

Hulladékká vált autóiipari csatlakozók nemes- és színesfém-tartalmának hasznosítása mechanikai előkészítést követő pirometallurgiai módszerrel

The utilization of the precious and non-ferrous metal content of waste automotive connectors by mechanical pre-treatment and a subsequent pyrometallurgical method

FEHÉR GERGŐ ,

fejlesztőmérnök

ILLÉS ISTVÁN BALÁZS 

kutatás-fejlesztési vezető

Metal Shredder Hungary Zrt., Budapest

@E-mail: istvan.illes@mshungary.com

Az autóiiparban áramvezetésre használt csatlakozók hulladékai értékes másodnyersanyagok lehetnek, hiszen jelentős koncentrációban tartalmaznak aranyat és rézet. A fémvisszanyerés előtt azonban először mechanikai előkészítéssel szükséges az aranytartalmú érintkező tűk nemfém komponensektől való elválasztása, így létrehozva egy aranyban és rézben dús fémkoncentrátumot. A cikkben két módszer hatékonyságát vizsgáltuk meg. Az első esetben a csatlakozókat először kalapácsos shredderben aprítottuk, majd ezt követően mágneses szeparálással sikerült az arany 97,02%-át és a réz 76,16%-át a mágneses termékbe leválasztani. A második módszer során a termokémiai kezelésen is átesett csatlakozókat pofás törőben való előaprítás után, golyósmalomban őröltük tovább, majd szitasoron történő osztályozást követően, az 1 mm feletti anyag jelentette a fémkoncentrátumot, amely tartalmazta a csatlakozókban lévő aranytartalom 99,4%-át. A fémekben dús, 1 mm feletti frakció pirometallurgiai hasznosíthatóságát fémeket feloldó olvasztással vizsgáltuk, oldószerként rézolvadékot alkalmazva. Optimális körülmények mellett a fémkoncentrátum aranytartalmának 99,1%-a oldódott a rézolvadékba, így az ötvözet aranykoncentrációja 0,26 g/kg volt.

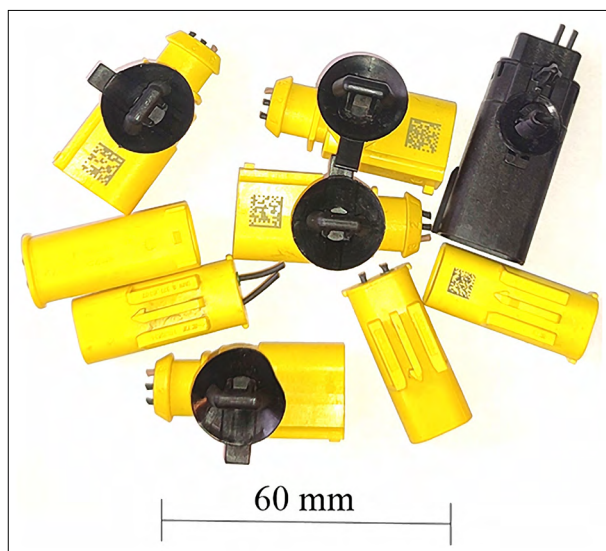
Kulcsszavak: autóiipar, használt csatlakozó, hulladék, másodnyersanyag, fémvisszanyerés

The waste of connectors used for electrical conduction in the automotive industry can be valuable secondary raw materials, as they contain significant concentrations of gold and copper. However, before metal recovery, it is first necessary to mechanically separate the gold-containing contact pins from non-metallic components, thus creating a metal concentrate rich in gold and copper. In this article, we examined the effectiveness of two methods. In the first case, the connectors were first shredded in a hammer shredder, and then magnetic separation was used to separate 97.02% of the gold and 76.16% of the copper into the magnetic product. In the second method, the connectors, which had undergone thermochemical treatment, were pre-shredded in a jaw crusher, ground further in a ball mill, and then classified by sieving. The material above 1 mm constituted the metal concentrate, which contained 99.4% of the gold content in the connectors. The pyrometallurgical utilization of the metal-rich fraction above 1 mm was investigated by metal-dissolving melting using molten copper as the solvent. Under optimal conditions, 99.1% of the gold content of the metal concentrate dissolved into the molten copper, resulting in a gold concentration of 0.26 g/kg in the alloy.

Keywords: automotive industry, used connector, waste, secondary raw material, metal recycling

1. Bevezetés

Az arany, a réz, a nikkel és egyéb ritka fémek felhasználása széles körben elterjedt az elektronikai eszközök gyártásánál, ez az autóiparra fokozottan igaz [1–3]. Az autóipari szektor rohamosan növekszik, ami magával vonja a mobilitást szolgáló eszközök gyártása során keletkező hulladékok mennyiségének növekedését is. Megfelelő kezelés hiányában az elektronikai hulladékok szignifikáns környezeti terhet jelenthetnek. Azonban, a bennük található jelentős nemes- és színesfém mennyiség fontos gazdaságossági alapot teremthet az újrahasznosításuknak, ami a körforgásos gazdaság szempontjából is kiemelten fontos. További fontos szempont, hogy ezek az anyagok gyakran lényegesen nagyobb koncentrációban tartalmaznak értékes fémes elemeket, mint a primer nyersanyagok. A jó minőségű aranyércek aranykoncentrációja mindössze 1–10 g/t-ás értékekkel jellemezhető [4, 5]. A művealó rézércek rézkoncentrációja 5–60 g/t, ami ugyan meghaladja az aranyércek koncentráció értékeit, de a másodnyersanyagokhoz viszonyítva kis érték [6, 7]. Szemben a primer forrásokkal az elektronikai hulladékokban 10–100-szor nagyobb arany- és rézkoncentrációk mérhetők, tehát jogosan tekinthetők értékes másodnyersanyagoknak [8–10]. Noha a lakossági felhasználásból származó elektronikai hulladékok a legelterjedtebbek, kevésbé ismertek az áramvezetésre használt csatlakozók autóipari típusai. Ezek a hulladékok nem csupán az amortizációból, hanem a gyártás során is jelentős mennyiségben keletkeznek, mint selejtes termékek. Az autók gyártása során jelentős mennyiségben van szükség az egyes elektronikai eszközök kommunikációját segítő csatlakozó egységekre. Ezeket a gyártásközi selejtes csatlakozókat illesztjük az 1. ábra.



1. ábra. Nemesfém tartalmú autóipari csatlakozók

Mivel ezek a csatlakozók az autók megfelelő működése szempontjából kiemelt fontosságúak, szigorú minőségbiztosítási szabályok vonatkoznak a megfelelőségre. Ennek következménye, hogy nagy mennyiségű gyártásközi selejt keletkezik. Noha az autók gyártása során sok egyéb más típusú hulladék is keletkezik, a csatlakozók perspektivikus másodnyersanyagnak tekinthetők, hiszen jelentős koncentrációban tartalmaznak olyan értékes nemes- és színesfémeket, mint az arany, a réz és a nikkel. Ezek az elemek „kritikus nyersanyag” státusszal rendelkeznek az Európai Unióban, azaz nélkülözhetetlenek a már meglévő és a jövőben fejlesztett technológiákhoz és az elektronikai, valamint elektronikus berendezések működéséhez [11]. Fontos tény, hogy a jelentős műanyag tartalom miatt a közvetlen fém visszanyerés nem megvalósítható. Noha evidens lehet, hogy aprítást követően fizikai módszerekkel a műanyag elválasztható a fémes frakciótól, de előfordulhat, hogy a mechanikai előkészítés – azaz az aprítás és a szeparálás – során valamilyen mértékű aranyvesztés lép fel. Ennek oka lehet a fizikai behatás okozta aranyréteg-lepattogás, amelynek hatására az arany a műanyag porral – és egyéb szennyezőkkel együtt – a hulladék-porfrakcióba kerül, amelyből nem nyerhető vissza gazdaságosan. A cikkben alapvetően két módszer hatékonyságát hasonlítjuk össze. Az első módszer során az anyagot aprítjuk, majd elválasztjuk a fémes és a műanyag termékeket. A második módszer alkalmazása során a mechanikai eljárások alkalmazása előtt a másodnyersanyag egy termokémiai kezelésen esik át, amely hatására a műanyag tartalom hőenergiává és elszenesedett vázzá alakul, az arany pedig bediffundál a fémes hordozó fém mátrixába. Ez utóbbi fontos hatás, hiszen az ezt követő fizikai előkészítés során így az aranyvesztés minimalizálható. A két mechanikai előkészítési módszer közül a jobb aranykihozattal rendelkezőnek a koncentrátumával történnek pirometallurgiai hasznosíthatóságot vizsgáló kísérletek.

2. Kísérleti eljárás

A cikkben szereplő csatlakozók vizsgálata eredeti és termokémiai kezelésen átesett állapotban is megtörtént, mindkét anyagáramból 30–30 kg reprezentatív minta lett elkülönítve. A kalapácsos shredderben történő aprítás során a szitabetét 20 mm-es volt. A termokémiai kezelésen átesett csatlakozók előaprítása egy FRITSCH Pulverisette 1 típusú pofás törő segítségével történt 15 mm-es részmérettel. Az ezt követő őrlés során a golyósmalomban az őrlőtestek 20 mm átmérőjű kerámia golyók voltak, összesen 2328 g golyót használva. A kerámia golyósmalom belső átmérője 180 mm, a golyósmalom 1,1 fordulat/másodperces fordulattal volt üzemeltetve, ami 0,514 m/s kerületi

1. táblázat. A csatlakozókban található érték fémek formájában [12, 13]

Elem	Fémek mennyisége 1 tonna autóiipari csatlakozóban [kg]	Fémek ára [Ft/kg]	Érték 1 tonna anyagban [Ft]	Érték megoszlása [%]
Au	0,1809	35 617 400	6 443 188	95,33
Cu	75,1411	3 580	269 005	3,97
Fe	22,8999	139	3 182	0,04
Zn	12,8646	1 069	13 752	0,20
Ni	2,5633	5 910	15 149	0,22
Sn	1,3403	12 312	16 502	0,24
Σ	–	–	6 760 778	100

sebességet jelent. A malomban az anyag minden kísérletnél 30 percet töltött el.

A csatlakozókból és a termokémiaiilag kezelt csatlakozókból anyagvizsgálatai célra vett mintákat királyvízben 1 órán keresztül 90 °C-on melegítettük, hogy a fémes fázis teljes mértékben feloldódjon. Az így kapott savas oldatokat láng-atomabszorpciós spektrometriával elemeztük egy Varian SpectrAA 300 típusú berendezéssel. Emellett az anyagvizsgálat során energiadiszipatív röntgenfluoreszcens módszerrel is végeztünk méréseket egy Rigaku NecQX asztali spektrométert használva.

A pirometallurgiai olvasztási kísérleteket agyag-grafit téglában 1250 °C-on végeztük egy Indutherm MC 100 típusú vákuumindukciós kemencében. Az olvadékat vastag grafitkokillába csapoltuk, majd megszilárdulás után az öntecs azonnal kiszedtük, és vízsugárban történt a lehűtése, így a gyors hőelvonás hatására az öntecsek összetétele viszonylag homogén lett. A fémöntecsekből forgácsolással vett mintát először EDXRF készülékkel, majd savas oldást követően atomabszorpciós módszerrel is analizáltuk.

3. Mechanikai előkészítés

A cikkben először a műanyagtartalmú csatlakozók mechanikai előkészítését és elválasztását mutatjuk be, majd ezt követi a termokémiai kezelésen átesett anyag feldolgoása.

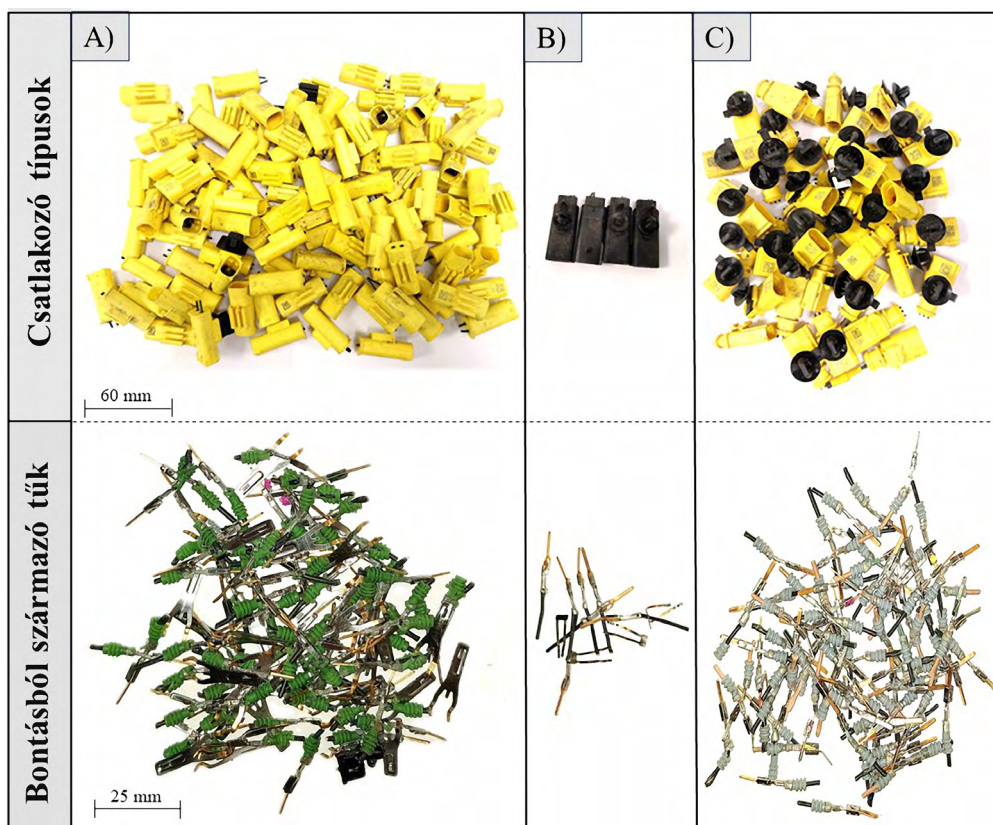
3.1. Előkezeletlen csatlakozók mechanikai előkészítése

A 1. táblázatban az autóiipari csatlakozókban lévő fémek mennyiségét, értékeiket és azok megoszlását láthatjuk – 1 tonna autóiipari csatlakozóban közel 7 millió forint a fémes elemek értéke. Látható továbbá, hogy az érték több mint 95%-át az arany adja, további ~4% ot pedig a réz. Az egyéb fémek lényegesen kisebb mennyiségben vannak jelen. Noha a cink, a nikkal és az ón széles körű felhasználási területtel rendelkező értékes fémek, a csatlakozókban találha-

tó kis mennyiségük miatt jelentős gazdasági hasznot nem jelent a kinyerésük. A táblázatban szereplő fémkoncentráció-értékek savas feltárást követő atomabszorpciós spektrometriával lettek meghatározva. A táblázatban a fémek ára a 2025. 02. 26. napi árfolyam-értékei [12, 13].

A mechanikai előkészítést megelőzően fontos megvizsgálni az anyag fizikai tulajdonságait és kémiai összetételét, hiszen az anyagjellemzők alapján választható ki a megfelelő mechanikai eljárás. A csatlakozók először egyesével, kalapáccsal lettek szét törve, hogy a bennük lévő nemesfém tartalmú tűk megvizsgálhatóak legyenek. A kézi bontás során azt tapasztaltuk, hogy a csatlakozók műanyag házát üvegszál-erősítésű szívos műanyagból gyártották. Ebből következik, hogy a csatlakozók mechanikai feltáráshoz nem elégséges csak az ütő igénybevétel, hanem nyíró igénybevételre is szükség lesz. Ezek alapján a kalapáccsos shredder alkalmas lehet a csatlakozók aprítására és a benne rejlő érintkező tűk feltárása. A műanyag házból való eltávolítás után a tűket EDXRF készülékkel vizsgáltuk meg, hogy információt nyerjünk a tűket felépítő anyagokról. Az anyagot háromfajta csatlakozó alkotja, amelyek a 2. ábrán láthatóak. Ezek a csatlakozók kétféle aranytartalmú érintkező tűt tartalmaznak, az egyik típusú tű saválló acélból, a másik típusú tű pedig sárgarézből készült, mindkettő felületén aranybevonat található. A sárgarézből készülő tűn található egy saválló acéldarabka is, amely a szilárdságát biztosítja. Továbbá mindkét típusú tűn található egy ónozott vörösréz kábel a végükre forrasztva.

Mivel minden érintkező tű tartalmaz valamilyen formában mágnesezhető, saválló acélt is, az aprítást követő szétválasztás kivitelezhető mágneses szeparátorral. Ennek alapfeltétele, hogy érintkező tűkön az aprítás után is rajta maradjon a szeparálást lehetővé tevő saválló acéldarabka. Tehát a kalapáccsos shredder szitabetétjének kiválasztása kulcsfontosságú a hatékony elválasztás szempontjából. Figyelembe véve a csatlakozókban lévő érintkező tűk méretét, a 20 mm-es lyukbőségű szitabetét alkalmazása tűnt a legelő-

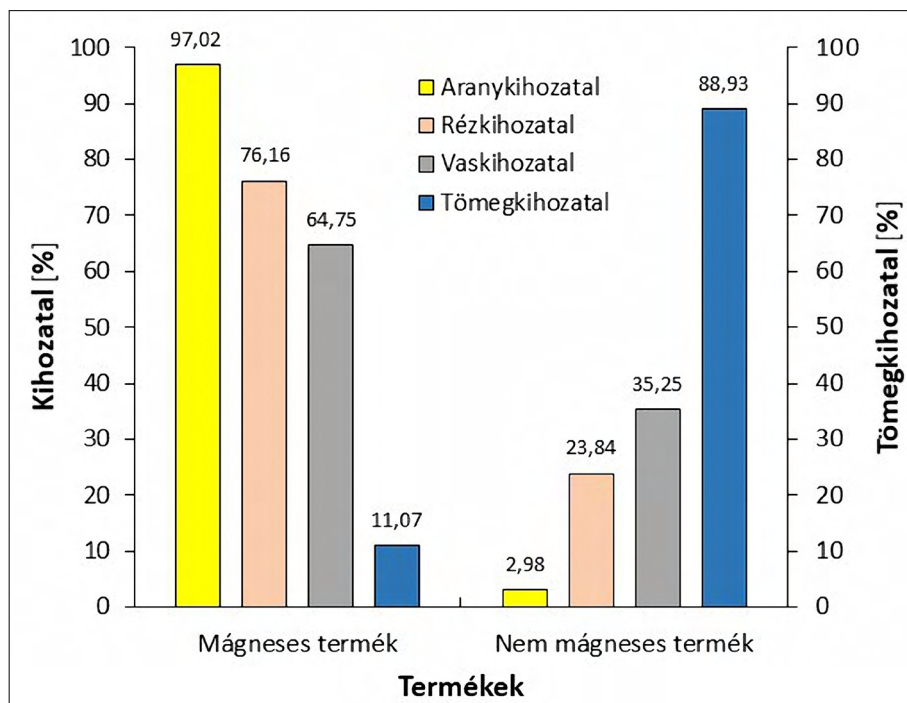


2. ábra. Az autóiipari csatlakozók és az ezekben található érintkező tűk

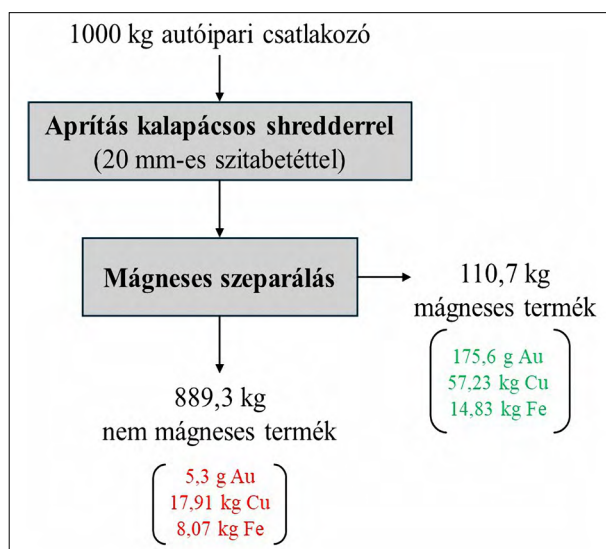
nyösebbnek. További cél volt aprítást követően, egy aranyban és rézben dús mágneses termék, valamint egy műanyagban dús nem mágneses termék létrehozása. A 3. ábrán a mágneses és nem mágneses termék tömeg- és fémkivonatai láthatók.

lepattogott finom arany szemcsékből és a mágneses szeparálás során sikertelenül elválasztott tűkből származik, míg a réztartalom főleg a csatlakozók tövében

lévő kábelekből kiesett finom rézdrótokból eredően van jelen. A 4. ábrán látható az eljárás anyagáram-anyagmérleg diagramja 1000 kg feldolgozott anyagra vonatkoztatva. A mágneses termékben jelentős az arany dúsulása, az eredeti anyaghoz viszonyítva közel 10-szeres az aranykoncentráció. A nem mágneses termék zömében műanyag törmelékből áll, a benne lévő fémes érték – mivel gazdaságosan nem nyerhető vissza – elveszett. Továbbá a jelentős mennyiségű műanyag elszállítása és deponálása nagymértékben növelheti az anyag feldolgozási költségeit. Tehát az eljárás ugyan hatékonyan képes



3. ábra. Autóiipari csatlakozók kalapácsos shedderben történő aprítását követő mágneses szeparálás fém- és tömegkivonatai

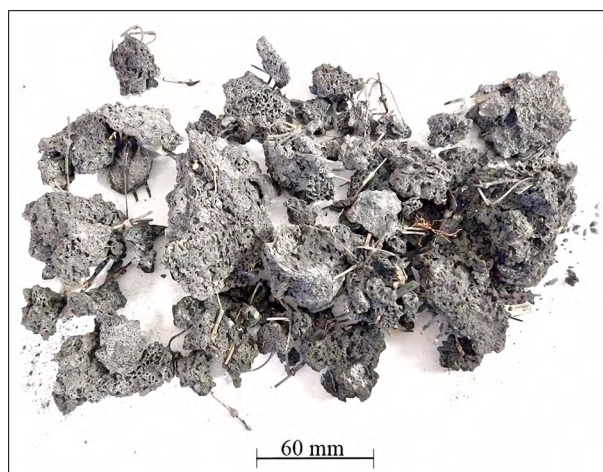


4. ábra. A csatlakozók feldolgozásának anyagáram-
anyagmérleg diagramja

az aranytartalmú érintkező tűk műanyagotól való elválasztására, és az aranyvesztés ugyan csekély, de jelentős mennyiségek feldolgozása esetén ez a 2,98%-os aranyvesztés akár komoly érték deponálását is jelentheti. Az eljárás további hátránya a nagy mennyiségben képződő, anyagában nem hasznosítható műanyag hulladék.

3.2. Termokémiailag kezelt csatlakozók mechanikai előkészítése

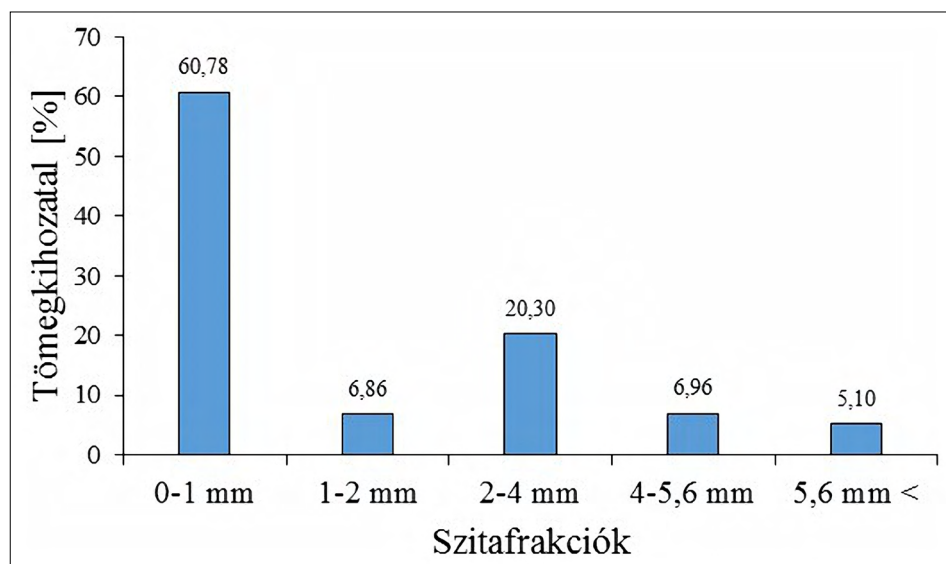
A termokémiailag kezelt anyag (5. ábra) esetében egy elszénesezett váz tartalmazza az aranytartalmú érintkező tűket. Azonban itt az arany már nem a tűk felületén található, hanem a termokémiailag kezelés során fellépő hő hatására beötvöződik az érintkező tűk anyagába.



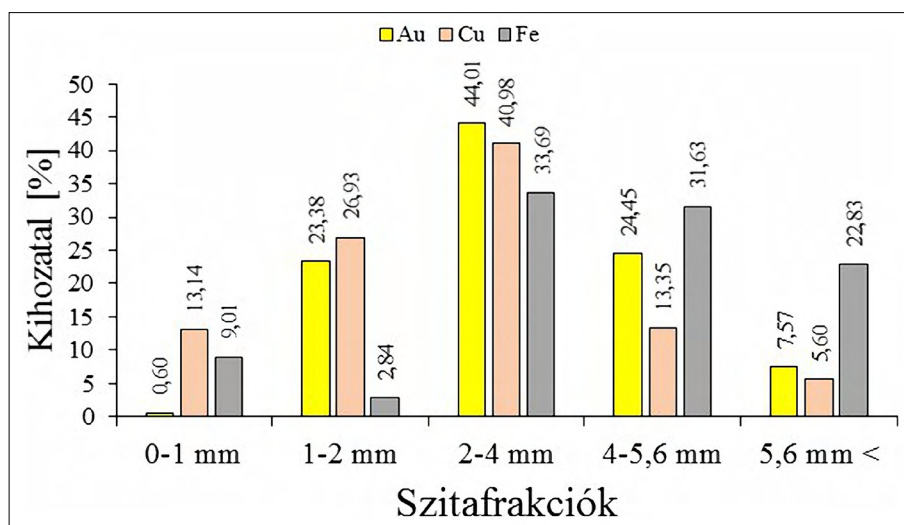
5. ábra. Termokémiailag kezelt csatlakozók

Mivel az anyag vázát egy könnyen málló, porózus szerkezetű anyag alkotja, amely nyomó és üto igénybevétel hatására is könnyen aprítható, fő igénybevételként nyomást és ütést alkalmazó berendezések alkalmazásával valószínűleg szelektív aprítás érhető el. Az elválasztása pedig könnyedén kivitelezhető szemcseméret szerinti osztályozással. Mivel az anyagban található nagyobb darabok, rögök is, ezért szükséges az anyag előaprítása. Ez hatékonyan kivitelezhető pofás törővel, hiszen a berendezésben fellépő fő igénybevétel a nyomás. Az előaprítás után a szelektív őrlés hatékony lehet golyósmalommal, hiszen a fellépő fő igénybevétel az ütés, ami kevésbé van hatással az érintkező tűkre, annál inkább az elszénesezett vázra. Az őrlés osztályozása megvalósítható szitassal. Az anyag feldolgozása az előbb említett logika alapján történt meg.

Ahogy az a 6. ábrán látható, a méret szerinti osztályozás során az anyag 5 szitafrakcióra lett szétválasztva. Az 1 mm feletti szitafrakciók zömében fém



6. ábra. A szitafrakciók tömegkihozatalai



7. ábra. A szitafrakciók fémkihozatalai

komponenseket tartalmaznak, az elszenesedett váz legnagyobb része pedig az 1 mm alatti frakcióba került. Az anyag tömegének legnagyobb része, majdnem 61%-a finom por formájában az 1 mm alatti szitafrakcióba került leválasztásra. Ennek oka, hogy az elszenesedett váz a szelektív aprítás hatására finom porrá őrlődött, az aprítási igénybevétel az érintkező tűkre viszont nem volt jelentős hatással.

A 7. ábra az arany, a réz és a vas kihozatalait tartalmazza a különböző szitafrakciókban. Az aranyak mindössze 0,6%-a kerül az 1 mm alatti szitafrakcióba, 99,4%-a pedig az 1 mm feletti.

és fémkihozatalok alapján az anyag 1 mm-nél történő elválasztása tűnik optimálisnak, így az arany 99,4%-a az 1 mm feletti termékbe kerül és hulladékporként leválasztható a teljes anyag tömegének a 60,78%-a.

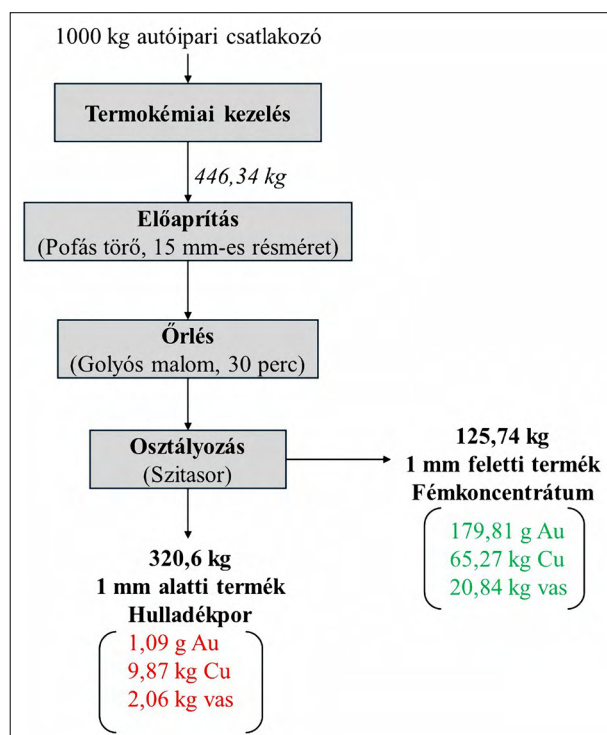
A 8. ábrán látható az eljárás anyagáram-anyagmérleg diagramja 1000 kg feldolgozott anyagra vetítve.

Látható, hogy a termokémiai kezelés hatására az anyag tömegcsökkenése 55,37%, ez teljes mértékben a műanyagtartalom átalakulása miatt lép fel. Ezáltal a fémek feldúsulnak, illetve az aprító és osztályozó berendezéseknek kevesebb anyagot kell feldolgozniuk. Tehát a mechanikai előkészítési fázis energiaigénye kisebb lehet, szemben az előkezeletlen csatlakozókéval. A golyósmalommal történő őrlés után szitálással elválasztott anyag tömegének 60,78%-a leválasztható 1 mm alatti hulladékporként. Az 1 mm feletti termék a koncentrátum, amelynek az aranykihozatala 99,4%. A módszert összehasonlítva az előző eljárással megállapítható, hogy ez a módszer nagyobb arany- és rézkihozattal rendelkezik. Ennek oka, hogy az arany beötvöződött az érintkező tűk anyagába. A módszer további előnye, hogy a termokémiai kezelés során képződő hőenergia – megfelelő technológia alkalmazása esetén – akár hasznosítható is. Ezenfelül a nagy mennyiségű, anyagában hasznosíthatatlan műanyag hulladék keletkezésével sem kell számolni. Azonban potenciális hátrány a füstgáztisztítás szükségessége.

Az elválasztott anyag 1 mm feletti része alkotja a koncentrátumot, amely összetétele a 2. táblázatban szerepel.

2. táblázat. Az 1 mm feletti szitafrakciók releváns fémkoncentrációi

Elem	Cu	Au	Fe
Koncentráció (g/kg)	519	1,43	165,72



8. ábra. A termokémiaileg kezelt csatlakozók mechanikai feldolgozásának anyagáram-anyagmérleg diagramja

Látható, hogy az így létrehozott koncentrátum már jelentős, 1,43 g/kg aranykoncentráció-értékkel rendelkezik. A fémkoncentrátum metallicitása nagy, tehát kémiai-metallurgiai hasznosításra alkalmas nyersanyagnak tekinthető. Szemben a műanyag csatlakozók feldolgozásával, a meddő anyag tömege viszonylag kicsi, csupán 211 kg.

Fontos azonban megvizsgálni, hogy mi a maradványanyag összetétele, hiszen a deponálás helyetti hasznosítás mind környezetvédelmi, mind pedig gazdasági szempontból is preferált. A 3. táblázat mutatja a porfrakció összetételét.

3. táblázat. Az 1 mm alatti szitafrakció kémiai összetétele

Elem/Vegyület	m/m %	Meghatározás módja
Nedvességtartalom (H ₂ O)	1,34	Szárítás (105 °C)
C	30,58	Izzítás (800 °C)
Cu	4,95	XRF
Zn	3,25	XRF
Ni	0,00	XRF
Fe	1,28	XRF
Sn	0,46	XRF
Al	5,54	XRF
Si	22,75	XRF
S	0,05	XRF
K	0,49	XRF
Ca	24,21	XRF
Ti	3,85	XRF

Az anyag nedvességtartalma kicsi, karbontartalma viszont jelentős. Látható továbbá, hogy a C mellett a fő alkotók a Ca és a Si, utóbbiak valószínűleg CaO, SiO₂ és CaSiO₃ formájában vannak jelen. Mivel a kohászati folyamatokban a leggyakrabban alkalmazott redukálószer a karbon, a leggyakoribb salakképzők pedig a CaO és SiO₂, az anyag a fémelőállító iparban hasznosíthatónak tűnik [14]. Noha a viszonylag nagy réztartalom valamelyest korlátozza a por vaskohászati célokra való felhasználását, a vas- és acélgyártási volumeneket figyelembe véve szinte eltörpül ennek az anyagnak a mennyisége, így megfelelő mennyiségben bekeverhető a vaskohászati betétanyagokba, akár a nagyolvasztó vagy elektroacél-gyártó ívkemence elegyébe [15]. Ugyanakkor a fémkohászati oxidos anyagok (mint például rézos hulladékok) karbotermikus redukációjához is hasznos alapanyag lehet, amennyiben kvarcos pótlékkal megfelelően be van állítva a salak bázicitása [16].

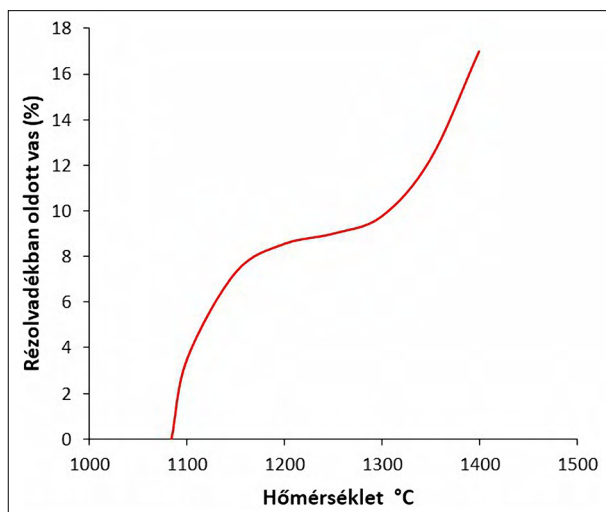
Saját kísérletekkel is igazoltuk, hogy a porfrakció hatékony lehet ipari réz-oxid vagy oxidos ónsalakok karbotermikus redukációjára, amennyiben a karbon-salakfolyósító-hulladékpor arány megfelelően be van állítva. Így elmondható, hogy a porfrakció nem hulladék, hanem hasznosítható termék.

4. Fémkoncentrátum pirometallurgiai hasznosítása

A koncentrátum közvetlen hidrometallurgiai úton történő aranyvisszanyerésre nem alkalmas, hiszen a nagy tömegű vasas fémátrix szolubilizációja jelentős mennyiségű hulladékoldat keletkezésével járna. További hátrány a réz értékének elvesztése, mivel a nagy vastartalom miatt a réz katódos redukciója nem lehet hatékony. A pirometallurgiai feldolgozás azonban perspektivikus opció, hiszen a fémeket feloldó olvasztás is hatékony szolubilizációs módszer. Savas oldatok alkalmazása helyett a rézolvadék jó oldószer lehet, ugyanis az arany és a réz – az olvadáspontok felett – korlátlanul elegyednek egymással. Ebben az esetben az olvasztás terméke egy rézbázisú nemesfém ötvözet, amely hatékonyan visszajártható a klasszikus oxigénkonverteres és elektrolitikus raffináláson alapuló kohászati vertikumokba. Noha az arany rézolvadékban jól oldódik, figyelembe kell venni, hogy a koncentrátum jelentős mennyiségű vasat tartalmaz, és az arany egy része a vasötvözetben oldott állapotban van jelen. Ezért első lépés a vas oldhatóságának vizsgálata volt, amelyet a FactSage program segítségével számítottuk ki. Az eredmények a 9. ábrán láthatók.

A fémkohászatban gyakran alkalmazott tűzálló anyagokat is figyelembe véve az optimális olvasztási hőmérséklet-tartomány az 1200–1300 °C. Ebben a tartományban 8–10% Fe képes oldódni a rézolvadékban. Figyelembe véve az említett tényezőket, az olvasztási hőfokot 1250 °C-nak választottuk meg. A rézbázist 99% tiszta finomítási rézgranulátum adta, ehhez lett hozzáadva a fémkoncentrátum. Ezek alapján szükséges volt olyan kísérleteket végezni, amelyekkel meghatározhatjuk a rézgranuláthoz – még jó aranykihozattal adó – maximálisan adagolható fémkoncentrátum mennyiségét. Az olvasztást indukciós kemencében végeztük a gyors, lényegében oxidációmentes hatékony beolvasztás érdekében. Először az olvasztással nyert öntecsek kémiai összetételét vizsgáltuk meg, ez látható a 4. táblázatban.

Noha az aranykoncentráció folyamatos növekedést mutat nagyobb fémkoncentrátum mennyiségek hozzáadása mellett is, megfigyelhető, hogy 29,08%-nál több anyag beadása esetén már nem lineráris a növekedés. Ez igaz a vaskoncentrációra is. Tehát feltételezhető, hogy a vasoldódás nem hatékony, így az aranyhozam is csökken. Ezt támasztja alá a 10. ábrán



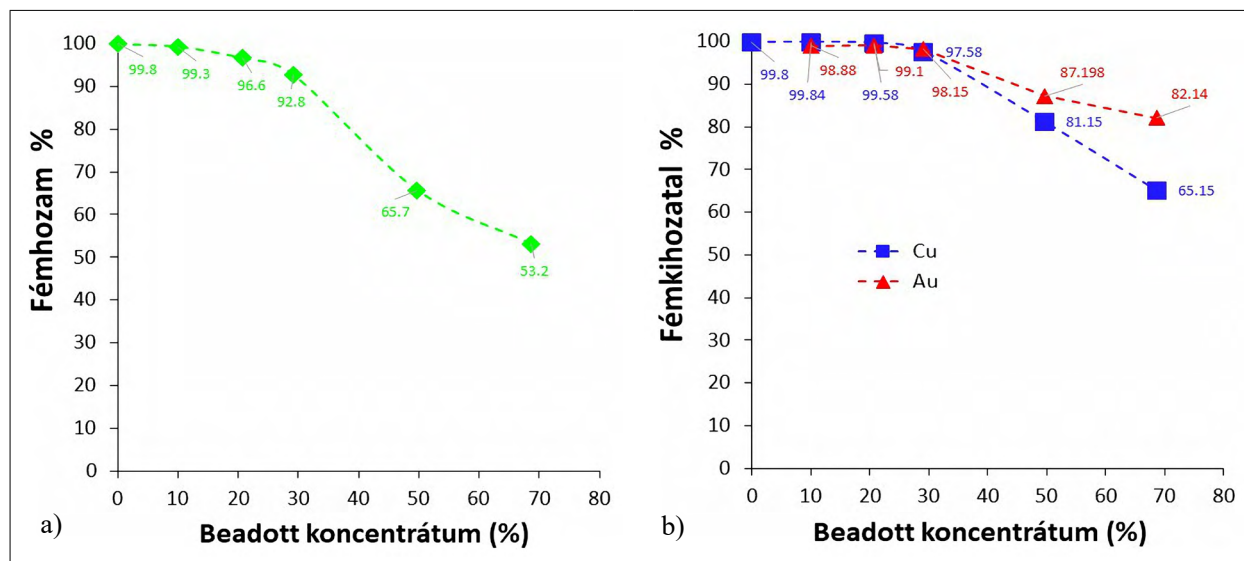
9. ábra. A vas oldhatósága a réz tőzzel folyó oldatában a hőmérséklet függvényében

látható fémhozamvizsgálat eredménye is. Továbbá a csatlakozókból származó arany és réz kihozatalai is egyaránt drasztikus csökkenést mutatnak, amikor már több mint 30% koncentrátum került a rézgranáliához.

Noha a 9. ábra alapján a 4% oldott vaskoncentráció önmagában nem indokolja a kihozatal csökkenését, az egyéb szennyező elemek miatt a vas oldhatósága kisebb lehet, mint a tisztán Cu-Fe rendszerben elérhető egyensúlyi koncentrációk. Ahogy a részoldadék telítődik vassal, az aranytartalmú vasötözet érintkezők felületén kialakulhat egy rézdús intermetallikus vegyülettéteg, amely héjként akadályozza az egyéb elemek oldódását. Noha ilyen magas hőmérsékleten az aranydiffúzió jelentős sebességgel lehet képes akár a szilárd anyagból is az oldadékba szállítani a nemesfémeket, a folyékony fázis nagy aranykoncentrációja csökkentheti a folyamat termodinamikai hajtóerejét. Ugyanezen a hőmérsékleten króm-réz intermetallikus vegyület képződésével nem kell számolni, a jelentős krómkoncentráció hátrányos lehet, mivel csökkentheti az adott hőmérsékleten beoldható vasmennyiséget, illetve a részoldadékba való lassabb oldódása is kinetikai gátat szabhat. Ezenfelül a koncentrátumban található az elszenesedett vázból is. Megfigyelés alapján elmondható, hogy ezt a szén-kerámikus vázat a részoldadék viszonylag rosszul nedvesíti, illetve folyó-

4. táblázat. A fémkoncentrátum rézgranáliával való összeolvasztása során nyert öntecsek kémiai összetételei

Elem	Beadagolt koncentrátum (%)					
	0	9,92	20,66	29,08	49,66	68,62
	Koncentráció, g/kg					
Cu	>999	966	956	944	925,8	921,1
Au	<0,01	0,096	0,172	2,58	0,324	0,357
Fe	<0,01	14,3	20,3	30,7	38,4	41
Zn	<0,01	10,5	13,5	16	31,1	39
Sn	<0,01	0,481	1,95	2,04	2,24	3,24
Cr	<0,01	0,89	1,87	2,71	3,01	3,11
Mn	<0,01	0,18	0,3	0,6	0,978	1,24



10. ábra. A koncentrátum teljes olvasztási fémhozama (a), valamint arany- és rézkihozatalai (b)

sító pótlékok hiányában 1250 °C-on csupán sűrű viszkózus masszát és nem az olvasztási folyamatoknak kedvező híg folyós salakolvadékat alkot. Így a salakban lévő kis fémcseppek nem képesek a fémfürdőbe kerülni, ami szintén negatív hatással lehet az olvasztási kihozatalokra.

Ezek alapján megállapítható, hogy az elegyben maximum 29% koncentrációt-hozzáadás esetén a fémhozam és az aranykihozatal is kedvező. Az olvasztási idő növelésével és folyékony salakfázis alkalmazásával a maximálisan hozzáadható koncentrációt mennyisége valószínűleg jelentős mértékben megnövelhető, azonban ez további kísérletek elvégzését igényli.

5. Összefoglalás

Mivel a gyártásból kikerült selejtes autóiipari csatlakozók egy tonna anyagra vonatkoztatva 180,9 g aranyat és 75,14 kg rezet tartalmaznak, ezért értékes másodnyersanyagnak tekinthetők. Azonban a nemesfém tartalmú tüket tömegarányosan nagy mennyiségű műanyag ház veszi körül, így nem alkalmasak közvetlenül kohászati feldolgozásra. Ezért először mechanikai előkészítéssel szükséges a műanyag és egyéb – a metallurgiai műveleteket akadályozó – anyagok elválasztása az értékes fém komponensek mellől, így előállítva egy fémkoncentrátumot. Két módszer alkalmazását vizsgáltuk meg. Az első esetben a csatlakozókat 20 mm-es szitabetéttel ellátott kalapácsos shredderben aprítottuk, majd ezután mágneses szeparálással választottuk el a műanyagot az aranytartalmú érintkező tüktől. Így a mágneses termék tömegkihozatala 11,07%, az aranykihozatala pedig 97,2% volt. A második módszer esetében termokémiai kezelésen átesett anyaggal történtek az eljárástechnikai vizsgálatok. Ebben az esetben a csatlakozókat 15 mm-es résméretre beállított pófás törőben előaprítottuk, majd golyósmalomban őröltük. Az őrléményt szitasorral osztályoztuk. Az eredmények alapján az anyagot 1 mm-nél optimális elválasztani, így a fémkoncentrátum aranykihozatala 99,4% míg a rézkihozatala 86,86% volt. Az így kapott fémkoncentrátum pirometallurgiai hasznosítását fémeket feloldó olvasztással vizsgáltuk meg. A rézolvadék tömegéhez viszonyítva a maximum 29%-ban hozzáadott koncentrátum esetében az arany kihozatala 98,15% volt. Nagyobb mennyiségek beolvasztása során már lényegesen kisebb kihozatal volt elérhető.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton köszönik meg a mechanikai előkészítésben nyújtott segítséget dr. Mádainé dr. Üveges Valériának, a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar docensének. Továbbá há-

lával tartoznak a Miskolci Egyetem Fémelőállítási és Öntészeti Intézetéhez tartozó Extrakciós Hidro-elektrometallurgiai Labor vezetőjének, prof. dr. Kékési Tamásnak.

Irodalom

- [1] M. Bigum, L. Brogaard, T. H. Cristensen: Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 207–208 (2012) 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.001>
- [2] M. D. Rao, K. K. Singh, C. A. Morrison, J. B. Love: Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste. *RSC Adv.*, Issue 8 (2020) 4300–4309. <https://doi.org/10.1039/C9RA07607G>
- [3] H. Kumar, S. Kumagai, Y. Saito, T. Yoshioka: Latest trends and challenges in PVC and copper recovery technologies for End-of-Life thin cables. *Waste Management*, 174 (2024) 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.012>
- [4] J. P. Sykes, S. Ulrich, M. Kanakis, D. I. Groves, S. Hagemann, A. Trench: Is grade king in gold? A preliminary analysis of gold production cost at Australian and New Zealand mines. In: *AusIMM New Zealand Branch Conference*, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34082.43200>
- [5] M. D. Adams: Overview of the gold mining industry and major gold deposits. In: *Gold Ore Processing*, New York, Elsevier, 2016, pp. 25–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00002-5>
- [6] G. Calvo, G. Mudd, A. Valero, A. Valero: Decreasing ore grades in global metallic mining: A theoretical issue or a global reality. *Resources*, 5/4 (2016) 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>
- [7] Resources and technology: World copper resources. <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8808/880807.PDF>
- [8] A. Cesaro, A. Marra, K. Kuchta, V. Belgiorio, E. D. van Hullebusch: WEEE management in a circular economy perspective: An overview. *Global NEST Journal*, 20/4, (2018) 743–750. <https://doi.org/10.30955/gnj.002623>
- [9] M. S. Sodhi, B. Reimer: Models for recycling electronics end-of-life products. *QR Spectrum*, 23/1, (2001) 97–115. <https://doi.org/10.1007/PL00013347>
- [10] C. Hagelüken, C. Corti: Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through ‘Design for Recycling’. *Gold Bulletin*, 43/3 (2010) 209–220. <https://doi.org/10.1007/BF03214988>
- [11] M. Takano, S. Asano, M. Goto: Recovery of nickel, cobalt and rare-earth elements from spent nickel-metal-hydride battery: Laboratory tests and pilot trials. *Hydrometallurgy*, 209/1 (2022) 105826. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105826>
- [12] London Metal Exchange: <http://www.lme.com>
- [13] Goldprice: <http://www.goldprice.org>.
- [14] F. Ottó: *Nyersvas-metallurgia*, Budapest: Tankönyvkiadó, 1989.
- [15] S. László: *Elektroacél-gyártás*. Budapest: Magyar Vas- és Acélipari Egyesülés, 1990.
- [16] M. E. Schlesinger, K. C. Sole, W. G. Davenport, G. R. F. Alvear Flores: *Extractive Metallurgy of Copper*. New York: Elsevier, 2011. ISBN: 9780128219034