

A LOCOMATECH H-2020 PROJEKT ALAKÍTÁSTECHNOLÓGIAI VONATKOZÁSAI ÉS EREDMÉNYEI

Gál Gaszton

címzetes egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metgalga@uni-miskolc.hu

Gál Viktor

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: gal.viktor@uni-miskolc.hu

Kovács Péter Zoltán

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: metkpz@uni-miskolc.hu

Kuzsella László

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: femkuzsy@uni-miskolc.hu

Lukács Zsolt

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: zsolt.lukacs@uni-miskolc.hu

Tisza Miklós

professzor emeritus, Miskolci Egyetem, Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézet
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: tisza.miklos@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A cikk a LoCoMaTech H-2020 projekt keretében végzett alakítástechnológiai kutatásokról és az elért eredményekről ad számot. A projekt a Horizon 2020 Európai Unió program keretében nyert el pályázati támogatást a 2016.09.01-2019.08.31. közötti, 36 hónapos kutatási időszakra. A projekt szakmai feladatait 9 ország 19 intézményéből álló konzorcium valósította meg a Londoni Imperial College vezetésével. A projekt fő célja elsősorban nagyszilárdságú (pl. AA6082 és AA7075 anyagminőségű) alumínium ötvözetek alkalmazásával, jelentős tömegcsökkentéssel, költséghatékony gyártási eljárások kidolgozása, a környezeti káros hatások minél nagyobb mértékű csökkentésével. A projektben a Miskolci Egyetem Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetének Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszéke volt a magyar partner, amelynek fő feladatát az alakítástechnológiai kérdések vizsgálata, alakíthatósági kísérletek végzése, valamint ezek numerikus modellezése képezte.

Kulcsszavak: tömegcsökkentés, járműipar, nagyszilárdságú Al-ötvözetek alkalmazása, alakíthatóság

Abstract

In this paper, the formability investigations and their results achieved within the LoCoMaTech H-2020 project are summarised. This Joint European project was realised by the consortium of 19 institutions and companies from nine European countries. The project was led by the Imperial College London (ICL). The primary aim of the project was to develop a cost-effective process for producing

automotive parts from low-density aluminium alloys (e.g. AA6082 és AA7075 high strength grades), to assure significant mass reduction and thereby reducing the harmful emissions and contributing to the environment protection. Performing theoretical and experimental formability investigations and numerical modelling was the main task of the Institute of Materials Science & Technology of the University of Miskolc as the Hungarian project partner.

Keywords: mass reduction, automotive industry, high strength aluminium alloys, formability investigations

1. Bevezetés

A LoCoMaTech H-2020 projekt az Imperial College London (ICL) vezetésével 2016 szeptemberében indult, 36 hónap futamidejű az EU által finanszírozott, Horizon-2020 kutatási együttműködés. A projekt fő célkitűzése nagyszilárdságú Al-ötvözetek felhasználásával készült járműalkatrészek gazdaságos előállítási technológiájának, az ún. Hot Forming & Quenching (HFQ™) szabadalmaztatott eljárás optimális technológiai megoldásainak kidolgozása, az eljárás paramétereinek meghatározása és a tömeggyártásba történő bevezethetőségének vizsgálata.

1. táblázat. A munkacsoportok (Work Packages) megnevezése és a koordináló intézmény

| WP Number | WP megnevezése | WP koordinátor intézmény |
|-----------|--|--|
| WP1 | Integrated Cost-driven Life Cycle Approach and Implementation – Integrált, költség-orientált életciklus-megközelítés és megvalósítás | Centro Ricerche Fiat SCPA - CRF |
| WP2 | Materials, Testing and Characterisation for low cost HFQ® - Anyagok, vizsgálatok és anyagjellemzők a kis költségű HFQ® eljárás céljára | Constellium CRV SAS - CTE |
| WP3 | Innovative Low-Cost Manufacturing Technologies – Innovatív, kis költségű gyártási eljárások kidolgozása | Imperial College of Science Technology - ICL |
| WP4 | Sustainable Manufacturing System and Tools – Fenntartható gyártási rendszerek és eszközök fejlesztése | Automation, Press and Tooling A.P.& T. - APT |
| WP5 | Design for Materials Replacement and Virtual Engineering – Tervezés és helyettesítő anyagok kiválasztása Virtuális mérnöki tevékenységgel | Impression Technologies Limited - ITL |
| WP6 | Technology and Product Demonstration, Validation and Industrial Assessments – Technológiai és termék demonstráció, validálás és ipari felmérések | Voestalpine Polynorm GmbH & Co. KG - VAP |
| WP7 | Dissemination, Exploitation, Training and Educational Courses – Az eredmények disszeminációja, hasznosítása, képzési és oktatási kurzusok | Diad Group Srl - DIG |
| WP8 | Project Administrative and Financial Management – A projekt adminisztratív és pénzügyi menedzselése | Imperial College Of Science Technology - ICL |

A projektben 9 Európai Unió országából összesen 19 partner intézmény vett részt. A kutatás feladatait a konzorcium 8 munkacsoportra (Work Package) bontva, és az egyes munkacsoportokon belül létrehozott feladatpontok (Task Point) szerint végezte. A munkacsoportok és azokon belül a feladatpontok a teljes projekt logikus megvalósítási rendszerét alkották.

Mind a nyolc munkacsoport (WP1-WP8) feladatait egy-egy kijelölt konzorciumi intézmény koordinálta és a feladatpontok vezetését is egy-egy konzorciumi intézmény látta el. Ebben a H-2020 projektben a Kelet-Közép Európai országokból egyedüli partnerként az ME-ATI Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszéke vett részt.

A Miskolci Egyetem Anyagszerkezetani és Anyagtechnológiai Intézete (ME-ATI) az 2. táblázatban felsorolt munkacsoportok közül a WP2, WP3, WP5, WP6, WP7 és WP8 munkacsoportokban végzett kutatómunkát; a WP2-n belül az Alumínium ötvözetek mechanikai anyagvizsgálata és az Alakíthatósági vizsgálatok (TaskPoint 2.4. Materials Testing and Formability Investigations) feladatpontban, valamint a WP3 munkacsoportban az azonos és különböző anyagminőségű anyagok különféle kötéstehnológiáinak kidolgozásában és vizsgálataiban elnevezésű feladatpont (TaskPoint 3.5. és 3.6.) irányítását is ellátta. A többi felsorolt munkacsoportban, közreműködő intézményként végeztünk feladatokat. Értelemszerűen, a feladatok jellegéből következően a WP6, WP7 és WP8 munkacsoportban valamennyi partner intézmény részt vett.

A 36 hónap kutatómunkája igen szerteágazó feladatokat jelentett: ezek közül ebben a cikkben az alumínium ötvözetek mechanikai tulajdonság vizsgálatából és az alakíthatósági elemzésekből közlünk szemelvényeket. Mind az anyagparaméterek meghatározása, mind pedig az alakíthatósági elemzések a többi munkacsoport feladataihoz szolgáltatnak alapvető jelentőségű adatokat és információkat.

2. A Hot Forming & Quenching (HFQ®) eljárás ismertetése

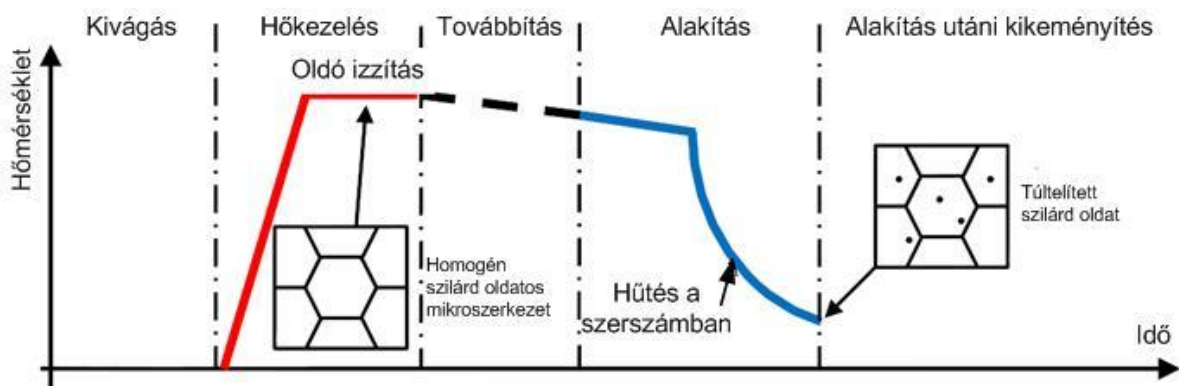
Amint a Bevezetésben is említettük a projekt fő célkitűzése a nagyszilárdságú Al-ötvözetek felhasználásával készült járműalkatrészek gazdaságos előállítási technológiájának, az ún. Hot Forming & Quenching (HFQ™) szabadalmaztatott eljárásnak a részletes technológiai kidolgozása, az eljárás optimális technológiai megoldásainak továbbfejlesztése, valamint az eljárás optimális paramétereinek meghatározása és a tömeggyártásba történő bevezethetőségének vizsgálata volt. Ennek részletezése előtt indokolt, hogy röviden összefoglaljuk az eljárás lényegét.

A tömegcsökkentés követelményének – amely az autópárral szemben támasztott követelmények szinte mindegyike szempontjából kiemelt jelentőségű – egyik lehetséges megvalósítási útja a könnyűfémek csoportjába tartozó, nagyszilárdságú alumínium ötvözetek alkalmazása. Ugyanakkor az is közismert, hogy a szilárdság növelésével az alakíthatóság rohamosan csökken, miközben az autópári alkatrészek többségét – különösen az ún. Body-in-White, azaz a karosszéria elemeket – vékonylemezből, képlékenyalakítással gyártják, tehát az alakíthatóság kiemelt fontosságú az autópárban. A megoldás ezért olyan technológiai folyamat alkalmazása, amelynél az alakítás során az alkalmazott alumínium ötvözet még kis szilárdsággal és jó alakíthatósággal rendelkezik, és amelynél az alkatrész a megkívánt szilárdságát az alakítás után, utólagos hőkezeléssel, kikeményítéssel éri el. Az alakítható, nemesíthető alumínium ötvözetek ennek a technológiai folyamatnak kiválóan megfelelnek, közülük is elsősorban azok az ötvözetek, amelyek a kikeményítő hőkezelés során a legnagyobb szilárdságot biztosítják. Ennek a követelménynek leginkább az ún. 7xxx ötvözetsor felel meg, közülük is leginkább az AA7075 jelű, Al-Zn-Mg-Cu ötvözet.

Az AA7075 alumínium ötvözet a repülőgépipar és egyre inkább az alumínium karosszériát fejlesztő autópár közkedvelt anyagává vált. Ez az alumínium ötvözet a nemesíthető alumínium

ötvözetek jellegzetes képviselője, amely a magas hőmérsékletű (480-525°C) oldó izzítást követően jól alakítható, lágy homogén egyfázisú, α szilárd oldatot tartalmaz, a kikeményítést követően pedig egyes acélok szilárdságát is elérő ($R_m > 550$ MPa) nagyszilárdságú ötvözetet kapunk.

Ezek a paraméterek teszik ezt az alumínium ötvözetet kiválóan alkalmassá a Hot Forming and Quenching (HFQTM) eljárásra, amelynek lényege az alábbiakban foglalható össze: az alumínium ötvözetet nagyhőmérsékletű oldó izzítással jól alakítható, lágy homogén egyfázisú, α szilárd oldatot tartalmazó állapotra hőkezeljük, amelyet ezt követően melegen, a kívánt formára alakítjuk. Az alakítást követően az alkatrészt gyorsan lehűtjük, ezzel megakadályozva durva kiválások keletkezését, amelyek a tulajdonságokat igen kedvezőtlenül befolyásolnák. Az alkatrész a végleges szilárdságát ezt követően egy kikeményítő hőkezelés során nyeri el. A jelentős szilárdságnövekedés a kikeményítés során kiváló finom precipitátumoknak köszönhető. Ennek a technológiai folyamatnak az elvi hőmérséklet-idő folyamata látható az 1. ábrán.



1. ábra. A Hot Forming and Quenching (HFQTM) eljárás elvi hőmérséklet idő diagramja

Mivel vékony lemezekről van szó (alkatrésztől függően $t=0,8-2,0$ mm), az oldó izzítás csak néhány percet vesz igénybe. A kikeményítés ennél lényegesen hosszabb időt (akár néhány órát is) igényel. Ezt az időt azzal csökkentjük az ipari gyártási folyamatba beilleszthető ciklusidő elérése érdekében, hogy a szilárdságnövekedést biztosító kikeményítő hőkezelést, a gyártási sorba beépítve, a karosszéria festését követő kiegészítés során nyeri el.

3. Az anyagparaméterek meghatározása

Mind a technológiai és a szerszámtervezéshez, mind pedig a folyamatok numerikus modellezéséhez nélkülözhetetlen egyrészt a megfelelő anyagmodellek kidolgozása, másrészt azoknak az anyagjellemzőknek a kísérleti meghatározása, amelyek az anyagmodellek gyakorlati felhasználásához is szükségesek.

3.1. Az alkalmazott anyagmodellek

Az alakítási hőmérséklet az alumínium ötvözetekre kidolgozott HFQ® eljárásnál melegalakításnak minősül. Melegalakítás során a hidegalakításhoz képest alapvetően különböző anyagmodellek alkalmazása szükséges a technológiai folyamat minél pontosabb leírása érdekében. Melegalakító eljárásoknál az anyag viselkedését a hőmérséklet és az alakváltozási sebesség is alapvetően

befolyásolja. Az irodalomban különféle anyagmodellek találhatók, amelyek ezeket a hatásokat különböző mechanikai megfontolások alapján kidolgozott összefüggésekkel írják le. Melegalakító eljárásoknál jellemzően viszkoplasztikus anyagmodelleket alkalmaznak, esetenként a speciális alakváltozási körülményeket is figyelembe vevő alakváltozási állapotot is leíró módosításokkal (pl. kúszás, szuperképlékeny alakítás, viszkoplasztikus keményedés, megújulás és újrakristályosodás, stb. figyelembevételével). Ezekről a modellekről átfogó elméleti összefoglaló található Lin könyvében [1].

A projekt keretében Lin és munkatársai [2] nagyszilárdságú alumínium ötvözetek viselkedését pontosabban leíró, egységes viszkoplasztikus anyagmodellt (Unified Viscoplastic Material Modell) dolgoztak ki, a különféle melegalakítási folyamatok egységes leírására. Ebben a cikkben az anyagmodell részletes ismertetésétől eltekintünk; ennek részletes elemzésére egy külön, önálló cikkben térünk vissza. Azonban a következő pontokban ismertetésre kerülő anyagvizsgálatok, és alakíthatósági elemzések tervezésénél és megvalósításánál a Lin és munkatársai által kidolgozott modellt alkalmazzuk [2].

3.2. A HFQ® eljárásnál alkalmazott nagyszilárdságú alumínium ötvözetek anyagjellemzőinek meghatározása

A HFQ® eljárásnál alkalmazott AA7075 nagyszilárdságú alumínium ötvözet mechanikai anyagvizsgálatához a lemez alapanyagokat a francia Constellium (CTE) projektpartner biztosította. A párizsi székhelyű cég a világon meghatározó szerepet tölt be a nagyszilárdságú alumínium alapanyagok fejlesztésében és gyártásában. A világszerte számos leányvállalattal rendelkező cég a repülőgépipar és az autópár meg határozó alapanyag beszállítója. A Constellium a nagyszilárdságú alumínium ötvözetek egész sorát gyártja különböző fantázianevekkel:

- Surfalex® márkanévvel kiváló minőségű, nagyszilárdságú és kedvező alakíthatósági tulajdonságokkal rendelkező lemeztetekercseket szállít elsősorban a különféle külső autópánelek gyártásához, amelyeknél a külső megjelenés különösen hangsúlyozott,
- Securallex® márkanévvel az előzőnél is nagyobb szilárdságú lemezek, a járművek ütközés-állóságát növelő alkalmazásokhoz,
- Strongalex® és Ultralex® a fokozott nagyszilárdságú és ultra-nagyszilárdságú igényt jelentő alkatrészekhez, pl. az ún. B-oszlopok gyártásához,
- Formalex® a kimondottan nagy alakítási mélységű alkatrészekhez.

Az alábbiakban a vizsgálatokra rendelkezésünkre bocsátott lemez alapanyagok kémiai összetételét és mechanikai anyagjellemzőit ismertetjük. Az AA7075 anyagminőség vegyi összetételét a 2. táblázat mutatja az elemek tömegszázalékában.

2. táblázat. A vizsgálatoknál alkalmazott AA7075 lemez alapanyag jellemző összetétele (tömeg%)

| Al | Mg | Si | Zn | Cr | Mn | Cu | Ti | Fe | Egyéb egyenként | Egyéb összes |
|-----------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------------|--------------|
| 87,1-91,4 | 2,1-2,9 | max 0,4 | 5,1-6,1 | 0,18-0,28 | max 0,3 | 1,2-2,0 | max 0,2 | max 0,5 | max 0,05 | max 0,15 |

A legfontosabb mechanikai anyagjellemzőket ($R_{p0,2}$, R_m , A_{80} , HB) az AA7075 anyagminőség szállítási állapotára (T6 hőkezeltségi állapotra) vonatkozóan a 3. táblázat tartalmazza. A T6

hőkezelt állapot az oldó izzítást követően teljes mértékben mesterségesen öregített, kikeményített állapotot jelent.

3. táblázat. AA7075 anyagminőség mechanikai jellemzői, T6 állapotban

| Megnevezés | Folyási határ | Szakítószilárdság | Keménység | Fajlagos nyúlás |
|-------------------|------------------|-------------------|-----------|-----------------|
| Jel, mértékegység | $R_{p0.2}$, MPa | R_m , MPa | HB | A_{80} , % |
| Érték | 503 | 572 | 150 | 11 |

3.3. Az AA7075 alumínium ötvözet mechanikai anyagvizsgálata

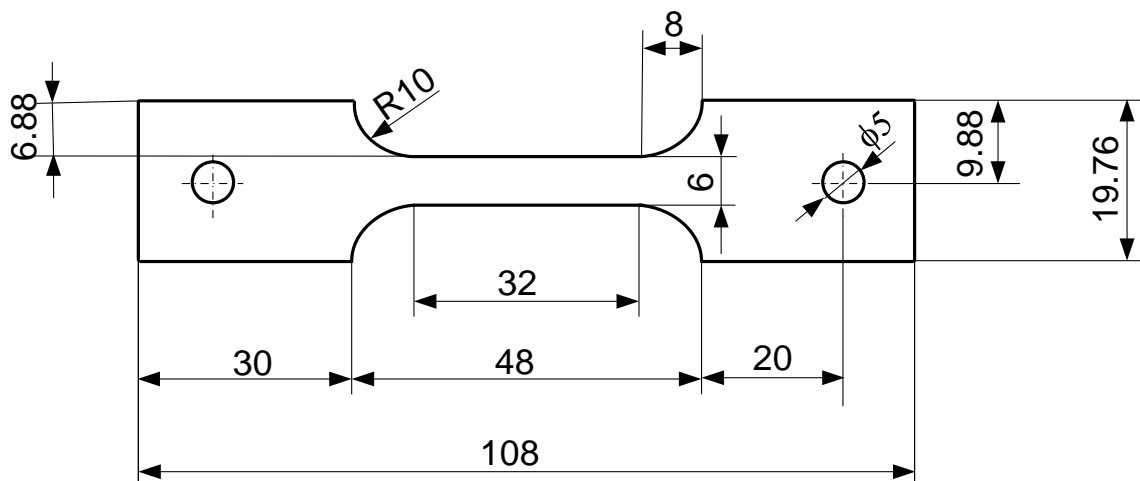
A projektben a mechanikai anyagvizsgálat elsősorban az alakításnál alkalmazandó alapanyagok valódi feszültség-valódi nyúlás diagramjainak meghatározását jelentette. Ezekre a diagrammokra mind a technológiai és szerszámtervezésnél, mind pedig az eljárás numerikus modellezésénél szükség van. Ez a HFQ® eljárás lényegéből következően különböző hőmérsékleteken, különböző alakváltozási sebességekkel végrehajtott egytengelyű húzóvizsgálatokat, melegsakító vizsgálatokat jelentett.

A hőmérséklet és az alakváltozási sebesség szabályozása szükségessé tette, hogy az egytengelyű húzóvizsgálatokat az intézetünkben található Gleeble-3500 termomechanikus vizsgáló berendezésen (fizikai szimulátoron) végezzük. A berendezés részletes ismertetése a projektben készült jelentésekben [3] és a berendezést gyártó Dynamic Systems Inc. weboldalán is elérhető [4]. A Miskolci Egyetem Anyagszerkeztani és Anyagtechnológiai Intézetének Gleeble-laboratóriumában üzembe helyezett Gleeble-3500 termomechanikus fizikai szimulátor fényképe a 2. ábrán látható.



2. ábra. Gleeble-3500 termomechanikus fizikai szimulátor

A vizsgálatokat az előzőkben ismertetett, a Constellium projekt partner által szállított lemez próbatesteken végeztük. A próbatestek kialakítása és méretei a 3. ábrán láthatók. A próbatest lemezvastagsága az alapanyag lemezvastagságával ($t=2,0$ mm) egyezett meg.



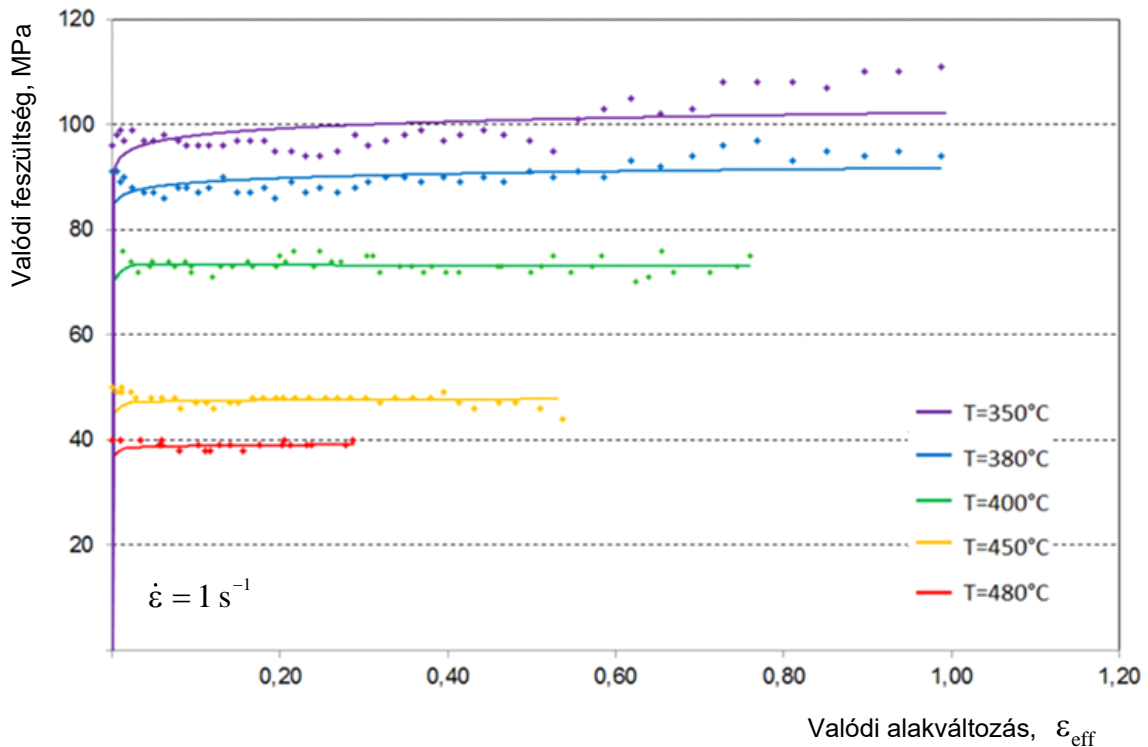
3. ábra. A próbatest kialakítás a méretekkel az egytengelyű meleg szakítóvizsgálatokhoz

Az üzemi alakítási körülmények minél teljesebb modellezése, 5 különböző hőmérsékleten, 4 különböző, de a kiválasztás után nagy pontossággal állandó értéken tartott, alakváltozási sebesség alkalmazását jelentette. A vizsgálatokat a 4. táblázatban összesített vizsgálati mátrix szerint végeztük. A vizsgálatokat a 4. táblázat szerinti 5 különböző, de állandó értékű hőmérsékleten végeztük. Minden hőmérsékleten elvégeztük a 3. ábrán látható módon kialakított próbatestek egytengelyű szakítóvizsgálatát $\dot{\epsilon} = 1/s$ alakváltozási sebességgel, majd ezt követően a hőmérsékletet állandó értéken tartva ($T=380^\circ\text{C}$ hőmérsékleten) az alakváltozási sebességet változtattuk az $\dot{\epsilon} = (1-10) 1/s$ intervallumban az alakváltozási sebesség hatásának tanulmányozása érdekében.

4. táblázat. A vizsgálati mátrix az alkalmazott hőmérsékleti és alakváltozási sebesség értékekkel

| Alakváltozási sebesség | Hőmérséklet | | | | |
|------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| | 350°C | 380°C | 400°C | 450°C | 480°C |
| 0.1/s | | √ | | | |
| 1/s | √ | √ | √ | √ | √ |
| 5/s | | √ | | | |
| 10/s | | √ | | | |

A meleg szakítóvizsgálatok valódi feszültség-valódi alakváltozás diagramjai a 4. ábrán láthatók. A pontsorok a mérési eredmények pontjait, a folytonos vonalak a mérési pontokra illesztett trendvonalakat jelentik



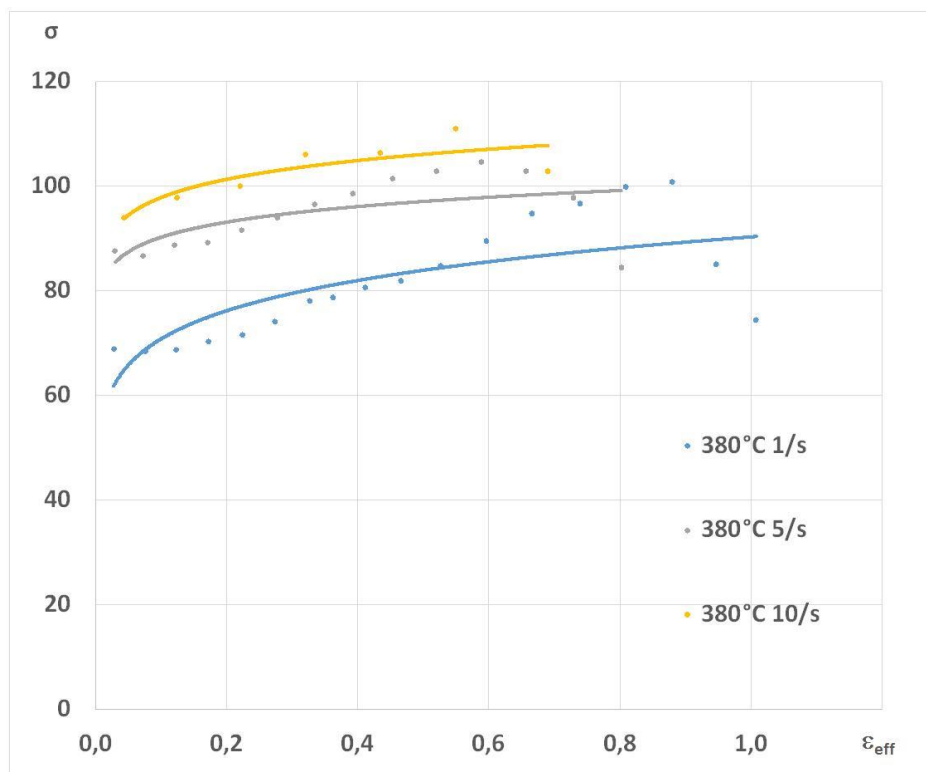
4. ábra. Melegszakító vizsgálati diagramok

A diagramon ábrázolt görbék a $T=350\text{--}480^\circ\text{C}$ hőmérsékleteken, $\dot{\phi}=1/\text{s}$ állandó alakváltozási sebességgel felvett mérési eredményeket mutatják.

A diagramok elemzéséből az alábbi lényeges következtetések vonhatók le:

- a valódi feszültség – valódi alakváltozás görbék a valódi feszültség értékeket illetően jól követik a melegalakításnál várt változásokat, azaz a növekvő hőmérsékleteken egyre csökkenő valódi feszültségeket mérünk. A valódi feszültségek csökkenése a növekvő hőmérsékletekkel a diszlokációk növekvő termikus aktiválódásával magyarázható: ez teljes mértékben megegyezik a melegalakításnál más anyagminőségek esetén is tapasztalt változásokkal;
- a mért valódi alakváltozások a $T=350\text{--}400^\circ\text{C}$ -on végzett kísérleteknél többé-kevésbé ugyancsak a melegalakításnál várható tendenciát követik, ugyanakkor a $T=450^\circ\text{C}$ -on és különösen a $T=480^\circ\text{C}$ -on felvett diagramok a vártnál lényegesen kisebb valódi nyúlást mutatnak. Hasonló tapasztalatokról számolt be AA2024 minőségű alumínium ötvözetek vizsgálatánál Wang és Lin is [5]. A szakadásig elviselt nyúlás csökkenését a magasabb hőmérsékleten ($T>450\text{--}480^\circ\text{C}$) a szemcsék közötti törési folyamatok mechanizmusainak dominánsá válásával indokolták.

A következő kísérletsorozatban az alakváltozási sebesség ($\dot{\epsilon}$) valódi feszültség-valódi alakváltozás görbékre gyakorolt hatását tanulmányoztuk. A mérési eredményeket az 5. ábra mutatja: a pontsorok a mérési eredmények pontjait, a folytonos vonalak a mérési pontokra illesztett trendvonalakat jelentik.



5. ábra. Az alakváltozási sebesség hatása a valódi feszültség-valódi nyúlás diagramokra

Az 5. ábrával kapcsolatban azt is meg kell jegyezni, hogy az eredeti vizsgálati mátrixban szereplő $\dot{\varphi} = 0.1/s$ alakváltozási sebességre vonatkozó adatok mérés-technikai okok miatt nem szerepelnek. A diagramok elemzéséből az alábbi lényeges következtetések vonhatók le:

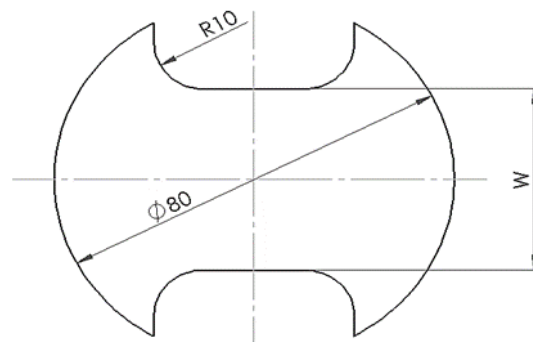
- a valódi feszültség értékek a növekvő alakváltozási sebességekkel növekednek, amint az a melegalakító eljárásoknál általánosan ismert;
- a növekvő alakváltozási sebességekkel a szakadásig elviselt nyúlás csökkenése is megfigyelhető: ez ugyancsak összhangban van a melegalakításnál tapasztaltakkal.

3.4. Az AA7075 alumínium ötvözet alakíthatósági vizsgálata

Az alakíthatósági vizsgálatokat ugyancsak a Constellium (CTE) projekt partner által biztosított $t=2,0$ mm vastagságú, AA7075 lemezanyagokon végeztük, amelynek alapvető mechanikai tulajdonságai az 1. és 3. táblázatban találhatóak. A vizsgálatokat a melegsakító vizsgálatoknál bemutatott, Gleeble-3500 termomechanikus fizikai szimulátorral, izotermikus vizsgálati körülmények között, a tanszékünkön kidolgozott módosított Nakajima vizsgálat szerint végeztük [6].

3.4.1. Az alakíthatósági vizsgálatnál alkalmazott próbatetek kialakítása és méretei

A vizsgálatoknál alkalmazott próbatetek kialakítását és méreteit a 6. ábra mutatja. A próbatesteket $\phi 80$ mm méretű körlelapokból, a 6. ábrán látható kialakítással készítettük el.



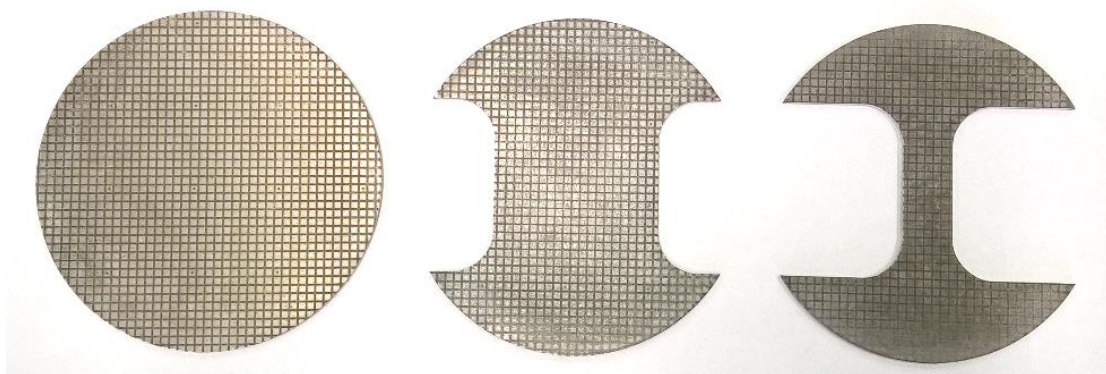
6. ábra. A módosított Nakajima vizsgálat vizsgálati próbatestjeinek kialakítása és méretei

Az ábrán látható w hídszélesség értékét annak megfelelően változtattuk, hogy különböző alakváltozási útvonalakat (alakváltozási történetet) tudjunk az egyes próbatestekkel megvalósítani. A különböző alakváltozási állapotokhoz tartozó w hídszélességeket a megfelelő alakváltozási útvonallal együtt az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat. A különböző alakváltozási történetekhez tartozó próbatest hídszélességek (w) értékei

| Geometria száma | Alakváltozási történet | w (mm) | w/D |
|-----------------|------------------------|----------|-------|
| 1 | Egytengelyű húzás | 12 | 0,15 |
| 2 | Síkalakváltozás | 40 | 0,5 |
| 3 | Biaxiális nyújtás | 80 | 1 |

Az 5. táblázat szerint kialakított, három különböző alakváltozási történetet eredményező próbatest fényképe látható a 7. ábrán.



7. ábra. Az alakíthatósági vizsgálatoknál alkalmazott három különböző hídszélességű próbatest képe (a próbatesteken az optikai alakváltozásméréshez felvitt négyzetháló látható)

3.4.2. Az izotermikus alakíthatósági vizsgálat elrendezése és a vizsgálati mátrix

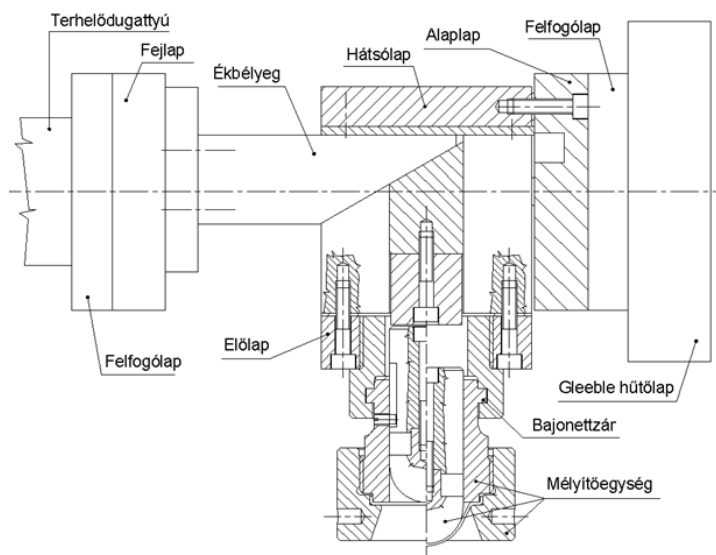
Az alakíthatósági vizsgálatokat a 3.3. pontban ismertetett, Gleeble-3500 termomechanikus fizikai szimulátor berendezésén végeztük. Annak érdekében, hogy a jelentős alakítási sebességgel végzett vizsgálatok során a próbatestekre felvitt négyzetháló torzulását (a próbatest alakváltozását) a Vialux optikai mérőrendszerrel [7] folyamatosan vizsgálni tudjuk, egy speciális berendezést terveztünk a Gleeble-3500 berendezéshez, amelynek a működését a következő pontban ismertetjük részletesen.

3.4.3. A módosított Nakajima vizsgálatához készített speciális vizsgáló berendezés

A speciális vizsgáló berendezéssel szemben támasztott legfontosabb követelmény – amellet, hogy a Gleeble által biztosított hőmérséklet és alakváltozási sebesség kontrol megbízhatóan működjön – hogy a próbatest mélyítése közben folyamatosan nyomon követhető legyen az alakított részen az alakváltozás. Ehhez optikailag hozzáférhetővé kell tenni a próba felületét a mélyítés során. Ehhez pedig szükséges a Gleeble berendezésén az alakító főmozgás irányának a Gleeble tengelyéhez képest 90°-kal való „elfordítása”, amelyet a Gleeble terhelődugattyú mozgásának egy ékpályán való irányválttatásával valósítottunk meg. A speciális vizsgáló berendezés tervezésekor a fő célkitűzést, valamint a feladat szempontjából lényeges, további tervezési szempontokat vettünk figyelembe. A további tervezési szempontok alapján elvárásként fogalmaztuk meg, hogy a készülék legyen alkalmas:

- az alakítási határdiagram meghatározására tervezett hőmérséklet és alakváltozási sebesség paraméterek megbízható megvalósítására;
- a próbatest alakváltozásának folyamatos nyomon követésére a Vialux-AutoGrid optikai mérőrendszerrel;
- a próbatestek gyors és megbízható megfogására az alakítás során;
- a 3.4.1. pontban ismertetett, módosított Nakajima próbatestek és a hozzá tartozó bélyeg-matrica pár befogására.

Ezeket a feltételeket kielégítő készülék elvi vázlata a 8. ábrán látható.



8. ábra. A módosított Nakajima vizsgálatához a Gleeble-3500 berendezésre tervezett készülék

3.4.4. Az alakítási határgörbe vizsgálat és eredményei

Az alakítási határdiagram meghatározását az előző pontokban leírt vizsgálati módszerrel és technikával a Gleeble-3500 berendezésen, az erre a célra kifejlesztett speciális készülék alkalmazásával végeztük. Az alakítási határgörbe három alakváltozási történetet megtestesítő pontsorozatát a 3.4.1. pontban ismertetett próbatestek alkalmazásával határoztuk meg. Az alakváltozások kiértékelését a Vialux-AutoGrid optikai alakváltozás mérő- és kiértékelő berendezéssel végeztük.

Az alakíthatósági vizsgálatokat, azaz az alakítási határdiagram meghatározását $T=350$, 380 és 420°C hőmérsékleteken, $v=75$, 250 és 400 mm/s alakítási sebességekkel végeztük. Az alkalmazott hőmérséklet és alakítási sebesség paramétereit a technológiai paraméterek 6. táblázatban összefoglalt technológiai mátrixa mutatja.

A vizsgálatokat az első mérési sorozatban $v=250$ mm/s állandó alakítási sebességgel, végeztük valamennyi ($T=350$, 380 és 420°C hőmérsékleten, majd a következő mérési sorozatban a hőmérsékletet állandó értéken tartva ($T=380^{\circ}\text{C}$), az alakítási sebességet változtattuk a 6. táblázatban megadott, $v=75$, 250 és 400 mm/s értékeknek megfelelően. Ezzel a módszerrel, lehetőségünk nyílt mind az alakítási hőmérséklet, mind pedig az alakítási sebesség hatásának elemzésére.

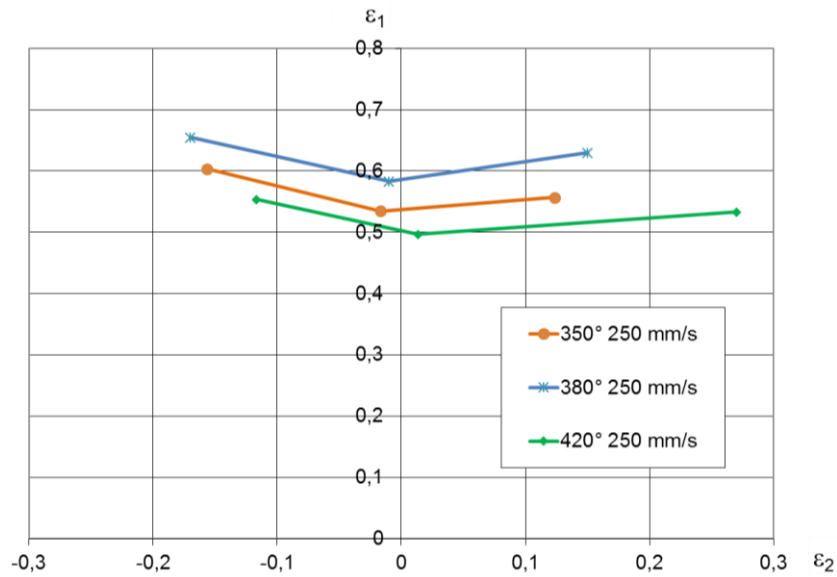
6. táblázat. Az alakíthatósági vizsgálatoknál alkalmazott technológiai paraméterek mátrixa

| Alakítási sebesség (mm/s) | Hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 350°C | 380°C | 420°C |
| 75 mm/s | | √ | |
| 250 mm/s | √ | √ | √ |
| 400 mm/s | | √ | |

A kísérleti eredményekből megszerkesztettük az AA7075 alumínium ötvözet alakítási határdiagramját (FLD). A 9. ábra a $v=250$ mm/s állandó alakítási sebességgel $T=350$, 380 és 420°C hőmérsékletekre vonatkozó alakítási határgörbét mutatja, míg a 10. ábra a $T=380^{\circ}\text{C}$ -on, $v=75$, 250 és 400 mm/s alakítási sebességgel elvégzett kísérletek eredményeit foglalja össze.

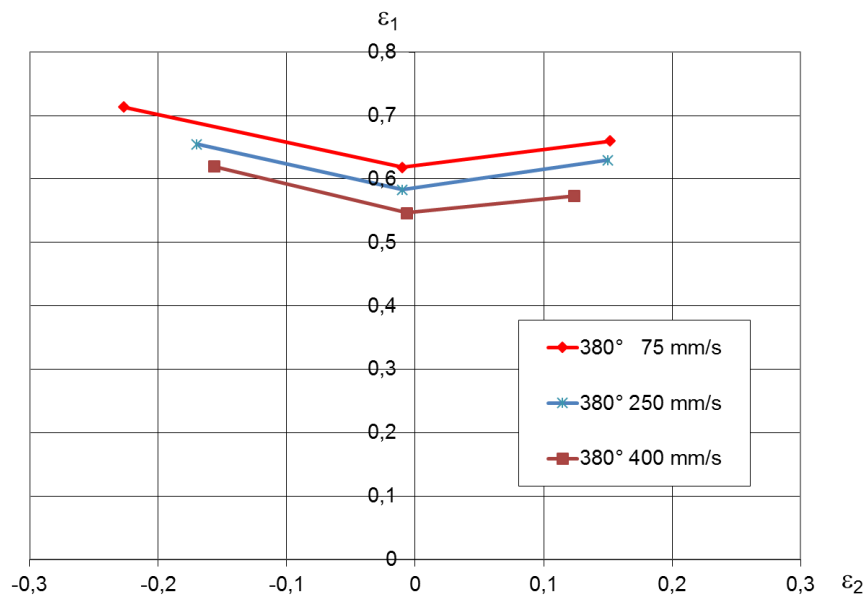
A 9. ábrából jól látható, hogy az alakítási határgörbe (FLC) a $T=350$ és 380°C hőmérsékleteken követi azt a tendenciát, amelyet az egytengelyű meleg szakítóvizsgálatoknál is tapasztaltunk, azaz a hőmérséklet növelésével az alakíthatóság a teljes alakváltozási tartományban növekedett. A $T=420^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten azonos alakítási sebességgel meghatározott alakítási határgörbe, a várakozásunkkal szemben mind a 350°C , mind pedig a 380°C hőmérsékletű FLC-hez képest kisebb alakíthatóságot mutat. Ugyanakkor azt is megállapíthatjuk, hogy a három különböző hőmérsékleten, azonos alakítási sebességgel ($v=250$ mm/s) felvett alakítási határgörbék lényegében követik azt a tendenciát, amit az egytengelyű szakítóvizsgálatoknál is tapasztaltunk. Ennek fémtani, anyagtudományi magyarázatoként az ott leírtakat tekintjük érvényesnek.

A következő kísérletsorozatban az alakítási sebesség hatását elemeztük az 6. táblázatban megadott paraméterekkel, nevezetesen a legkedvezőbb alakíthatóságot eredményező $T=380^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten, három különböző ($v=75$, 250 és 400 mm/s) alakítási sebességgel határoztuk meg az AA7075 alumínium ötvözetre vonatkozó alakítási határgörbét.



9. ábra. Az AA7075 alumínium ötvözet alakítási határdiagramja különböző hőmérsékleteken, $v=250$ mm/s alakítási sebesség esetén

A 10. ábrából jól látható, hogy az alakítási határgörbék helyzete $T=380^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten az elvárt módon követi az alakíthatóság változását az alakítási sebesség változásával, nevezetesen a növekvő alakítási sebességgel az alakítási határgörbék a csökkenő alakíthatóság irányába tolódnak el.



10. ábra. Az AA7075 alumínium ötvözet alakítási határdiagramja különböző alakítási sebességek esetén, $T=380^{\circ}\text{C}$ alakítási hőmérsékleten

4. Összefoglalás

A cikkben a LoCoMaTech – Low Cost Materials Processing Technologies for Mass Productions of Lightweight Vehicles elnevezésű – H-2020 Európai Unió projektben a Miskolci Egyetem Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézetének közreműködésével végzett alakítástechnológiai kutatásokról adtunk rövid áttekintést.

A projekt keretében 9 ország 19 intézménye vett részt a Hot Forming and Quenching (HFQ®) eljárás ipari hasznosítását megalapozó, sokoldalú kutatómunkában. Az intézet projektben közreműködő munkatársainak egyik fő kutatási feladatát képezte a nagyszilárdságú alumínium ötvözetek – különösen az AA7075 repülőgépipari és autóipari alkalmazások szempontjából kiemelt jelentőségű alapanyag – melegalakítási körülmények közötti viselkedésének vizsgálata. E témakörben, az alakítás szempontjából kiemelten fontos két területet elemeztünk, nevezetesen, az ötvözet valódi feszültség-valódi nyúlás görbével jellemezhető keményedési tulajdonságait, valamint az ötvözet melegalakítási körülmények közötti alakíthatóságát, amelyet az alakítási határdiagramok különböző hőmérsékleten és változó alakítási sebességekkel meghatározott alakítási határdiagramjainak a felvételével vizsgáltunk.

Köszönetnyilvánítás

A cikk a “Low Cost Materials Processing Technologies for Mass Production of Lightweight Vehicles (LoCoMaTech)” projekt keretében végzett kutatómunka eredményeiből közölt szemelvényeket. A projekt az European Commission támogatásával valósult meg (Grant No: H2020-NMBP-GV-2016), amelyért a szerzők e helyen is köszönetüket fejezik ki.

Irodalom

- [1] Lin, J.: Fundamentals of materials modelling for metals processing technologies, World Science Publication Co. – Imperial College Press, 2015. pp. 1-512.
- [2] Lin, J., Cao, J. and Balint, D.: Development of unified constitutive equations for hot forming processes, Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 4 (2011) pp. 387-401.
<https://doi.org/10.1504/IJMMS.2011.043078>
- [3] Tisza, M., Kovács, P., Kuzsella, L., Lukács, Zs.: Recommendation of material testing for the HFQ® forming, Research Report in LoCoMaTech H-2020 project (H2020-NMP-08-2016), University of Miskolc, Miskolc, 2018. pp. 1-31.
- [4] Dynamic Systems Inc. Gleeble-3500 thermo-mechanical physical simulator, <https://www.leeble.com/products/leeble-systems/leeble-3500.html>
- [5] Wang, L., Strangwood, M., Balint, D., Lind, J., Dean, T.: Formability and failure mechanisms of AA2024 under hot forming conditions, Materials Science and Engineering, 528 (2011) pp. 26448-2656. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.084>
- [6] Tisza, M., Budai, D., Kovács, P., Lukács, Zs.: Investigation of the formability of aluminium alloys at elevated temperatures, Materials Science and Engineering 159 (2016) 012012
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/159/1/012012>
- [7] Kovács, P.: Alakítási határdiagramok elméleti és kísérleti elemzése, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2012. pp. 1-123.