

BUDAI DÁVID – TISZA MIKLÓS

Fejlesztési irányok az alumíniumkarosszéria-gyártásban

Az alumíniumkarosszéria-gyártás nem csupán a jelenlegi szigorú károsanyag-kibocsátási szabályozások és fogyasztáscsökkentési törekvések eredménye: már az előző évszázad közepétől kezdve megjelent az autógyártásban, mint a jövő technológiája. Az alumínium – az acéltól eltérő tulajdonságainak tulajdoníthatóan – számos korlátot jelent a gyártástechnológiában, amelyek feloldása folyamatos feladatokat szolgáltat az autóiipari kutatások számára. Ezeknek a fejlesztéseknek köszönhetően az alumíniumkarosszéria előállítása ma már nemcsak a prémium szegmensben, egyedi gyártás mellett gazdaságos, hanem a középkategóriás autók nagysorozat-gyártásánál is alkalmazható technológia lett. A következő évek, évtizedek feladata az, hogy növekedjen az alumíniumkarosszériát gyártó márkák száma, valamint hogy a technológia az alsó kategóriában is megjelenjen. Az alumínium alakíthatóságának növelése, és az alumíniumkarosszéria-gyártásnál alkalmazott kötéstechológiák fejlesztése kiemelt irányok a jelenlegi kutatásokban, amelyek sikeres ipari bevezetése a gyártási költségek csökkentését eredményezné, amely véglegesen elindíthatja az alumínium korszakot az autógyártás történetében. Az elmúlt évek kutatásai számos eredményt hoztak, amelyek összefoglalása és kiértékelése segít kijelölni az elkövetkező időszakok fejlesztési irányait.

1. Az alumíniumautók szerepe az EU környezetvédelmi törekvéseiben

Bolygónk átlaghőmérséklete folyamatosan nő, ami jelentős mértékben az emberi tevékenységekből származó üvegházhatású gázok kibocsátásának következménye. A napsugárzás energiája bejut a Föld légkörébe, és az így keletkező meleg eltávozását az üvegházhatású gázok akadályozzák. Az

így bekövetkező hőmérséklet-növekedés teljesen megváltoztatja bolygónk éghajlatát, következményei végzetesek lehetnek az emberiség számára. A megnövekedett hőmérséklet miatt a tengerszint emelkedik, árvizek és aszályok sújttják a régiókat. Időjárásunk teljesen szélsőségesé válik, amit az egyre többet előforduló természeti katasztrófák egyértelműen jeleznek. Ezek a folyamatok nem csak kör-

nyezetünkre és egészségünkre gyakorolnak káros hatást, hanem gazdaságunkra és mindennapi életünkre is. A közúti közlekedés az üvegházhatású gázok kibocsátásában az Európai Unió egyik legszennyezőbb ágazata. A kibocsátás csökkentése érdekében az EU rendeleteket hozott, amiben az új személygépkocsikra vonatkozóan határértékeket állapít meg. Az EU célja, hogy szigorítsa a kis teljesítményű közúti gépjárművek emisszióját, különösen a részecskék és a nitrogén-oxidok kibocsátása tekintetében. A rendelet a 2610 kg referenciatömeget meg nem haladó M1, M2, N1 és N2 kategóriájú járművekre alkalmazandó. Ide tartoznak többek között a külső gyújtású motorral (benzinmotor, földgáz- vagy PB-gázüzemű motor), illetve kompressziós gyújtású motorral (dízelmotor) felszerelt személygépjárművek, kisteherautók és személy- vagy áruszállításra szolgáló, illetve különleges rendeltetésű haszongépjárművek (pl. mentőjármű). A fenti járműveken kívül a gyártók kérhetik, hogy a rendelkezéseket a 2610 és 2840 kg közötti referenciatömegű, személy- vagy áruszállításra tervezett járművekre is kiterjessék. Személygépkocsiknál 2020-ra 95 g/km CO₂-kibocsátás értéket kell elérni az új autók 95%-ának, 2021-től pedig 100%-ának [1]. 2006-ban 160 g/km volt a kibocsátás érték, 2012-ben már csak 132 g/km. Az összefüggés a tömegcsökkentés és a CO₂-kibocsátás között meglehetősen komplex. Számítási módszertől függően 100 kg tömegcsökkentés hatására 3 g/km-től 13 g/km-ig terjedhet a kibocsátáscsökkentés [2]. Alumínium alkalmazásával az egyes alkatrészek tömege akár az eredeti tömeg 50%-a is lehet, ami jelentős tömegcsökkentést jelent típus-

Prof. dr. Tisza Miklós egyetemi tanár, a Miskolci Egyetem Anyagszerkezeti és Anyagtechnológiai Intézet Mechanikai Technológiai Tanszékének vezetője. Gépészmérnöki oklevelét 1972-ben az NME Gépészmérnöki Karán szerezte. 1995-től a Magyar Tudományos Akadémia doktora. Szakterülete az anyagtudomány és a képlékenyalakítás. Számos hazai és nemzetközi szervezet vezető tisztségviselője, pl. a Nemzetközi Lemezalkotó Világszövetség (IDDRG) elnökhelyettese, majd 1996 és 1998 között a világszervezet elnöke volt. 2002–2008 között az MTA Anyagtudományi és Technológiai Bizottságának elnöke. Több hazai és nemzetközi folyóirat szerkesztőbizottságának tagja.

Budai Dávid okl. gépészmérnök (2014 ME), az ME Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolában PhD-hallgató. Kutatómunkájának fő területe az alumíniumkarosszéria-gyártás technológiájának fejlesztése, az alumínium alakíthatóságának vizsgálata növelt hőmérsékleten. 2012 és 2013 között a Jaguar Land Rover – British Automotive Hungary Kft.-nél, 2013-ban a Musashi Hungary Manufacturing Kft.-nél volt gyakornok.

tól függően. Alumíniumkarosszéria alkalmazásával 30-40% lehet az egész autóra vonatkozó tömegcsökkenés, ami körülbelül 70 és 140 kg megtakarítást jelent típustól függően [6]. Az Európai Unióban jelenleg futó autókban átlagosan 140 kg alumínium található. A teljes alumíniumkarosszériás autóknál (Audi A8, Jaguar XJ, Range Rover) ez az érték 500 kg körül mozog [6]. Amennyiben az alumínium alkalmazásának terjedése a jelenlegi ütemben halad, akkor az átlagos alumíniumfelhasználás 180 kg-ot is elérhet 2020-ig. Jellemző, hogy az átlagon felüli alumíniumfelhasználással készülő autók a prémiumkategória termékei, azonban a jövőben az alumíniumkarosszéria a közép- és felső-közép kategóriában is megjelenhet, ami hozzásegíti a gyártókat a szükséges kibocsátási értékek eléréséhez. Az alumínium alkalmazásában rejlő lehetőségeket az alumínium autótanulmányok vizsgálják. Ezekben a vizsgálatokban egy adott autótípust újraterveznek olyan módon, hogy minden lehetséges helyen alumínium alkatrészeket alkalmaznak. Az eredeti referenciamodellhez képest így jól látható, hogy az alumíniumautók építésében milyen tömegcsökkentési lehetőségek vannak. Az aacheni egyetem egyik ilyen tanulmányában a referenciamodell egy 1229 kg tömegű kisméretű családi autó volt. Közvetlen tömegcsökkentéssel az autó tömege 928 kg lett, míg a közvetett tömegcsökkentési módszerek alkalmazása után 785 kg, ami 36%-os tömegcsökkenést jelent. Több tanulmányt vizsgálva megállapítottuk, hogy a teljes alumíniumkarosszéria alkalmazásával elérhető tömegcsökkenés körülbelül 40%-nál éri el a maximumot. Nagyszilárdságú acélok alkalmazásánál ez az érték 10-20%, mivel egy bizonyos minimum értéknél nem lehetnek kisebbek a falvastagságok, anélkül, hogy ne csökkenne az autó merevsége. Ezzel ellentétben alumínium alkalmazása esetén a korábbi acél alkatrészekre jellemző falvastagságoknál nagyobb falvastagságok szükségesek [4].

2. Az alumínium autóiipari alkalmazásának jelene és jövője

Az alumíniumautók történetében a Panhard Z1 volt az első, amelyet sorozatgyártásban készítettek. Ez az autó a mai besorolás szerinti EN AW-5754 (AlMg3) ötvözetből készült 1953-ban. Az autógyártás folyamatosan vizsgálta az alumíniumautók sorozatgyártásának megvalósíthatóságát. Az 1980-as évekig inkább csak technológiai különlegesség volt, mint sem valóság. A Porsche 1981-ben a frankfurti autószalonon kiállított egy elérhető acélkarosszériával készült 928-as típust, mellé pedig az alumíniumból készült példányt. A Porsche EN AW-6016 ötvözetet használt a kísérleti példány megépítésére, amely így 106 kg-mal volt könnyebb, mint a mellette álló hagyományos, acélalapú autó. Az alumínium használatával az autó karosszériája mindösszesen 161 kg volt. A kiállítás hatására az Audi is elkezdte az alumíniumautó projektjét. Az első általuk készített kísérleti autó egy Audi 100-as volt, teljes alumíniumkarosszériával. Az 1990-es évek elején az Alcan Aluminium Ltd. és a Ford közösen fejlesztették saját alumínium prototípusukat. Az együttműködésből készült Ford P2000 az EN AW-5754 ötvözetből készült, akárcsak a korábban említett Panhard Z1. A Ford technológiáját később átvette konszernen belül a Jaguar, amely az XJ220-as sportautó után kezdett kiemelten foglalkozni az alumínium használatával. Az Alcan és a Ford által kifejlesztett AVT technológiával készült Jaguar XJ-nél a külső lemezekhez EN AW-6111, a belső elemekhez pedig EN AW-5182 ötvözetet alkalmaztak. Ebben a típusban megjelent az EN AW-7108-T6 ötvözetből készült első és hátsó kereszttartó, valamint az EN AW-6082-T6 ötvözetből készült oldalmerevítő. A 2003 és 2009 között gyártott XJ-ben (X350) alkalmazott ötvözetek arányát az 1. ábra, míg az utódmodellben (X351) használtak arányát a 2. ábra mutatja be. A nagy sorozatban gyártott Jaguar XJ aktuális és elődmodelljében használt anyagcsoportok vizsgálatánál látható, hogy megduplázódott a 6XXX ötvözet használata, valamint megjelent az anyagok között a magnéziumötvözet. A 6XXX ötvözetek mennyiségének növekedését az eredményezte, hogy a fejlődő gyártástechnológia képes volt szerkezeti elemek gyártásánál is alakítani ezt az alapvetően viszonylag nagyszilárdságú ötvözetet.

A Jaguar Land Rover konszern másik márkájánál készülő Range Rover luxusterepjáró szintén teljesen alumíniumkarosszériával készült. A tetőburkolat az új fejlesztésű EN AW-6181A és 6451 ötvözetből készült. Ez az ötvözet nagyszilárdságú, és kiváló fényezhetőséggel rendelkezik emellett, hogy alakíthatóságát megőrzi. Az EN AW-6014 ötvözetet különösen az ütközési zónákban használják [7].

A Jaguar Land Rover mellett az Audi rendelkezik kiforrott, sorozatgyártásra alkalmas alumíniumautó-technológiával. Az Audi első sorozatgyártásba kerülő alumíniumautója az A8-as volt 1994-ben. Az Audi A8 sajtóvalással előállított elemei EN AW-6060 ötvözetből, külső lemezei EN AW-6016, belső lemezei EN AW-6009, strukturális elemei EN AW-5182, öntött elemei pedig A356 (7Si-0,3Mg) ötvözetből készültek. Az Audi következő lépése a kisméretű A2-es autó alumíniumkarosszériájának kifejlesztése volt. Az Audi ezzel a típussal kívánta megteremteni az első 3 liter/100 km fogyasztású autóját. A külső lemezek EN AW-6016, a szerkezeti részek EN AW-6181A, míg a többi elem EN AW-6014 ötvözetből készült. A következő generációs A8-ban már az A2-ben bevált EN AW-6181A ötvözetet használták a szerkezeti elemek gyártására. Az öntött alkatrészek GD-AISi10Mg, GD-AlMg3Mn és AISi7Mg ötvözetekből készültek.

A VW konszernhez tartozó Lamborghini megkapta az Audi alumíniumautó technológiáját, így a jelenlegi Lamborghini modellekben is az Audinál bevált ötvözeteket használják. Példaként, a Lamborghini Gallardo EN AW-6060 ötvözetet használ a préselt elemekhez, AISi7 ötvözetet az öntött alkatrészek gyártásához, míg a külső és belső panelekhez EN AW-6016 és EN AW-6181 ötvözeteket. A konszernen belüli technológiamegosztás kiváló példája az Audi R8 sportautó alumíniumkarosszériája, amelyet a Lamborghini tapasztalatai alapján alkottak meg. Az R8 karosszériája szinte teljesen az EN AW-6181A ötvözetből készült a megkövetelt nagyszilárdság érdekében. Az Audi A8 legújabb típusában az előzőekben tárgyalt ötvözeteket használták, de nőtt az EN AW-6181A ötvözet felhasznált mennyisége. Az Audi A8-ban felhasznált

alumíniumötvözetek az alábbiak szerint változtak:

- Audi A8 (D2): 7 ötvözet
szilárdsági tartomány: 100–200 MPa
- Audi A8 (D3): 10 ötvözet
szilárdsági tartomány: 120–240 MPa
- Audi A8 (D4): 13 ötvözet
szilárdsági tartomány: 120–280 MPa

A Jaguar Land Rover és az Audi sorozatgyártás számára készít alumíniumautókat, ami a folyamatok egyszerűsítését és a felhasznált anyagok számának csökkentését igényli. Ezzel szemben egy egyedi, vagy kissorozatban készülő autóban sokkal több ötvözetet használnak.

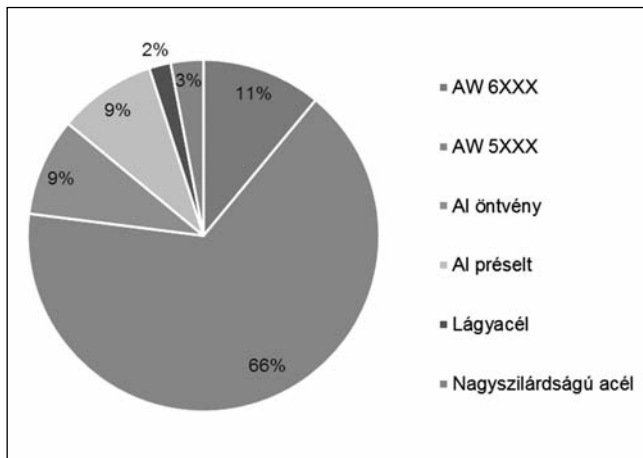
A Ferrari 548 Italia karosszériájában az öntött elemek C65K T7 (10% Si, 0,13% Fe, 0,60% Mn, 0,32% Mg, 0,02% Sr) és C611 T5 (AlSi7Mg) ötvözetből, az extrudált elemek 6082 T6, 6005 T6, 6260 T6, 6063 T6 és H0682 T6, míg a lemezek 6181A T6, 6082 T6 és 6022 T6 ötvözetekből készülnek. Ezek felhasználási területeit a 3. ábra szemlélteti [7].

A típus fejlődésével nőtt az alkalmazott ötvözetek száma és azok szilárdsági tartománya. Ez jól szemlélteti az alumíniumautó technológiájának fejlődését, valamint azt, hogy egyre több speciális alkalmazásra készült ötvözet talál helyet a típusokban, míg korábban csupán egy-egy ötvözetből készültek az alumíniumautók. A BMW konszern egyik alumíniumból készült autója a BMW Z8. A típushoz készült extrudált elemek EN AW-6060, 6063 és 6082 ötvözetből, míg a strukturális elemek EN AW-5754 és 5182 ötvözetből készültek. A belső panelek szintén EN AW-5754 és 5182-ből, míg a külső lemezek EN AW-6016 ötvözetből készültek. A BMW 2010-ben már teljes alumínium frontrésszel rendelkező 5-ös és 6-os típust mutatott be. A front-rész préselt lemezeihez EN AW-5042 (AlMg3,5Mn), EN AW-5182 valamint EN AW-6008 ötvözetet, extrudált darabokhoz pedig EN AW-6060 és EN AW-6082 ötvözetet alkalmaztak.

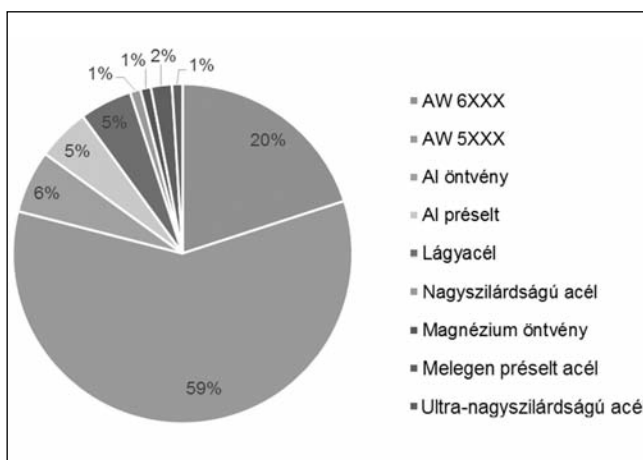
A BMW konszernhez tartozó Rolls-Royce egyedi luxusautókat gyárt. A legnagyobb modelljük, a Phantom, szintén alumíniumkarosszériával rendelkezik. A Rolls-Royce Phantom hatméteres hosszával az egyik legnagyobb luxusautó a piacon. A karosszéria merevségének biztosítása érdekében az autó robosztus szerkezeti fel-

építéssel készült, amely az alumínium használatával nem jelentett jelentős tömegnövekedést. Az extrudált elemeket az EN AW-6060, 6063 és 6082 ötvözetekből készítik. A külső lemezek EN AW-6016, míg a belső panelek EN AW-5182 és 5454 ötvözetből készülnek [7].

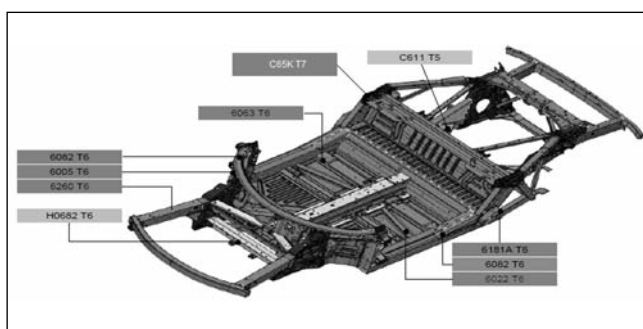
Az összefoglaló 1. táblázatban látszik, hogy a különböző autógyártók közel ugyanazokat az alumíniumötvözeteket használják autóik gyártásához. Az alumíniumautók gyártásának történetében egyre nagyobb szilárdságú ötvözetek kerültek a gyártási folyamatba, ami az anyagtechnológia mellett az alakítási technológiák fejlődésének is köszönhető. Az előttünk álló időben feltehetőleg tovább növekszik a nagyszilárdságú alumíniumötvözetek alkalmazása, valamint növekszik az alumíniumautókat gyártó vállalatok száma, hiszen jelenleg ez az egyik leghatékonyabb módja az autók tömegcsökkentésének. A korábban elsősorban a repülőgépiparban használt alumíniumötvözeteket folyamatosan átvette az autóipar. A repülőgépipari anyagfejlesztések kiemelt területe a kis sűrűségű, porkohászattal előállított 7XXX ötvözetek, az alumínium bázisú acél



■ 1. ábra. Az alkalmazott anyagcsoportok aránya – Jaguar XJ (X350) [7]. AW 6XXX – 11%, AW 5XXX – 66%, Al-ötvény – 9%, Al préselt – 9%, Lágyacél – 2%, Nagyszilárdságú acél – 3%



■ 2. ábra. Az alkalmazott anyagcsoportok aránya – Jaguar XJ (X351) [7]. AW 6XXX – 20%, AW 5XXX – 59%, Al-ötvény – 6%, Al préselt – 5%, Lágyacél – 5%, Nagyszilárdságú acél – 1%, Magnéziumötvény – 1%, Melegen préselt acél – 2%, Ultra-nagyszilárdságú acél – 1%



■ 3. ábra. A Ferrari 548 Italia típusban használt alumínium-ötvözetek [7]

kompozitok, valamint az alumínium-polimer kompozitok. Az elkövetkező években ezek az új anyagok kiválthatják a hagyományos 2XXX, 6XXX és 7XXX ötvözetcsaládok autóiipari alkalmazását. Az alakító eljárások fejlődésével egyre több autóban jelennek meg a 7XXX ötvözetek, különösen a

1. táblázat. Jellemző anyagminőségek az alumíniumautó-gyártásban [7]

Típus	Strukturális elemek	Belső panelek	Külső panelek
Audi A2	6181	6014	6016
Audi A8 (D2)	5182	6009	6016
Audi A8 (D3)	6181	6009	6016
BMW 6	6060, 6082	5042, 5182	6008
BMW Z8	6060, 6063, 6082	5754, 5182	6016
Chevrolet Corvette	6063	5745	6063
Ferrari 548 Italia	6005, 6063, 6082, 6260	6181, 6082, 6022	6181, 6082, 6022
Jaguar XJ (X350)	6082, 7108	5182	6111
Jaguar XJ (X351)	6082, 7108	5182	6111
Jaguar XK	6082	5754	6111
Lamborghini Gallardo	6060	6181	6016
Lotus Elise	6063	3105	3105
Lotus Evora	6060	5754	5754
Range Rover	6082	6014	6181, 6451
Rolls-Royce Phantom	6060, 6063, 6082	5182, 5454	6016

nagy szilárdságú EN AW-7075 és EN AW-7055-T77, amelynek kiemelkedő, 610 MPa a folyáshatára.

3. Az alumíniumautók gyártástechnológiájának kérdései

Az autógyártás acélközpontúsága miatt problémaként kezelik a szakemberek az alumínium alkalmazását, mivel a megszokott acélelemek gyártásához képest az alumínium alkatrészek gyártása speciális eszközöket és tudást igényel, valamint nem elegendő csupán a megszokott acél alapanyagokat alumíniumra cserélni. Az alumínium sűrűsége közel harmada, alakváltozó képessége pedig közel fele az acélénak. E tulajdonságok miatt az alumíniumautó-gyártásra való átállás általában jelentős költségnövelést okoz az autógyártóknak, amit jelenleg csak a válság ellenére növekvő eladásokat produkáló prémium autógyártók képesek a legkisebb veszteséggel végrehajtani. Az alumínium karosszériájú autók megjelenésére hatással van az alapanyag tulajdonsága, ugyanis a rosszabb alakíthatóság nem tesz lehetővé bonyolult geometriákat, éles vonalakat, emiatt az alumínium alkalmazásával készült autókat nagy síkfelületek, valamint lágú töréssel rendelkező panelek határolják. A merevség megőrzése érdekében alumíniumból az acélelemeknél masszívabb alkatrészeket kell tervezni, emiatt a falvastagságokat növelni kell. A kevésbé éles lekerekítések, hajlított ívek miatt a lemezalakításnál kompro-

misszumokat kell kötni, mivel túl éles sarkokon az alumínium kiszakadhat alakítás közben. Lemezalakításnál speciálisan szabott előgyártmányokkal javíthatjuk az alumíniumlemez alakváltozásának menetét, hogy elkerüljük a kedvezőtlen gyűrődéseket, visszarugózásokat. A kritikus helyeken érdemes külön felületkezeléseket alkalmazni, hogy csökkenjen a súrlódás, ezzel segítve az anyag folyását az adott felületen. Alakítás során ügyelni kell arra, hogy ne keletkezzen túl sok feszültség olyan helyeken, ahol később peremek lesznek, mert a maradó feszültség hatására a lemez elhajlik. Továbbá, lehetőség szerint biztosítani kell az egyenletes feszültségeloszlást az egész darabban. Ehhez ráncgátlókat, húzóbordákat és speciális, vezérelt szerszámokat kell alkalmazni. Mind a szerszámok, mind az alkatrész tervezésénél be kell tartani ökölszabályokat az elemeken található lekerekítések és ívek geometriáját illetően.

Az elemek gyártása mellett az összeszerelésnek is speciális igényei vannak, hiszen az alumínium hegesztése csak speciális és drága berendezésekkel végezhető el. Emiatt részesítik előnyben a gyártók a repülőgépiparból átvett szegecs- és ragasztott kötéstechológiákat, amelyeket az alumíniumelemek összeszerelésénél nagy számban használnak. Ezekkel az eljárásokkal kellően merev kötések hozhatók létre, illetve különböző anyagminőségű lemezek kötése is gond nélkül megoldható. Az alumí-

umkarosszéria kialakításának rengeteg változata született az elmúlt évtizedekben. Minden gyártó saját megoldásokat fejlesztett ki, így nehéz csoportba osztani a karosszériaváltozatokat a nagyszámú és egymástól eltérő megoldások miatt. A kialakításokat alapvetően befolyásolja a gyártási sorozat nagysága, így a csoportokra bontást az alapján készítették el, hogy milyen megoldások jellemzőek az egyedi, kis- és nagyszériás gyártásra. Az alkatrészek minősége a szerelésre való alkalmassággal jellemezhető, azonban ezekkel a költségeket csak igen megfontoltan szabad becsülni. Az alkatrészek költségigénye függ a formától, mechanikai tulajdonságoktól, tőréspektől stb. Bizonyos technológiák után még kiegészítő megmunkálásokat is alkalmazni kell, amelyek tovább növelik a költségeket. Az alkalmazott technológia további fontos meghatározója egy alkatrész egységköltségének, hiszen egy 3D hajlítással vagy hidroform alakítással készült alkatrész jóval többbe kerül, mint egy hagyományos öntéssel vagy préssel előállított elem. Az alkalmazott szerszámok élettartama további fontos tényezője a rendszer költségeinek. Egy kis tőrésmezővel rendelkező alkatrész gyártásánál a szerszám tőrési is szigorúak, ami tovább növeli a költségeket. Jól látható, hogy az alumíniumautók gyártásánál az egész gyártórendszert újra kell gondolni és tervezni, hogy a tömegcsökkentett alumíniumautókat gazdaságosan lehessen gyártani. A legfontosabb paraméter a gyártási volu-

men, amely így alapjaiban határozza meg az autó szerkezeti felépítését, hiszen nagyszorozat-gyártásban megtérülnek a drága prészszerzők, így az autó akkor állítható elő gazdaságosan, ha azt minél több lemezalkatrész alkotja. Közepes darabszámnál már az öntött és extrudált profilok jelentik az optimális megoldást.

4. Főbb kutatások és eredményeik

A szigorú emissziós szabályozások miatt az autógyártóknak rövid időn belül kell jelentős fejlesztéseket véghezvinni, hogy csökkentsék járműveik tömegét. Emiatt az autógyárak és a különböző kutatócsoportok együttesen vizsgálják az alumíniumötvözetek tulajdonságait és azok gyárthatóságát. Az alakváltozási képesség korlátai miatt az alumíniumötvözetek nagyszorozat-gyártásban való alkalmazása költséges és nehéz feladat. A tömeggyártáshoz kiváló nyújthatóság és alakíthatóság szükséges, hogy bonyolult geometriai formákat hozzanak létre egyszerűen és gazdaságosan. Az ismeretes, hogy az alakítás hőmérsékletének az újrakristályosodás hőmérsékletéig való növelésével javul az alakíthatóság. Például az 5XXX ötvözeteket 300 °C-ig, míg a 6XXX ötvözeteket 200 °C-ig kell melegíteni, hogy új csúszási síkok aktivizálódjanak az anyag szerkezetben. Amennyiben a szerző szám melegítése megvalósítható lokalizált, külön vezérelhető fűtött szegmensekkel, akkor további javulást lehet elérni az alumínium alakváltozó képességében. Az alumínium ötvözet alakíthatósága nemcsak a hőmérséklet emelésével javítható, hanem az alakítás sebességének jelentős csökkentésével. Az emelt hőmérsékletű alakítás elvégzéséhez számos új alakító technológiát fejlesztettek ki, amelyekkel nagyobb hatékonysággal lehet elvégezni a komplex geometriák gyártását, mint a hagyományos technológiákkal. A hidroform eljárást már régóta alkalmazzák az autógyártásban szerkezeti és külső lemezek gyártásához. A súrlódásmentes, biaxiális alakításnak köszönhetően az alakítási határidő területa megnövekedett, aminek köszönhetően az egyenlőtlen falvastagság-csökkenés és a nyakadás elkerülhetővé vált. A hibrid, emelt hőmérsékletű hidroform eljárás

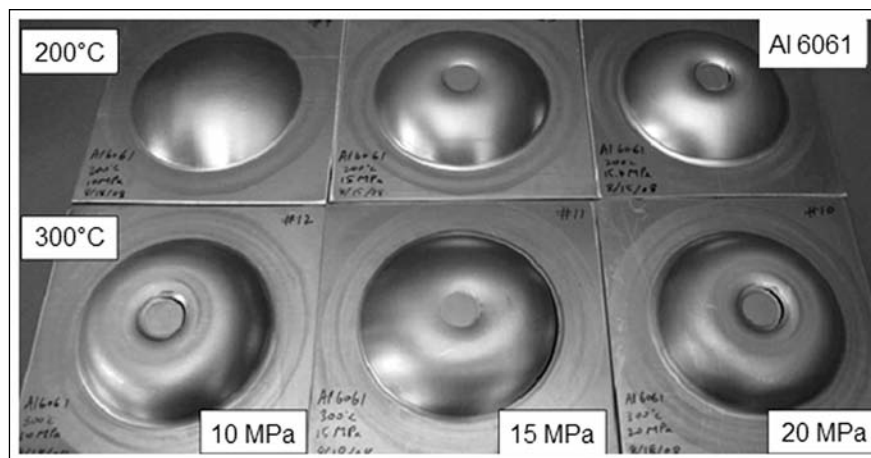
egyesíti a megalakítás és a hidroform alakítás előnyeit. Bár előnyei egyértelműek, ez a technológia még igen újnak számít, így számos kísérlet témája jelenleg is. Az alumíniumötvözetek alakíthatóságának növelésére számos technológiai vizsgálatot végeztek, amelynek köszönhetően ennek a területnek gazdag irodalma van.

A Virginia Commonwealth University precíziós alakítási központjában végeztek 2008–2009 között technológiai kísérleteket az EN AW-5052 és EN AW-6061 ötvözetben. A kutatást vezető *Mahabunphachai* és *Koc* azt vizsgálta, hogyan változik az anyag alakíthatósága különböző hőmérsékleteken és különböző sebességekkel való alakítás során [11]. Az ötvözetet olyan mélyítő berendezéssel vizsgálták, amelyben a tömör acéltüske helyett melegített olajközeg végezte az alakítást. A vizsgálat alatt mindkét szerző rész hőmérséklete külön mérhető és szabályozható volt. A gyors reagálású rendszernek köszönhetően a kísérlet alatt a beállított és mért hőmérséklet közötti különbség sosem volt 5 °C-nál nagyobb. A hevítő ciklus után egy 5-10 perces várakozás jött, hogy egyenletes hőmérséklet alakuljon ki az egész szerző testben. Az alakítási sebesség hatásának vizsgálatánál három alakítási sebességet alkalmaztak. A kísérleteket szobahőmérsékleten, 100 °C, 200 °C és 300 °C-on végezték el 0,013 1/s és 0,13 1/s alakítási sebesség mellett (4. ábra) [11].

Az eredményekből látszik, hogy 200 °C-on végzett alakítás mellett különösen rossz eredményt produkált az EN AW-6061 ötvözetből készült próbadarab. A 15 és 20 MPa nyomás mellett

nem a szerző alakját vette fel a lemez, hanem repedés, szakadás jelent meg a darab tetején. A repedés oka, hogy a hőmérséklet növelésével a folyáshatár csökken, de a nyújthatóság nem változik. A hőmérséklet növelése csökkentette az anyag szilárdságát, ami onnan látható, hogy ugyan olyan nyomással, de nagyobb hőmérsékleten végzett vizsgálatok során a lemez jobban felvette a szerző alakját. A szerző kitöltési tényezőt a mérések alapján meghatározták. Az EN AW 6061 ötvözetből készült lemez formaköltési tényezője 60%-ról 83%-ra nőtt a hőmérséklet növelésével. Mivel a kísérletben alkalmazott nyomás és hőmérséklet kombinációk nagy része okozott szakadást, érdemes lenne tovább kísérletezni, hogy az alkalmazott geometria esetén mik a technológia határai. A kísérlet szemléletesen mutatta be, hogy az alakítási hőmérséklet növelésével jelentősen javul az anyag alakíthatósága (5. ábra) [11].

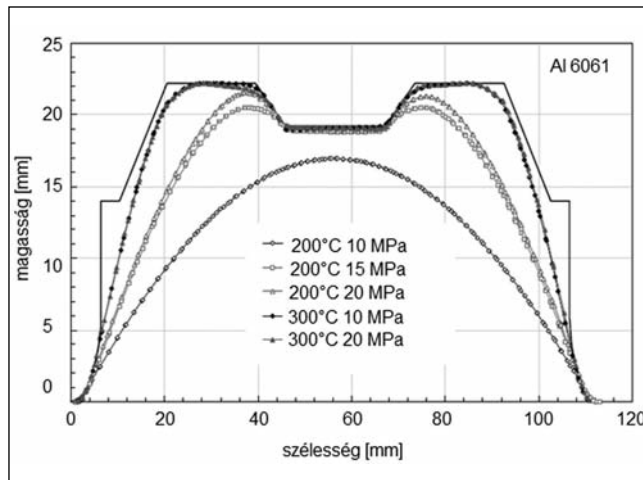
Az emelt hőmérsékletű alakítás hatásait hagyományos szakítópróbával is van lehetőségünk vizsgálni. Az alábbi kísérletet 2013-ban publikálta a Paduai egyetemről *Paolo Bariani* és *Stefania Bruschi*. A kísérletben EN AW-5083-as alumíniumötvözetben végeztek szakítópróbát 300 °C, 400 °C, 450 °C és 500 °C hőmérsékleteken. A vizsgált próbatesteket 10 °C/s sebességgel melegítették az alakítási sebességre, majd 90 másodpercig hűtött tartották, hogy homogén hőmérséklet alakuljon ki az egész próbatestben. A nyújtást 0,1 1/s sebességgel végezték. Az ötvözet alakítással szembeni ellenállása jelentősen romlott a hőmérséklet növelésével. Alakítási keményedés



■ 4. ábra. A vizsgálat EN AW-6061 ötvözetből készült próbadarabjai [11]

csupán a 300 °C-on végzett kísérletnél figyelhető meg. A folyáshatár a hőmérséklet növelésével drasztikusan csökkent. Az alakítási határdiagramot (FLD) szintén 0,1 1/s alakváltozási sebesség mellett vették fel a különböző hőmérsékleteken. Az FLD érzékenyen reagált a hőmérséklet változására. A szobahőmérsékleten végzett vizsgálattal összehasonlítva 450 °C-on volt a legszélesebb az alakíthatóság területe. Továbbnövelve a hőmérsékletet, csökkent az alakíthatóság területe, amely az alumíniumötvözetekre jellemző optimális hőmérsékleti tartomány létezését vetíti előre [12].

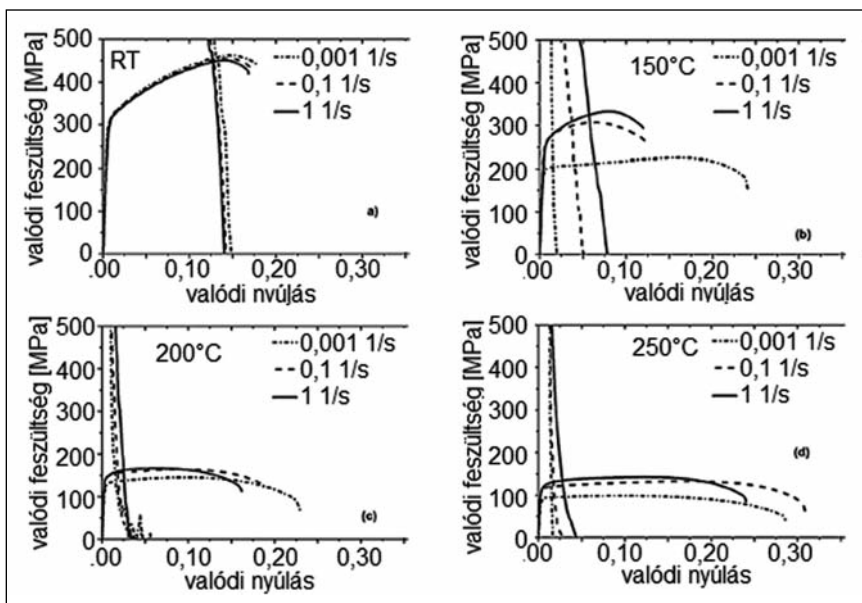
Kumar, az osztrák Ranshofen GmbH kutatója az EN AW-7020 alumíniumötvözet alakíthatóságát emelt hőmérsékletű szakítóvizsgálattal és az autópárházban használt Cross-die próbával vizsgálta. A szakítóvizsgálatban az ötvözetből készült, 2 mm vastagságú lemezből kimunkált próbatestet felmelegítették a vizsgálati hőmérsékletekre (150 °C, 200 °C, 250 °C), majd 4 másodpercig tartották ezen a hőmérsékleten. A húzóterhelést csak ez után adták rá. Az alakváltozási sebesség 0,001 és 1 1/s között volt. A szobahőmérsékleten zajló szakítóvizsgálat a jól ismert anyagviselkedést



5. ábra. Az alakíthatóság változása a hőmérséklet növelésével [11]

mutatta ki. A valódi feszültség növelésével a valódi nyúlás lineárisan növekszik egészen a folyáshatárig. Ezután a közismert alakváltozási keményedés hatására nem-lineárisra változik a valódi feszültség–valódi nyúlás kapcsolata. Majd elkezdődik egy gyors kontrakció, és elszakad a próbatest. A szobahőmérsékleten, de különböző alakváltozási sebességgel végzett vizsgálatok mind ugyanezt a jellegzetességet mutatják (6. ábra) [13].

Ebből megállapítható, hogy az alakváltozás sebessége elhanyagolható hatással van az alakítási keményedés lefolyására szobahőmérsékleten. Az emelt hőmérsékletű alakításoknál az alakítás sebessége jelentősen befolyásolta a valódi feszültség



6. ábra. Az EN AW-7020 ötvözet szakítópróbáinak eredményei [13]

és a valódi nyúlás kapcsolatát. 150 °C hőmérséklet és 0,001 1/s alakítási sebesség mellett az alakváltozási keményedés és a valódi nyúlás aránya kisebb volt, mint nagyobb sebességnél, de azonos hőmérsékleten. Ennek az aránynak a csökkenése a magasabb hőmérsékleteken is megfigyelhető.

Az alakváltozási sebesség növelése 0,01-ről 1 1/s-ra csak kismértékű változást eredményezett az értékek arányában. Ezeken az emelt hőmérsékleten a valódi feszültség közel állandó

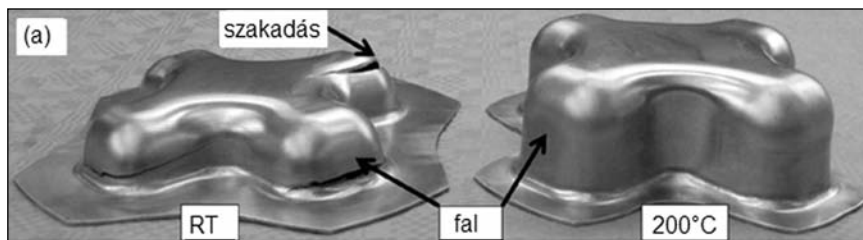
maradt az egyezményes folyáshatár után, ami arra utal, hogy a magasabb hőmérséklet beindított egy lágyulási mechanizmust. A szakítóvizsgálat után az autópárházban használt Cross-die tesztet végeztek az ötvözetten. A Cross-die teszten egy kereszt alakú bélyeggel végeznek mélyhúzást, amelyből meghatározzák az adott lemezanyag alakíthatóságát. A Cross-die tesztet szobahőmérséklet és 250 °C között végezték el. A kísérlet előgyártmánya egy 231×231 mm méretű, sarkain lekerekített lemez. A melegítést fűtőszálakkal oldották meg, amelyek melegítik a húzógyűrűt, a bélyeget és a ráncartót is. A szerszámba helyezett lemezt kenőanyaggal látták el. Összearás után 15 másodperc alatt elérte a kísérlet hőmérsékletét, ezután megindult az alakítás. Az alakítás alatt kéttengelyű húzófeszültség ébred a bélyeg fejrészen, ami az alsó rádiusznál az anyag vékonyodását okozza. A mélyhúzóhatóság határát az előállított edény magasságával határozták meg. Az edényt addig húzták, amíg azon repedés jelent meg (7. ábra).

Szobahőmérsékleten a teljes húzási hossz felénél már bekövetkezett az anyag kiszakadása, amely megerősítette az AW-7020-T6 ötvözet szobahőmérsékleten jelentkező rossz alakíthatóságát [13].

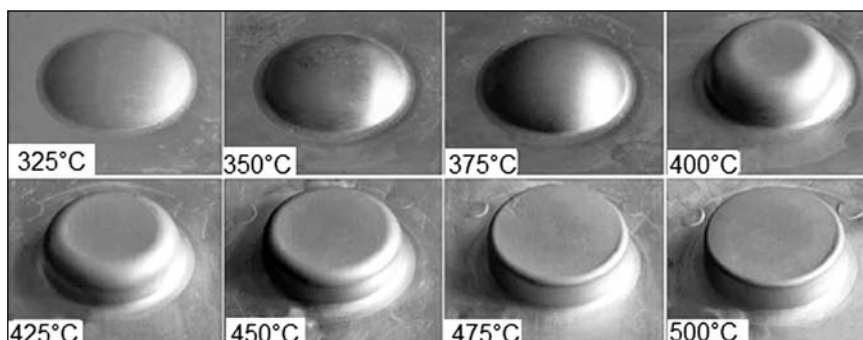
Napjainkban nagy figyelem övezi az alumíniumötvözetek nagy sebességgel történő alakítási technológiáit (high strain rate superplasticity – HSRS). A General Motors által fejlesztett HSRS-technológia hevített gázkö-

zeggel alakítja a lemezt hirtelen fellépő nagy nyomással. Ezzel a technológiával lehetőség nyílik nagy sorozatban előállítani lemezkatrészeket (100 000 db/év). A HSRS-technológiában kiemelten kell figyelni az alapanyag előkészítésére. Szabályozott mikrostruktúra és kisméretű szemcsék szükségesek a megfelelő alakításhoz. Számos megoldáson dolgoznak a kutatók, amelyekkel a HSRS-technológia kivitelezhetővé és alkalmazhatóvá válik az ipar számára. Egyik ígéretes iránya a gyors gázformázás (rapid gas forming – RGF). A technológia alapelve, hogy a fémot gyorsan felmelegítjük az alakítás hőmérsékletére egy fűtött szer számmal, aztán nagynyomású gázközeggel alakítjuk néhány másodperc alatt [14].

Számos kutatás foglalkozik az optimális alakítási paraméterek meghatározásával, mivel az alumíniumötvözetek érzékenyek az alakítás hőmérsékletére oly módon, hogy csak bizonyos hőmérséklet-tartományban produkálják a kívánt alakíthatóságot. A [14] cikkben az alakítási hőmérsékletet, a gáz nyomását, valamint az alakítás idejét vizsgálták kör alapú hengerek alakítása során. A 8. ábrán látható lemezt 5 tonnával szorították a szer számmal. A szer szám külső melegítőköpeny segítségével éri el a beállított hőmérsékletet. Az eljárás során a lemez hőmérséklete megegyezik a szer szám hőmérsékletével, így nem alakulnak ki hőmérsékleti gradiensek. A szer szám belső átmérője 52 mm, a csésze magassága 15 mm. Az RGF-alakítás vizsgálata során 5A06 (5,8%–6,8% Mg, 0,5%–0,8% Mn, 0,4% Fe, 0,4% Si, 0,1% Cu) lemezt használtak. Az alakítás során a hőmérséklet hatását, a gáz nyomását és az alakítás idejét vizsgálták, hogy optimális paramétereket határozzanak meg a nagyszorozat-gyártás számára. A 9. ábra mutatja be a rádiusz változását a hőmérséklet és az alakítási időtartam függvényében. A lemez tulajdonképpen szabadon alakított volt 325 °C és 375 °C között 2,5 MPa nyomáson 30 másodperces terhelési idővel. Ahogy a hőmérséklet növekedni kezdett, a lemez



■ 7. ábra. Cross-die próbatestek alakítás után [13]



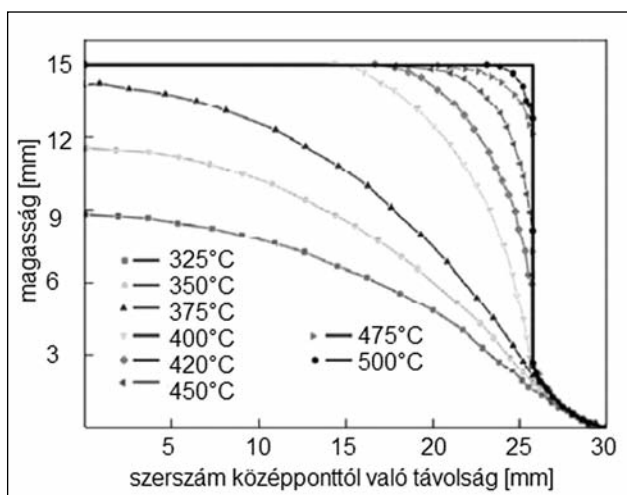
■ 8. ábra. Különböző hőmérsékleten végzett alakítások eredménye [14]

egyre inkább közelítette a szer szám alakját. A hőmérséklet növekedésével a csésze alján lévő rádiusz mérete csökkent. A legkisebb rádiusz 2 mm volt 500 °C-os alakításnál [14].

5. Összefoglalás

A kísérletekből látható, hogy a különböző kutatások az alakítás növelésére több megoldást is vizsgáltak. A hőmérséklet növelése és az alakítási sebesség csökkentése univerzális módszernek mondható, mivel csaknem minden alakítási technológiában változtatható ez a két paraméter. Az olyan jellemzők, mint az alakító közeg

nyomása már technológiafüggő. A kísérletek széles körben tanulmányozták az autóiparban használt alumíniumötvözeteket. Az eredmények azt mutatták, hogy jelentősen növelhető az alumíniumötvözetek alakíthatósága az alakítási hőmérséklet növelésével. A kivitelezés szempontjából megismerhetünk izotermikus és nem-izotermikus alakításokat, amelyek jól mutatják, hogy a hőmérséklet növelésének van többféle megoldása, amelyek más-más módon hatnak az alakíthatóságra. Az alakíthatóság növelésére a gyártás számára is használható megoldás a folyamatban résztvevő szer számelemek hevítése. Ilyen esetben a szer számelemek ugyanazt a hőmérsékletet veszik fel az alakítás során. Ez lehet egy eredményes megoldás, de nem teljes körűen kidolgozott. Láthattuk néhány kísérletben, hogy amennyiben a matrica és a bélyeg nem azonos hőmérsékletű, az tovább javítja bizonyos ötvözeteknél az alakíthatóságot. Ez a megoldás már lényegesen bonyolultabb és számos új feladat elé állítja a kutatókat. Külön kísérlet kíván már annak a meghatározása is, hogy a szer szám mely részeit melegítsék, és mely részeit hűtsék



■ 9. ábra. Az alakítási hőmérséklet hatása a rádiusz változására a szer számprofilhoz viszonyítva [14]

az optimális hőmérsékleti gradiens elérése érdekében. A hőmérsékleti szegmensek elhelyezkedése geometriafüggő, így minden gyártandó darabhoz ki kell kísérletezni a megfelelő elrendezést. Ezek után pedig a szegmensek hőmérsékletkülönbségét kellene meghatározni, ami újabb nagyszámú kísérletet jelentene. Ezeket figyelembe véve, látható, hogy az iparban ma még nehezen bevezethető, hasznosítható ez a technológia a jelenlegi állapotában.

A nem-izotermikus technológia fejlődését segíthetné egy erre a területre kidolgozott, speciális végeeselemes szoftver, amely az alkatrész geometria alapján képes meghatározni a hevítendő és hűtendő szegmenseket, valamint azok hőmérsékletét. Az izotermikus technológia egyszerűbb és könnyebben hasznosítható az ipar számára. Ebben a szerszámelemek hőmérséklete állandó, homogén. Ezzel a módszerrel is növelhető az alakítás, bár a technológia nem olyan kifinomult, mint a nem-izotermikus technológia.

Jelenleg a növelt hőmérsékletű alakítások közül ez áll legközelebb az ipari alkalmazáshoz. A technológia elterjedését segíti, hogy a kutatócsoportok számos eredményt publikálnak a különböző ötvözetek optimális hőmérsékleti tartományából, amelyeket részben az itt ismertetett kísérletekben is láthattuk. A technológia ipari bevezetését viszont nehezíti, hogy a hevítés és hőntartás mindig költséges és a szerszámok árában elérhető megtakarítás nem feltétlen fedezi a megnövekedett energiaigény költségét.

A technológiát csak akkor lehet bevezetni az autógyártásban, ha sikerül úgy összekötni a gyár energia-gazdálkodását, hogy a folyamat hulladékújítást más technológia fel tudja használni. Az optimális hőmérsékleti tartomány általában 180 °C és 250 °C között található, ami azt jelenti, hogy egy kisebb hőmérsékletet igénylő folyamattal összekötve gazdaságos lehet az alkalmazása. Ez nyilván gyárfüggő, illetve az autógyárak jellemzően kiszervezik a lemezalakítást,

de mindenképpen érdemes a megvalósíthatóságát energiaoldalról is elemezni.

Az alakítási sebesség csökkentése szintén javítja az alumíniumötvözetek alakíthatóságát, azonban ez az ipar számára szintén nem kedvező. Az autókba épített lemezalkatrészek 3-5 másodperces ciklusidővel készülnek, ami nem engedi meg, hogy az alakítás sebességét jelentősen csökkentsék. A tömeggyártás számára biztosan nem járható út az alakítás sebességének csökkentése, ezért a jövőben inkább az alakítási sebesség növelésére érdemes koncentrálni, hiszen a szuperképlékeny állapot úgy is elérhető.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2/A-11/1-KONV-2012-0029 jelű Járműipari anyagfejlesztések című projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalom

- [1] Európai Bizottság Kommunikációs Főigazgatóság: Közérthetően az Európai Unió szakpolitikáiról – Éghajlat-politika, Belgium 2014, ISBN: 978-92-79-24716-3, pp 8.
- [2] *Christoph Koffler, Klaus Rohde-Brandenburger*: On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments, *International Journal of Life Cycle Assessment* (2010) 15:128–135.
- [3] European Environment Agency: Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012, Denmark
- [4] The Alu-maximised Car Study, ika-RWTH-Aachen University, 2003, Germany
- [5] European Aluminium Association, *Aluminium In Cars*, Belgium, 2008

(http://www.alueurope.eu/pdf/Aluminium_in_cars_Sept2008.pdf)

- [6] European Aluminium Association: *Aluminium in Cars – Unlocking The Light-Weighting Potential*, (2012) <http://www.alueurope.eu/publications-automotive/>
- [7] European Aluminium Association: *The Aluminium Automotive Manual*, (2002) <http://www.alueurope.eu/aam/>
- [8] *Wang, H., Yingbing, L., Friedman, P., Minghe, C., Lin, G.*: 2012. Warm forming behaviour of high strength aluminium alloy AA7075. *Trans. Nonferrous Met.Soc. China* 22, 1–7.
- [9] *Li, D., Ghosh, A. K.*: 2004. Tensile deformation behaviour of aluminium alloys at warm forming temperatures. *J. Mater. Process. Technol.* 145, 281–293.
- [10] *Torca, I., Aginagalde, A., Esnaola, J. A., Galdos, L., Azpilgain, Z., Garcia, C.*: 2010. Tensile behaviour of 6082 aluminium alloy sheet under different conditions of heat treatment, temperature and strain rate. *Key Eng. Mater.* 423, 105–112.
- [11] *S. Mahabunphachai, M. Koc*: Investigations on forming of aluminium 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures; *Materials and Design* 31 (2010); 2422–2434.
- [12] *Paolo F. Bariani, Stefania Bruschi, Andrea Ghiotti, Francesco Michieletto*: Hot stamping of AA5083 aluminium alloy sheets; *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 62; 2013; pp. 251–254.
- [13] *M. Kumar, N. Sotirov, C. M. Chimani*: Investigations on warm forming of AW-7020-T6 alloy sheet; *Journal of Materials Processing Technology* 214; 2014; pp. 1769–1776.
- [14] *Fan Xiao-Bo, He Zhu-Bin, Yuan Shi-Jian*: Deformation behavior of 5A06 aluminium alloy sheet for rapid gas forming at elevated temperature; *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22; 2012; 389–394.