

szintszabályozó állítja be a fémszintet, ezáltal a tömb súlyát.

4.3.2. *Hűtőlánc:* A lánc kokillait recirkuláltatott víz hűti, a felszint pedig levegősugár.

4.3.3. *Másodlagos hűtőlánc:* A kokillákból a fémet egy kalapácsos mechanika üríti ki a lánc végén, a tömbök egy újabb hűtőláncon folytatják útjukat, ahol közvetlen vízpermet szobahőmérséklet közelébe hűti őket.

4.3.4. *Rakásoló robot:* a Robotec megoldásában, Fanuc-gyártmányú robot válogatja és rakásolja a tömböket a kívánt rakatformára és súlyra. A robothoz kapcsolódó automata mérleg mérlegeli és címkézi a rakatokat.

4.3.5. *Automata pántoló:* Az összerakott és címkézett rakatokat az automata pántoló műanyag szalaggal rögzíti (4. ábra).

## 5. Kapacitások, piacok

Az olvasztómű termékei a nagyon rövid próbaidőszak alatt eljutottak és elfogadottá váltak a magyar alumínium formaöntődéknél, ahova a tervezett kapacitásának 60%-át kívánja értékesíteni a forgalmazó. Csaknem valamennyi nagyobb magyar alumínium formaöntőde mellett cseh, német, osztrák, szlovén, horvát, szerb és román vevőkhöz is szállított eddig a forgalmazó Martin Metals Kft. Három hazai és három külföldi cég auditálta eddig a Martin Metals, az Inotal és az

Alumelt minőségbiztosítási rendszereit.

Az olvasztómű próbaüzemének lezárása után a tervezett teljes kapacitás (a felhasznált alapanyagoktól függően változhat) elérheti a 15 000 t éves mennyiséget.

A vásárolt, hulladékokból történő termelés és értékesítés mellett az üzemeltetők folyamatosan tárgyalnak a vevőkkel létesíthető zártkörű (closed loop) hulladék-újrahasznosítási konstrukciókról is.

Az inotai üzem bizonyítja, hogy a magyar alumíniumipar az őt ért sok kellemetlenség ellenére képes megújulásra. Újabb 35 embernek biztosít megélhetést, és öregbítheti a magyar alumíniumkohászat hírnevét.

MIKÓ TAMÁS

# Zömítővizsgálatok Al1370 alumíniumon

*A fémek alakváltozási tulajdonságainak laboratóriumi körülmények közötti tanulmányozásához olyan vizsgálati módszer és mérési összeállítás szükséges, amely segítségével az anyag viselkedését, az azt befolyásoló paraméterek (A, T,  $\dot{\varphi}$ ,  $\varphi$ ) széles tartományában, a külső zajoktól mentesen tudjuk vizsgálni. Standard mechanikai anyagvizsgáló berendezésre alapozva összeállítottam egy termomechanikus szimulátort, mely segítségével különböző alumíniumötvözeteken széles hőmérséklet-tartományban végeztem el egy-, illetve egymást követő többszöri zömítéseket. A cikk megírásának az volt a célja, hogy összefoglaljam az Al1370 alumíniumon elvégzett eddigi vizsgálataim eredményét.*

## 1. Bevezetés

A kristályos fémek alakváltozó képességét az anyagra ható külső és belső körülmények egyaránt befolyásolják. Ilyen az alakítás hőmérséklete (T), az alakváltozás mértéke ( $\varphi$ ), illetve annak sebessége ( $\dot{\varphi}$ ), valamint az alakítandó anyag tulajdonságai (A), jelen esetben annak technológiai előélete [1, 2].

$$\sigma = f(A, T, \dot{\varphi}, \varphi)$$

Ezek összessége határozza meg azt a rugalmas és képlékeny alakváltozó viselkedést, ahogyan az anyag a rá ható külső terhelésre válaszol.

Ahhoz hogy ipari méretekben képesek legyünk a kívánt geometriájú és mechanikai tulajdonságú félkész-, illetve késztermékeink előállításának megtervezésére és tudatos elvégzésére, ismernünk kell ezen összetett függvény paramétereinek egyesített hatását. Erre szolgál a folyásgörbék felvétele, azaz a valódi feszültség–valódi alakváltozás függvényének meghatározása állandó alakváltozási sebességgel, állandó hőmérsékleten, valamint egytengelyű feszültségállapot mellett [3].

Az anyag mikroszerkezetében végbemenő változások és az említett folyásgörbék között szoros kapcsolat áll fenn. Fontos tehát, hogy a kapott

görbe valóban a vizsgálni kívánt körülmények hatását tükrözze, és ne pedig a mérési hibák hatását. Utóbbira példa az 5. ábrán látható 100 és 200 °C-os hőmérsékletre tartozó folyásgörbék esete, ahol a hőmérséklet alakítás közbeni  $\pm 5$  °C-os ingadozása eredményezte a görbék hullámos jellegét.

A folyásgörbék laboratóriumi körülmények közötti felvételének egyik legegyszerűbb megoldása a zömítővizsgálat elvégzése.

## 2. Vizsgálóberendezés és vizsgált anyag

### 2.1. Vizsgált anyag

Az elmúlt közel egy év alatt, különböző alumíniumötvözetek folyási viselkedését (5182, 3003, 8006, 7075, Al59, 6101) vizsgáltam. Ezek közül most az ipari tisztaságú, Properzi-eljárással H14-es keménységre hengerelt Al1370-es anyagon elvégzett zömítővizsgálat eredményeit foglalom össze. A vizsgált anyag szennyezőtartalmát az 1. táblázat tartalmazza.

Az 1. táblázatban szereplő szennyezőket tartalmazó alumíniumot vizsgáltam eredeti H14-es, illetve

**1. táblázat.** A vizsgált alumínium szennyezőtartalma

Anyagminőség	Szennyezőtartalom %-ban				
	Mg	Mn	Si	Fe	Cu
Al1370	0,02	0,01	0,1	0,25	0,02

lágított állapotában (400 °C, 1 óra). A szobahőmérsékletű vizsgálatok során hat egymást követő alakítást alkalmaztam ugyanazon a darabon, az alakítások között különböző időközökkel (0, 30, 60, 300, 600 és 1200 s) a minta tehermentesített állapotában. Ezt követően azt vizsgáltam, hogy az alakítás hőmérsékletének emelésével (100 és 500 °C között) hogyan változik az anyag folyási viselkedése a kemény, illetve lágított kiinduló állapot esetében. Az emelt hőmérsékletű vizsgálatokat megelőzően egységesen 5 perces hőntartást alkalmaztam a vizsgálati hőmérsékleten.

## 2.2. Mérési összeállítás és eljárás

A melegzömítő vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer két fő eleme a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán található Instron 5982-es univerzális anyagvizsgáló berendezés, és egy 5 kW-os Eurotherm hőmérséklet-szabályozóval ellátott indukciós hevítő berendezés. A mérési összeállítás megtervezése során az volt a céлом, hogy lehetővé tegyem a darab hőmérsékletének gyors megváltoztatását.

A szobahőmérsékletű vizsgálatokhoz acél nyomószerszámot, míg az emelt hőmérsékletek esetén alumínium-oxid kerámiát használtam. A vizsgálatokat az adott hőmérsékleteken állandó alakváltozási sebességre szabályozva végeztem. Ehhez finomnyúlásmérő segítségével mértem a darab magasságcsökkenését. Az állandó valódi alakváltozási sebességre való szabályozás lényege az, hogy az alakváltozás mértéke az alakítás során azonos, miközben azt nem a kezdeti  $H_0$  magasságra, hanem a pillanatnyi  $H$  magasságra vonatkoztatjuk. Ennek értéke az elvégzett vizsgálatok esetében egységesen  $0,01 \text{ s}^{-1}$  volt.

A hordósodásmentes alakváltozást a Rastegaev-típusú próbatest

geometria, és teflon kenőanyag használta tette lehetővé a  $H_0=15 \text{ mm}$ ;  $D_0=10 \text{ mm}$  kiinduló méretű hengeres próbák zömítése során. A darabok hőmérsékletét azok oldalába helyezett furatban

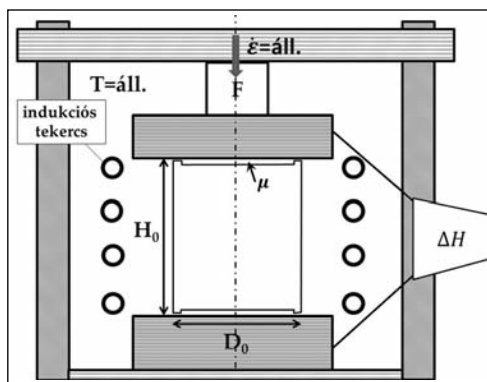
rögzített K-típusú hőelem segítségével mértem.

## 3. Eredmények

### 3.1. A várakozási idő hatása a szobahőmérsékletű, egymást követő zömítések során

Az iparban néhány esettől eltekintve, egymást követő alakítások (szűrások) segítségével érik el a kívánt geometriát, illetve anyagi tulajdonságokat. Ezen műveletek között egyes esetekben (pl. huzalhúzás) feszültség alatt, más esetekben pedig (pl. hengerlés) feszültségmentes állapotban tartózkodik az anyag. Ennek szimulálására olyan mérési eljárást dolgoztam ki, mely során az egymást követő tetszőleges számú alakítás között különböző mértékű visszaterhelés, illetve teljes leterhelés alkalmazható. Az egyes alakítások nagyságai és sebességei valamint az alakítási hőmérséklet pedig külön-külön előre programozható.

A szobahőmérsékleten elvégzett zömítések során azt tapasztaltam, hogy ha az egyes alakítások között teljesen tehermentesített állapotban növeltem a várakozási időt, akkor az alkalmazott alakítások számával, illetve mértékével az előző alakítások utolsó pillanatában mért feszültségértékéhez képest egyre kisebb feszültség szinten folytatódik a képlékeny folyás.



■ 1. ábra. Mérési összeállítás

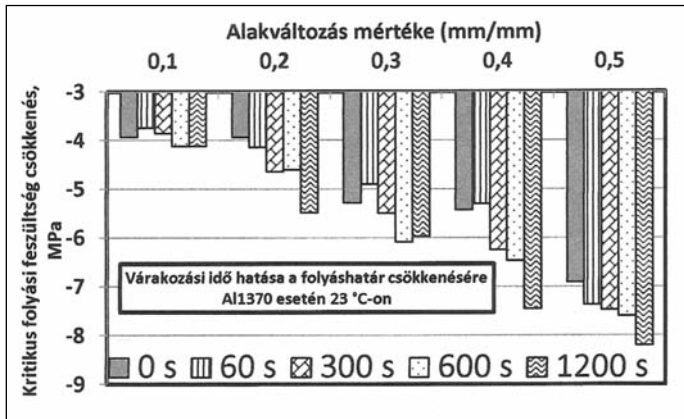
A jelenség mértékének kvantitatív leírásához meg kellett határoznom a rugalmas-képlékeny viselkedés átmenetéhez tartozó kritikus feszültségértéket. Az egyezményes folyáshatár ( $R_{p02}$ ) alkalmazása ebben az esetben nem jellemzi megfelelően a folyás megindulásának pillanatát. Ennek oka, hogy egy frissen alakított anyag rugalmas viselkedése hirtelen, jóval kisebb átmeneti szakasz után vált át képlékeny alakváltozásba. Munkám során a görbe rugalmas, valamint képlékeny szakaszaira egyeneseket illesztettem. Ezen egyenesek egyenleteit egymással egyenlővé téve megkaptam a metszéspontjukat, amiknek a görbére vetített értéke meghatározta a folyásgörbe rugalmas szakaszának végét. Ezt az értéket vontam ki az előző alakítás során mért maximális feszültségértékből, megkapva a folyási feszültség visszacsökkenésének mértékét. A bemutatott eljárást a vizsgáló berendezés szoftverébe integráltam, így a vizsgálatokat követően azonnal hozzájuttattam a szükséges eredményekhez. Az így kapott eredményekből megállapítottam, hogy az alakítás mértéke, valamint az alakítások között eltelt idő egyaránt jelentősen növeli a folyáshatár csökkenésének abszolút mértékét (2. ábra).

Az anyag zömítései között eltelt idő növelésével nő a rugalmas hiszterézis-hurok nagysága. A 3. ábrán az utolsó (6.) zömítés esete látható két különböző hosszúságú várakozási idő esetén.

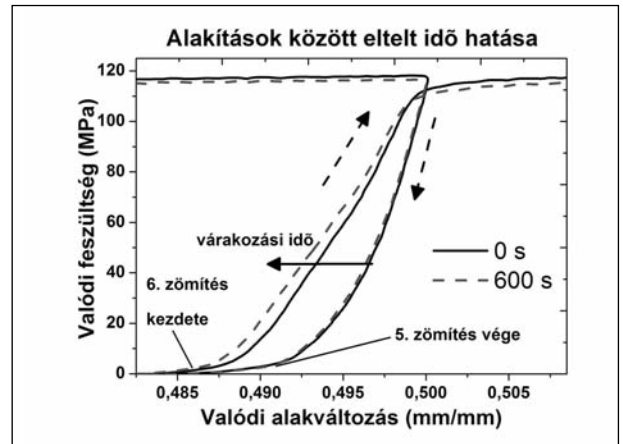
Minél nagyobb a hurok területe, annál több energia disszipálódik a rendszerből. A hosszabb várakozás esetén az alakváltozás kezdete egyre kisebb alakváltozási értékről folytatódik. Ez annak a következménye, hogy a leterhelés befejeződésének pillanatában nem nyerte meg el az anyag a végleges méretét, ugyanis a rendszernek időre van szüksége, hogy az új feltételeknek megfelelően megváltoztassa az alakját [4, 5].

### 3.2. Hőmérséklet hatása a folyási viselkedésre az anyag különböző kiinduló állapotai esetén

A hőmérséklet növelésével a megújulásnak köszönhetően a kemé-



■ 2. ábra. Az egyes alakítások között leterhelt állapotban telt várakozási idő hatása az előzetes alakítás maximális feszültségéhez képesti folyáshatár csökkenésére kilágyított Al1370 anyagon (23 °C, 0,01 s<sup>-1</sup>)



■ 3. ábra. Várakozási idők hatása az újbóli alakítás során mért folyási feszültségre szobahőmérsékleten Al1370 anyagon 0,5 mm/mm előzetes alakítás esetén

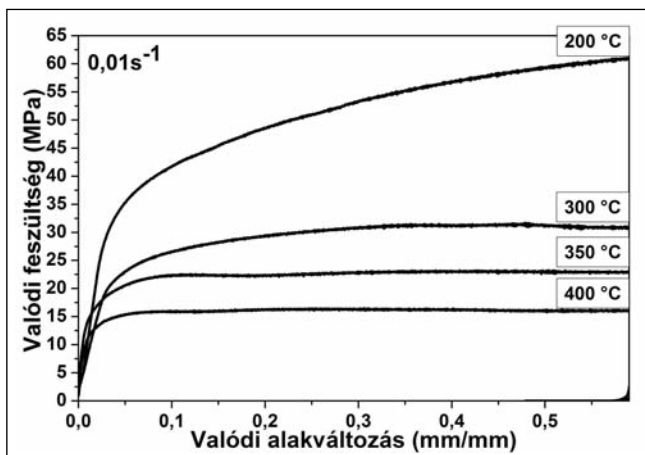
nyedést fokozatosan megszünteti az alakítás közbeni lágyulás hatása. A lágyított kiinduló állapotú anyag „egylépcsős” melegzömítő görbéi konvencionális jellegűek (4. ábra). Jól látható, hogy 200 °C-on az alakítás teljes folyamata során még a keményedés az uralkodó folyamat. 300 °C-on hozzávetőleg 0,3 mm/mm alakváltozás után azonban már beáll egy állandó feszültségszintre a görbe. A hőmérséklet további emelésével a kritikus folyási feszültség folyamatos csökkenése mellett pedig az állandósult szakasz kezdete mindinkább a kisebb alakváltozási értékek irányába tolódik el.

Ezzel szemben a H14-es kiinduló állapot esetében, egy érdekes jelenséget figyelhetünk meg a 200 és 350 °C közötti hőmérséklet-tartományban (5. ábra). Ekkor ugyanis a valódi feszültség az alakítás közben erőteljesen csökken a rugalmassági határ átlépését követően. Az említett hő-

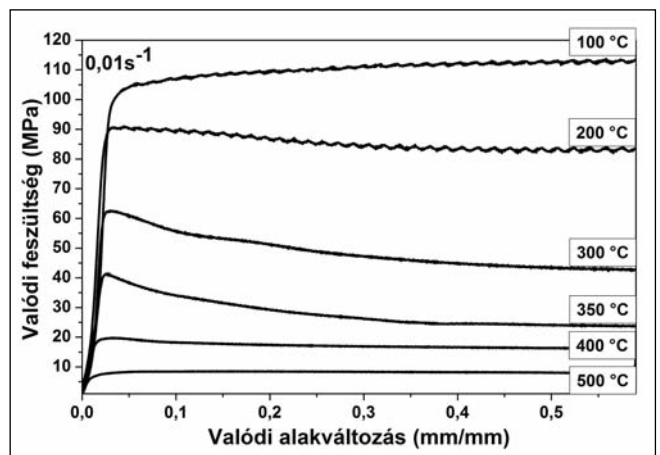
mérséklettartomány alatt, illetve fölött az anyag a kilágyított állapotnál tapasztalt módon viselkedik.

A bemutatott folyási viselkedés azért lehet talán kevésbé ismert, mivel a gyakorlatban ritka, hogy egy már hidegen alakított anyagot melegen alakítunk tovább. A jelenség okát az anyag nem egyensúlyi diszlokációsűrűségével magyarázhatjuk. A H14-es kiinduló állapot esetén az anyag egy viszonylag nagy kiindulási diszlokációsűrűséggel rendelkezik. Az alakítási hőmérséklet növelésével, az anyagban egyensúlyban lévő diszlokációsűrűség értéke folyamatosan csökken. Mindaddig a hőmérsékletig, amíg az anyag diszlokációsűrűsége alatta van ezen adott hőmérsékletre jellemző egyensúlyi értéknek, további diszlokációképződést, azaz alakítási keményedést tapasztalhatunk a folyásgörbén. A görbék alapján megállapítható, hogy 200 °C-on már a telí-

tési diszlokációsűrűség kisebb, mint kiindulási állapotra jellemző érték, ezért szükségszerűen ennek le kell csökkennie az egyensúlyi szintre. Ha az alakítás hőmérséklete, illetve az alakítást megelőző hőntartás ideje nem volt elég a statikus jellegű átrendeződés befejeződéséhez, akkor annak az alakítás során kell végbemennie. Ennek módja a dinamikus megújulás. A folyási feszültség csökkenése addig tart, amíg a rendszer el nem éri a telítési állapotot. A telítési állapot alatt azon körülmények eredőjét értjük, mely esetén az anyag további alakítása már nem jár keményedéssel, azaz diszlokációsűrűség növekedéssel. Ekkor a befektetett munka teljes egészében az alakváltozásra fordítódik, az energia hővé alakul. A folyásgörbe vízszintes szakaszának kezdete jelenti tehát ilyen értelemben az előzetes diszlokációs szerkezet átrendeződésének végét [6].



■ 4. ábra. Lágyított kiinduló állapotú Al1370 folyásgörbéi különböző hőmérsékleten 0,01 s<sup>-1</sup> állandó alakváltozási sebesség esetén



■ 5. ábra. Hidegen alakított kiinduló állapotú Al1370 folyásgörbéi különböző hőmérsékleten 0,01 s<sup>-1</sup> állandó alakváltozási sebesség esetén

Minél magasabb hőmérsékleten végezzük a zömítést (adott előzetes hőntartási idő esetén), annál gyorsabb a megújulás folyamata. Így az egyensúlyi állapot már az egyre kisebb alakváltozási értékeknél képes beállni. Tehát 500 °C-on azért nem tapasztalhatunk a görbén feszültségcsökkenést, mert ezen a hőmérsékleten a megújulás olyan gyors, hogy már a felmelegítés során jelentős mértékben végbement a statikus megújulás folyamata. Ennek következtében a képlékeny alakváltozás kezdetére kialakult az adott hőmérsékletre jellemző (egyensúlyi) diszlokációsűrűség, így pedig a zömítés során az alakváltozás gyakorlatilag állandó feszültség szinten ment végbe.

#### 4. Összefoglalás

A széles hőmérséklettartományban alkalmazható egy-, illetve többlépcsős alakításokhoz kialakított berendezés segítségével megvizsgáltam az Al1370-es alumínium alakváltozó tulajdonságaira vonatkozóan az alakítások között eltelt időnek, az alakítás hőmérsékletének, illetve a kiinduló állapotnak a hatását. Ezek során két folyási jelenséget tapasztaltam.

Abban az esetben, ha a szobahőmérsékletű alakítások között az anyag tehermentesített állapotában növeljük az egymást követő alakítá-

sok között eltelt ún. várakozási időt (t), úgy a következő alakításnál az előző alakítás végén mért értékhez képest kisebb feszültség szinten folytatódik a képlékeny folyás. Ez az anyagban végbemenő feszültségrelaxációnak, illetve az anelasztikus viselkedésnek a következménye. Az alakíttóság mértékének és a várakozási idő hosszának növelésével ezen csökkenés abszolút értéke egyre nagyobb lesz.

Az alakítási hőmérsékletet (T) és az anyagi tulajdonságot (A) illetően kapcsolatot állapítottam meg. Ha az anyagban a melegzömítés kezdetén a kiinduló diszlokációsűrűség nagyobb, mint az adott alakítási hőmérsékletre jellemző egyensúlyi érték, akkor a folyáshatár után feszültségcsökkenés tapasztalható. Ez a csökkenés addig az alakítási mértékig tart (telítési állapot), amíg ki nem alakul az adott hőmérsékletre jellemző egyensúlyi állapot. Méréseim alapján a H14-es kiinduló anyag alakváltozó tulajdonságát 200 és 350 °C között jellemzi leginkább ez a jellegű viselkedés.

A fenti eredmények mutatják, hogy az elkészített berendezés alkalmas komplex alakítási folyamatok fizikai szimulációjára, illetve pontos körülmények között történő vizsgálatok elvégzésére nemcsak ötvözetlen alumíniumon, hanem tetszőleges ötvözetben is.

#### 5. Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Alkalmazott Anyagtudomány és Nanotechnológia Kiválósági Központ keretében valósult meg.

Köszönettel tartozom *dr. Gubicza Jenő* professzornak, a vizsgált jelenség magyarázatához nyújtott segítségéért.

#### Irodalom

- [1] *Voith M.*: A képlékenyalakítás elmélete. Miskolci Egyetemi Kiadó, (1998) Miskolc
- [2] *K. Lange*: Springer-Verlag, (1984) Berlin
- [3] *Prohászka J.*: A fémek és ötvözetek mechanikai tulajdonságai. Műegyetemi Kiadó, (2001) Budapest
- [4] *Kovács I., Zsoldos L.*: Diszlokációk és képlékeny alakváltozás. Műszaki könyvkiadó, (1965) Budapest
- [5] *Horváth L.*: Folyásgörbe meghatározás módszerei. (2005) Budapesti Műszaki Főiskola
- [6] *J. Gubicza et al.*: Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminium. Materials Science and Engineering (2004) pp. 55–59.

## A XVI. Fémkohász Szakmai Napról...

A Fémkohászati Szakosztály hagyományaihoz híven – az Egyetemi Osztállyal együttműködésben – november 13-án ismét megrendezte a Fémkohászati Szakmai Napot a Miskolci Egyetemen. A korábbi évek jól megszokott helyszínén technikai okok miatt változtatni kellett, ezúttal az A1 épület XXXII. előadója és keresztező folyosói adták a korábbinál kevésbé ideális helyszínt. A rendezvény koncepciója változatlan volt: az egyetem és az ipar kapcsolatának erősítése, illetve a hallgatók egyesületbe történő terelése. A rendezvény szokásosan szakmai konferenciával indult (1. kép). A levezető elnök ezúttal

*dr. Tolnay Lajos*, egyesületünk tiszteleti elnöke volt. Ünnepi megnyitó szavait követően *dr. Palotás Árpád Bence*, a Műszaki Anyagtudományi Kar dékánja a házigazda nevében



■ 1. kép. A konferencia hallgatósága

köszöntötte a hallgatóságot, majd ő tartotta az első szakmai előadást is „Lángdiagnosztikai kutatások” címmel. Ezt a sokak által várt ALCOA-Köfém előadás követte *dr. Kórodi István* és *Simon László* közös előadásában, amely tartalmában kissé eltért a meghirdetett címtől. A „Forgódobos kemencék alkalmazása alumíniumhulladék olvasztására az ALCOA-ban” cím alatt az előadás nagyobb része az alkalmazott alumíniumsalak feldolgozási technológiákat elemezte. Az egyre erősödő hazai ólom- és ónhulladék feldolgozás jegyében tartotta meg előadását a Metalloglobus Fémöntő és Kereskedelmi