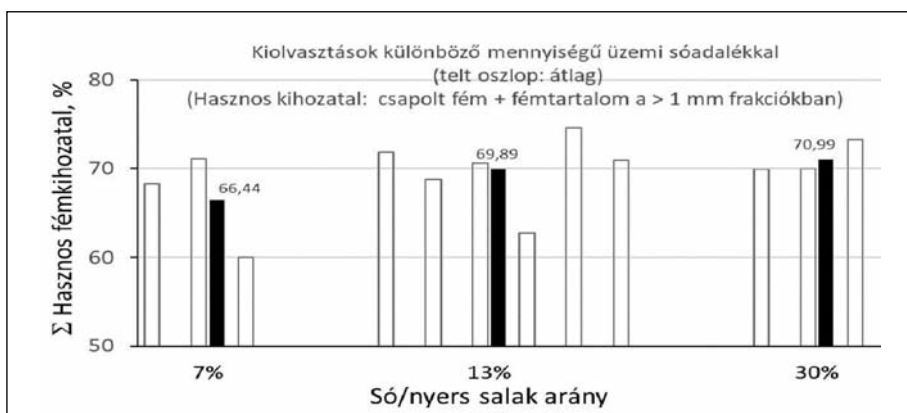
eredményeket a 11. ábra mutatja.

Az eredmények szerint a sóadagolás arányát érdemes a költségek és az elért hatások szempontjai szerint optimalizálni. Ekkor figyelembe kell venni, hogy a szokásos üzemi só mennyisége a nyers salak tömegére vonatkozó kb. 15%-os arány felett már nem okoz jelentős változást a fémkhozatalban. Ezt összevetve a 8. ábrán bemutatott eredményekkel, igazolja az aktiváló reagens adalék által bevezetett – eltérő mechanizmuson alapuló – további hatást.

5. Összefoglalás

Az alumíniumsalakok üzemi melegfeldolgozásánál adagolt só hatásmechanizmusának és a fémkinyerési hatékonysági, valamint az energiafelhasználási mutatók javítására alkalmas lehetőségek vizsgálatára kialakítottuk a nagylaboratóriumi méretű forgó dobkemencés kísérleti rendszert. Noha a kis méretek miatt a forgatásnak a betét törésében és keverésében megnyilvánuló mechanikus hatásai itt jelentősen gyengébbek, a vizsgált hatások kimutatása mégis lehetséges, amennyiben a csapolt formában kapott fém

mellett figyelembe vesszük a maradványban található durva fémszemcsék tömegét és eloszlását. Az elterjedten alkalmazott „üzemi só” adagolási arányát, valamint a szokásos üzemi paramétereket változtatva nem várható jelentős gazdasági előny. Azonban a diszpergált fémcseppek koaleszcenciáját a sóadalek alapvető hatása in túl, újabb hatások előidézésével is lehet fokozni. A betét finom fémcseppeinek a felületét kémiai reakciókkal tisztító, ezáltal a részleges oxidációból eredő lokális hőfejlésben megnyilvánuló me-



■ 11. ábra. A só mennyiségének hatása a meleg salakfeldolgozás hasznos fémkhozatalára

chanizmust elősegítő aktiváló adalék hatása előnyös lehet az alumíniumhulladék üzemi olvasztásából származó – erősen fémes – nyers salakok termomechanikai feldolgozásánál. Ugyanis a megfelelően optimalizált technológia melletti adagolásával jelentősen képes megváltoztatni a termomechanikai salakfeldolgozás körülményeit és jellemzőit. Az előmelegítést követő effektív adagidő lerövidítése mellett a hasznos fémkihozatal a szokásos üzemi só alkalmazásához viszonyítva megtartható, sőt még emelhető is. Ugyanakkor az aktivált só viszonylag kedvező áron beszerezhető alkotókból összeállítható, és a kapott eredményeket előzetes homogenizáló olvasztás nélkül, egyszerű keverékképzéssel is el lehetett érni. A kísérletek alapján sikerült kimutatni a hatásokat és alátámasztani a feltételezett mechanizmust, azonban a technológia alkalmazása az üzemi méretű berendezéssel végzett további optimalizálást is igényli. A melléktermékként kapott szekunder maradványsalak sótartalmának a vizes eljárással történő eltávolítása az elterjedten alkalmazott üzemi só esetéhez hasonlóan megvalósítható.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutatás témáját és feltételeit részben a GINOP 2.2.1.-15-2016-00018 projekt támogatása segítette kialakítani, a munkát pedig az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programja átfogóan támogatta.

Irodalom

[1] *M. E. Schlesinger*: Aluminium recycling, 2nd. ed. ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.

- [2] *T. Kékesi, T. Kulcsár*: Ötvözött alumíniumhulladékok olvasztása során keletkező salakok jellemzői. BKL Kohászat, vol. 150, no. 1, pp. 23–29, 2017.
- [3] *T. Kulcsár, T. Kékesi*: Thermo-mechanical extraction of aluminium from the dross of melting AlMg scrap. In MultiScienceXXXIst microCAD Int. Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 20–21. April 2017, Section D, p.9..
- [4] *T. Smith*: Alumox and Reox: The treatment of dross and salt cake. Aluminium International Today, vol. 20, no. 2, pp. 18–22, 2008.
- [5] *T. Kékesi, T. Kulcsár*: Ötvözött alumíniumhulladékok olvasztása. BKL Kohászat, vol. 150, no. 1, pp. 23–29, 2017.
- [6] *F. K. Ho, Y. Sahai*: Interfacial tension between aluminium and molten salt flux. Materials transactions, JIM, vol. 38, no. 6, pp. 546–552, 1997.
- [7] *K. Krone*: Aluminium Recycling, Düsseldorf: VDS, 2000.
- [8] *E. Milke, B. Friedrich és A. Sydykov*: Solubility of CaF₂ in NaCl-KCl salt flux for Al-recycling and its effect on Al-loss. Proceedings – European Metallurgical Conference, EMC-4, 2005.
- [9] Luxel, 2013. [Online]. Available: <https://luxel.com/wp-content/uploads/2013/04/Luxel-Vapor-Pressure-Chart.pdf>.
- [10] *A. I. Beljajev, E. A. Semcsusina, L. A. Firsanova*: Physikalisches Chemie geschmolzene Salze, Leipzig: VEB-Verlag der Grundstoffindustrie, 1964.
- [11] *B. Hegedüs, T. Kékesi*: Lehetőség az alumínium olvasztási salakok megfeldolgozási maradványainak hidrometallurgiai kezelésére. Kohászat, vol. 151, no. 1, 2018, pp. 29–35.
- [12] *Z. Soós, R. Géber, C. Tóth, Z. Igazvölgyi, B. Udvardi*: Utilization of aluminium dross. J. Silicate Based and Composite Mater., vol. 152, no. 2, pp. 89–93, 2017.
- [13] *B. Harcsik, T. Kékesi*: Az alumíniumolvasztási salak sótalánított megfeldolgozási maradványának acélipari felhasználása. BKL Kohászat, vol. 152, no. 2, pp. 3–8, 2019.
- [14] *I. Illés, M. Sassi, H. Zakiyya, T. Kékesi*: The fundamental kinetic characteristics of aqueous dissolution of chloride and fluoride salts from secondary aluminium dross. In Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország, 2019.

Új szakkönyvek is segítik a kohásképzést a Miskolci Egyetemen

A Miskolci Egyetemen több évtizedes hagyománya és nemzetközileg is elismert tudományos iskolája van a fémek, fémes anyagok előállítását és feldolgozását oktató és kutató szakterületeknek. A fémkinyeréssel és a fémek kémiai jellegű kezelésével foglalkozó kémiai metallurgiai szakterületek széles spektrumából *dr. Kékesi Tamás* professzor a közelmúltban vállalkozott arra, hogy nagy elődök nyomdokában néhány új, és mindenki számára könnyen elérhető szakkönyvben foglalja össze a legfrissebb méremői alapozó kémiai metallurgiai ismereteket, továbbá elsősorban az alumínium előállítása és tisztítása folyamatainak, illetve technológiájának a jellemzőit.

Kékesi Tamás professzor a fő művek kiegészítő fejezeteinek kialakításába fiatal kollégákat is bevont, amivel a szakma és a tudomány iránti elkötelezettséget és a metallurgiai oktatás és kutatás jövőbeli művelését és gazdagítását is segíteni kívánta. A közelmúltban, illetve napjainkban megjelent kémiai metallurgiai, illetve könnyűfém-metallurgiai tárgyú könyvek a következők:

1. Kékesi Tamás: **Kémiai metallurgia alapjai** [PDF], (javított kiadás: 2018) 152 oldal
ISBN 978-963-358-066-0
<http://193.6.1.94:9080/?docId=33179>
2. Tamás Kékesi: **Fundamentals of Chemical Metallurgy** [PDF], (megjelenés: 2018) 153 oldal
ISBN 978-963-358-198-8
<http://193.6.1.94:9080/?docId=33180>
3. Kékesi Tamás: **Primer és szekunder alumíniummetallurgia** [PDF], (megjelenés: 2019) 279 oldal
ISBN 978-963-358-199-5
<http://193.6.1.94:9080/?docId=33176>
4. Kékesi Tamás, Szabó Gábor: **Alumíniumötvözetek típusai és feldolgozásuk félfolyamatos öntést követő hengerléssel** [PDF], (megjelenés: 2019) 50 oldal
ISBN 978-963-358-200-8
<http://193.6.1.94:9080/?docId=33177>
5. Kékesi Tamás, Illés István Balázs: **A magnézium és a titán előállítása** [PDF], (megjelenés: 2019) 70 oldal.