

ALAKÍTÁSTECHNOLÓGIAI KUTATÁSOK A LOCOMATECH H-2020 PROJEKT BEN

FORMING RESEARCHES IN THE LOCOMATECH H-2020 EUROPEAN PROJECT

Gál Gaszton*, Gál Viktor**, Kovács Péter Zoltán***, Kuzsella László***,
Lukács Zsolt***, Prof. Tisza Miklós****

ABSTRACT

In this paper, the formability investigations and their results achieved within the LoCoMaTech H-2020 project are summarized. This Joint European project was realized 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.

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 előállításának, az ún. Hot Forming & Quenching (HFQ™) szabadalmaztatott eljárás optimális alakítástechnológiai megoldásainak kidolgozása és a tömeggyártásba történő bevezethetőségének vizsgálata, előkészítése.

A projektben 9 Európai Unió országából összesen 19 partner intézmény vett részt (egyetemek, kutatóintézetek, alapanyaggyártó és autóiipari vállalatok). 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.

A Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Intézet Tanszékének fő feladatát a nagyszilárdságú alumínium ötvözetek (AA6082 és AA7075) alakításával kapcsolatos mechanikai és alakíthatósági vizsgálatok, valamint a hagyományos autóiipari anyagok helyettesítésére alkalmas anyagok kiválasztása és a projekt alapját képező Hot Forming & Quenching eljárás virtuális mérnöki módszerekkel való tervezése képezte. Ebben a cikkben röviden ezekről a vizsgálatokról és a kapott eredményekről számolunk be. A vizsgálatok és az eredmények ismertetése előtt röviden bemutatjuk a Hot Forming & Quenching eljárás legfontosabb jellemzőit.

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 előállításának, 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 autóiiparral 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 autóiipari alkatrészek többségét – különösen az ún. Body-in-White, azaz a karosszéria elemeket – vékonylemezből, képlékenyalakítással gyártják, tehát az alakíthatóság kiemelt fontosságú az autóiiparban. A megoldás ezért olyan technológiai folyamat alkalmazása, amelynél az alakítás során az alkalmazott

* címzetes egyetemi docens, Miskolci Egyetem Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet

** PhD hallgató, Miskolci Egyetem Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet

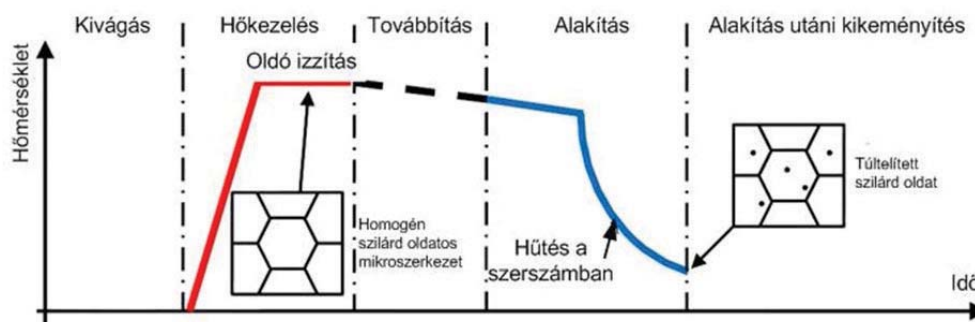
**** professor emeritus, Miskolci Egyetem Anyagszerkezettani és Anyagtechnológiai Intézet

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 AA7xxx ötvözetsor, ezen belül is az AA7075 (Al-Zn-Mg-Cu) ötvözet felel meg.

Az AA7075 alumínium ötvözet a repülőgépipar és egyre inkább az alumínium karosszériát fejlesztő autóipar 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) igényelhet. Ezt az időt azzal csökkenthetjük az ipari gyártási folyamatba beilleszthető ciklusidő elérése érdekében, hogy a szilárdságnövekedést biztosító kikeményítő hőkezelést, a gyártási folyamatba 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 alapve-

tően 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 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; 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 anyagjellemzői

3.2.1. A vizsgált anyagminőségek

A HFQ® eljárásnál alkalmazott AA7075 nagyszilárdságú alumínium ötvözet mechanikai anyagvizsgálatához a lemez alapanyagokat részben a francia Constellium (CTE) projektpartner, részben az Amari Kft. (Magyarország) biztosította. A párizsi székhelyű Constellium cég a világon meghatározó szerepet tölt be a nagyszilárdságú alumínium alapanyagok fejlesztésében és gyár

tásában. A világszerte számos leányvállalattal rendelkező cég a repülőgépipar és az autópár meghatározó alapanyag beszállítója.

Az 1. táblázat az AA7075 anyagminőség vegyi összetételét mutatja az elemek tömegszázalékában, míg a 2. táblázat a legfontosabb mechanikai anyagjellemzőket ($R_{p0,2}$, R_m , A_{80} , HB) tartalmazza az AA7075 anyagminőség szállítási állapotára (T6 hőkezelési állapotra) vonatkozóan. A T6 hőkezelési állapot az oldó izzítást követően teljes mértékben mesterségesen öregített, kikeményített állapotot jelent.

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

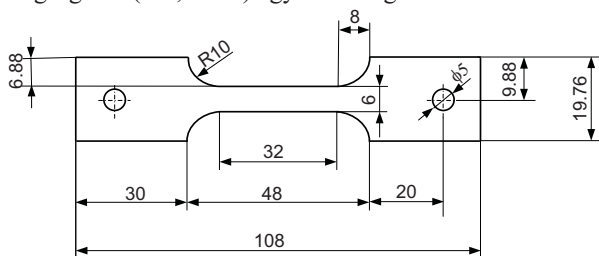
Al	Mg	Si	Zn	Cr	Mn	Cu	Ti	Fe	Egyéb egyenként	Egyéb összes
87,1-91,4	2,1-2,9	max 0,4	5,1-6,1	0,18-0,28	max 0,3	1,2-2,0	max 0,2	max 0,5	max 0,05	max 0,15

2. táblázat. Az 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

3.2.2. Az AA7075 alumínium ötvözet mechanikai anyagvizsgálata

A vizsgálatokat az előzőekben ismertetett, anyagminőségekből készített lemez próbatesteken végeztük. A próbatestek kialakítása és méretei a 2. ábrán láthatók. A próbatest lemezvastagsága az alapanyag lemezvastagságával ($t=2,0$ mm) egyezett meg.



2. ábra. A lemez próbatest alakja és méretei

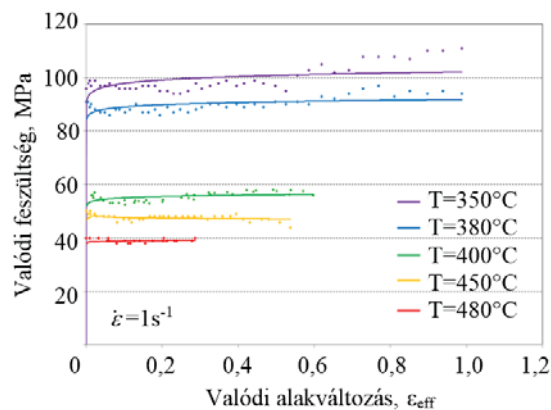
3. táblázat. A vizsgálati mátrix az alkalmazott hőmérséklet és alakváltozási sebesség értékekkel

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

Az egytengelyű húzóvizsgálatokat az intézetünkben található Gleeble-3500 termomechanikus fizikai szimulátoron [3] végeztük a hőmérséklet és az alakváltozási sebesség szabályozása érdekében. A vizsgálatokat a 3.

táblázatban összesített vizsgálati mátrixban összefoglalt paraméterekkel végeztük.

A meleg szakítóvizsgálatok valódi feszültség-valódi alakváltozás diagramjai ($\dot{\varphi}=1/s$ állandó alakváltozási sebességgel felvett mérési eredmények $T=350-480^\circ\text{C}$) a 3. ábrán láthatók.



3. ábra. Melegszakító vizsgálati diagramok

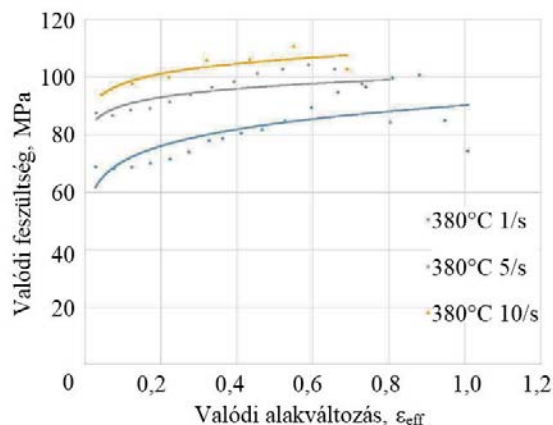
A diagramok elemzéséből az alábbi lényeges következtetések vonhatók le:

- 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 [4];

- a mért valódi alakváltozások a $T=350-400^{\circ}\text{C}$ -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. A szakadásig elviselt nyúlás csökkenését a magasabb hőmérsékleten ($T>450-480^{\circ}\text{C}$) a szemcsék közötti törési folyamatok mechanizmusainak dominánsá válásával indokolták [5].

Az alakváltozási sebesség ($\dot{\epsilon}$) hatását a 4. ábra mutatja.



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

A diagramok elemzéséből az alábbi lényeges következtetések vonhatók le:

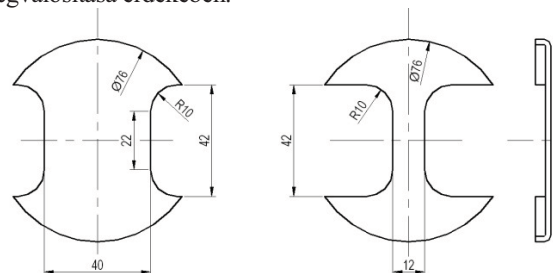
- a valódi feszültség értékek a növekvő alakváltozási sebességekkel növekednek, amint az a melegalakító eljárásoknál általánosan ismert;
- a növekvő alakváltozási sebességekkel a szakadásig elviselt nyúlás csökkenése is megfigyelhető: ez ugyancsak összhangban van a melegalakításnál tapasztaltakkal.

3.2.3. Az AA7075 alumínium ötvözet alakíthatósági vizsgálata

Az alakíthatósági vizsgálatokat a Constellium (CTE) projekt partner által rendelkezésünkre bocsátott AA7075 anyagminőségű, $t=2,0$ mm vastagságú, lemezanyagokon végeztük. A vizsgálatokat ugyancsak a Gleeble-3500 termomechanikus fizikai szimulátorral, izotermikus vizsgálati körülmények között, a tanszékünkön kidolgozott módosított Nakajima vizsgálat szerint végeztük.

A különböző alakváltozási állapotok eléréséhez a 76 mm átmérőjű, tele tárcsán kívül további két próbatestet használtunk, amelyek az 5. ábrán láthatók. A próbatestek különböző hídszélességei (w) az egytengelyű húzás állapotának ($w=12$ mm), a síkalakváltozási állapotnak ($w=40$ mm) és a kéttengelyű nyújtásnak ($w=76$ mm)

megfelelően változtak a különböző alakváltozási útvonalak megvalósítása érdekében.



5. ábra. Próbatest alakok

Az alakíthatósági vizsgálatoknál különböző hőmérsékleteket és sebességeket alkalmaztunk ezek hatásainak elemzésére. Először $v=250$ mm/s állandó sebességgel végeztük az alakításokat különböző hőmérsékleteken ($T=350^{\circ}\text{C}$, 380°C , 420°C), majd ezt követően állandó hőmérsékleten $T=380^{\circ}\text{C}$ -on különböző sebességekkel ($v=75$ mm/s, 250 mm/s és 400 mm/s) végeztünk vizsgálatokat. A vizsgálati mátrixot az alkalmazott hőmérsékleti és alakítási sebesség értékekkel a 4. táblázat mutatja.

4. táblázat. Az alakíthatósági vizsgálatoknál alkalmazott technológiai paraméterek mátrixa

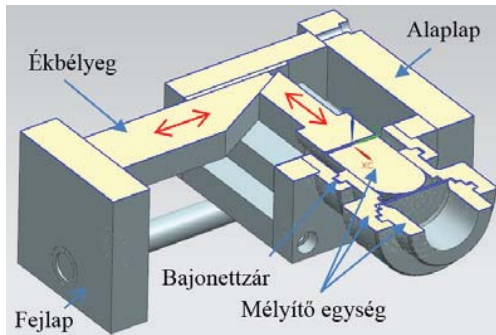
Alakítási sebesség, v (mm/s)	Hőmérséklet, $^{\circ}\text{C}$		
	350 $^{\circ}\text{C}$	380 $^{\circ}\text{C}$	420 $^{\circ}\text{C}$
75 mm/s		✓	
250 mm/s	✓	✓	✓
400 mm/s		✓	

Az FLC alakíthatósági vizsgálatokhoz is a Gleeble anyagvizsgáló berendezést használtuk. Ez a berendezés – megfelelő készüléket alkalmazva – lehetővé teszi az alakítási sebesség különböző értékeinek pontos beállítását, illetve a sebesség állandó értéken tartását.

A próbatest alakítása közben az alakváltozás optikai úton történő nyomon követése érdekében a Gleeble rendszerhez egy speciális vizsgáló berendezést valószínűsítettünk meg.

A Gleeble berendezésre tervezett és legyártott készülék lehetővé teszi az alakítási határdiagram meghatározására tervezett hőmérséklet és alakváltozási sebesség értékek megbízható megvalósítását, a próbatest alakváltozásának folyamatos nyomon követését, a próbatestek gyors és megbízható befogását az alakítás során, valamint a módosított Nakajima próbatestek és a hozzátartozó bélyeg-matrica pár befogadását. A speciális vizsgáló készülék kinematikai működési elve a 6. ábrán látható.

A készülék kulcseleme az alakító bélyeg mozgását működtető ékbélyeg. Ez a megoldás teszi lehetővé az elmozdulások olyan transzformációját, amellyel az alakítás teljes folyamata vizuálisan is nyomon követhető.



6. ábra. A mélyítő készülék kinematikai működési elve

A 4. táblázatban látható vizsgálati mátrixnak megfelelően különböző hőmérsékleteken alakított próbatest sorozatokról készített felvételt mutat a 7. ábra.



7. ábra. Különböző hőmérsékleteken ($T=350^{\circ}\text{C}$, 380°C , 420°C), állandó sebességgel ($v=250\text{ mm/s}$) alakított próbatest sorozat

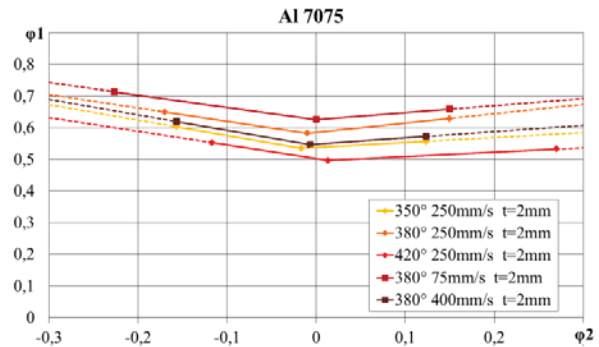
Az alakváltozások kiértékelését a Vialux-AutoGrid optikai alakváltozás mérő- és kiértékelő berendezéssel végeztük.

A kísérleti eredményekből megszerkesztettük az AA7075 alumínium ötvözet alakítási határdiagramját (FLD). A 8. ábra egybe foglaltan mutatja a $v=250\text{ mm/s}$ állandó alakítási sebességgel $T=350^{\circ}\text{C}$, 380°C és 420°C hőmérsékletekre vonatkozó alakítási határgörbékét, valamint a $T=380^{\circ}\text{C}$ -on, $v=75\text{ mm/s}$, 250 mm/s és 400 mm/s alakítási sebességgel elvégzett kísérletek eredményeit.

A 8. ábrából jól látható, hogy az alakítási határgörbe (FLC) a hőmérséklet növelésével $T=380^{\circ}\text{C}$ -ig a teljes alakváltozási tartományban növekedett. A $T=420^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten azonos alakítási sebességgel meghatározott alakítási határgörbe a 350°C hőmérsékletű FLC-hez képest is kisebb értékeket mutat.

A legkedvezőbb alakíthatóságot eredményező $T=380^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten, három különböző ($v=75\text{ mm/s}$, 250 mm/s és 400 mm/s) alakítási sebességgel határoztuk meg az AA7075 alumínium ötvözetre vonatkozó alakítási határgörbékét. A 8. ábrából az is 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 alakíthatósági értékek irányába tolnának el.



8. ábra. Az AA7075 alumínium ötvözet alakítási határdiagramja különböző hőmérsékleteken, $v=250\text{ mm/s}$ alakítási sebesség esetén, és $T=380^{\circ}\text{C}$ alakítási hőmérsékleten különböző alakítási sebességek esetén

4. A HOT FORMING & QUENCHING ELJÁRÁS NUMERIKUS MODELLEZÉSE

A járműipari lemezalkatrészek jelentős hányada még napjainkban is hideg képlékenyalakítással készül, az alkalmazásokat tekintve az új innovatív alapanyagok és feldolgozó technológiai eljárások egyre növekvő aránya ellenére is. A hidegalakítás területére koncentrálna napjaink szerszámüzemeiben a technológiai- és szerszámtervezés napi gyakorlata az egyes technológiai elképzelések virtuális térben történő ellenőrzése, fejlesztése. Az erre a területre orientált numerikus technológiai modellező szoftverek a tervezés teljes spektrumát támogatják a koncepciók kidolgozásától a tényleges szerszámfelületek (CAD modellek), valós technológiai paraméterekkel történő virtuális alakítástechnológia elemzésével bezárólag.

A Miskolci Egyetem Anyagszerkezzetani és Anyagtechnológiai Intézete számos publikációban mutatta be az utóbbi néhány évtizedben miként és hogyan segítik ezek a célorientált alkalmazások a tervezési folyamatot. Ezekben részletesen elemeztük a szoftverek logikai felépítését, működését, a modellezéshez szükséges anyagparamétereket is áttekintve.

E publikáció ezért elsősorban a hidegalakítással megmunkált lemezek és az HFQTM technológiai modellezésének különbségeire fókuszál egy konkrét autóiipari lemezalkatrész technológiai tervezésének, numerikus modellezéssel történő elemzésével.

A LoCoMaTech projekt egyik fő célkitűzése, hogy a sorozatgyártásban alkalmazni kívánt HFQTM technológia bevezethetőségét konkrét autóiipari lemezalkatrészen keresztül is megvizsgálja. A projekt e részét vezető CRF (Centro Ricerche FIAT) projektpartner javaslatára több konkrét gyártmány került kiválasztásra: ezek egyike egy A-oszlop merevítő elem, amelynek CAD modellje látható a 9. ábrán.



9. ábra. A-oszlop merevítő elem geometriája

Az alkatrész alapanyaga eredetileg 22MnB5 anyagminőségű, 1.2 mm lemezvastagságú, bór-ötvezésű Mn-acél. Az alkatrész gyártási technológiája az ún. HPF[®] (Hot Press Forming) eljárás, ami egy melegalakító lemezsajtolási eljárás.

A technológiai és szerszámtervezés területéről a fő kihívás, hogy a hidegalakításnál már ipari szabványként bevezetett alakítási folyamatok numerikus modellezését végző szoftverek képesek-e, és ha igen milyen változtatásokkal képesek támogatni a technológiai- és szerszámtervezési folyamatokat meleg alakítás esetén.

4.1. A melegalakítás numerikus modellezési sajátosságai

Az elmúlt 20 évben az autóiipari lemezanyagok jelentős változáson mentek keresztül. Az egyik ilyen nagy változás a Mangán-acélok (22MnB5) sorozatgyártásban történő bevezetése volt [6]. Mivel ennek az anyagminőségnek az alakítására kidolgozott Hot Press Forming HPF[™] már megkövetelte a modellező szoftverekben is a termo-mechanikai szemléletű modellalkotást, ezért önmagában a melegalakítási folyamat több éve megfelelő pontossággal modellezhető. A hidegalakítási folyamatok modellezéséhez képest a legnagyobb eltérést az anyagparaméterek hőmérséklet és alakváltozási sebesség függése jelenti és az, hogy a szerszámelemek, a munkadarab és a környezet között hőátadási-hővezetési folyamatok játszódnak le, amely ugyancsak megköveteli az ezt leíró anyagparaméterek figyelembevételét.

4.1.1. Anyagmodell

A lemezek alakítására kidolgozott numerikus modellező alkalmazások anyagmodelljei alapvetően négy fontos bemeneti anyagparaméter-csoport megadását igénylik hidegalakítási folyamatok esetén. A következőkben a hideg és a melegalakítási eljárásoknál alkalmazható anyagmodellek bemeneti paramétereinek különbözőségeit foglaljuk össze.

Az első a rugalmas tartomány leírása, amit hidegalakításnál a rugalmassági modulus egyértelműen meghatároz. Melegalakítás során a rugalmassági modulus hőmérséklet függése megadható, bár ezt sokszor (mivel alapjaiban nagy képlékeny alakváltozások zajlanak az alakítás során) az ipari gyakorlatban elhanyagolják, és hőmérséklettől független paraméterrel veszik figyelembe.

A másik nagy csoportot, a folyási feltételek képezik, amelyek az anyag anizotrópiáját is figyelembe veszik.

Ehhez ismerni kell a nem-alakított állapothoz tartozó folyáshatárt és az anizotrópia tényezőket. Mindkét paraméter a melegalakítás során függ a hőmérséklettől, de meghatározásuk visszavezethető különböző hőmérsékleteken végzett szakító vizsgálatokra, a hengerlés irányához képest különböző irányokban kimunkált próbatesteken.

A harmadik paramétercsoport az anyag alakítási keményedésével függ össze. Ezt a klasszikus hidegalakítási folyamatoknál az ún. folyási görbe függvényvel visszük be a szoftverbe. Melegalakítási folyamatoknál folyási görbesereget használunk, amit lehetőleg az alakítás hőmérséklettartományának ismeretében megfelelő osztásközzel megválasztott hőmérsékleteken és különböző alakváltozási sebességekkel végzett melegsakító vizsgálatokkal határozunk meg (ld. 3.2. pont). Egy ilyen vizsgálat eredményeit mutatja a 4. ábra.

A negyedik anyagparaméter-csoport az anyag alakíthatósági határállapotát határozza meg a lemezalakítás területén általánosan elterjedt alakítási határdiagram segítségével. Az alakítási határdiagram meghatározása hidegalakításnál, szabványosított technológiai vizsgálattal (ISO 12004) elvégezhető. A szabványban előírt módon az alakítási határdiagram meghatározása melegalakítás esetén nehézségekbe ütközik, leginkább a teljes vizsgálati idő alatt biztosítandó homogén hőmérséklet biztosítása miatt.

E probléma egy lehetséges megoldását a 3.2. alfejezet mutatta be, de a mérések eredményeként meghatározott 8. ábrának megfelelő FLC görbesor közvetlen bevitelével a numerikus alkalmazásba még jelenleg sem teljesen megoldott. Ezért az ipari gyakorlatban többnyire a lemez egy meghatározott vékonyodását (jellemzően 30%) tekintik határállapotnak. Ez az alkatrész funkciója szempontjából szigorúbb kritérium, mint a tényleges szakadási állapot.

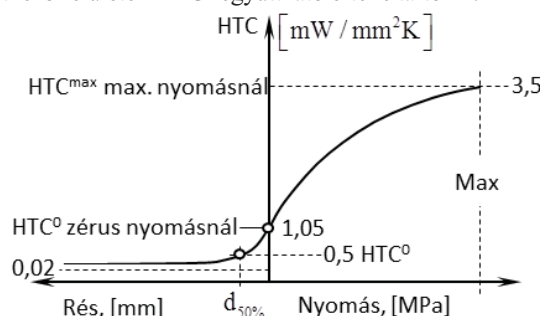
Az anyagparaméterek melegen történő meghatározásában a már tömeggyártásban alkalmazott HPF[®] és a HFQ[™] technológia között alakításelméleti szempontból nincs különbség. A különbséget a számszerűsített eredmények tekintetében lehet felfedezni, mivel a fémtanilag különböző anyagok és különböző technológiai paraméterek (alakítási hőmérséklet tartomány) alapvetően melegalakítási eljárásokhoz kapcsolódnak.

4.1.2. Hőátadási, hővezetési kérdések

Melegalakítási folyamatok modellezésénél a szerszámok és a lemezanyag hőmérséklet különbségéből adódóan hőátadási és hővezetési jelenségek is lejátszódnak kiegészülve a környezeti hőmérséklet és az alakításban aktívan részt vevő geometriai elemek hőmérséklet különbségéből adódó hőátadás folyamataival. Ezek modellezéséhez alapvetően a hővezetési és hőátadási együtthatók ismerete szükséges. Mivel e paraméterek értékei a hőmérséklet függvényében is változnak érdemi modellezési eredményekhez ezek bevitelével az adott szoftverkörnyezetbe elengedhetetlen, amire az egyes szoftverek lehetőséget is biztosítanak.

A lemezalakítási technológiák sajátossága, hogy az egyes szerszámfelületeken fellépő felületi nyomások egy szerszámfelület tekintetében is a helykoordináta és az idő szerint is változnak és egyes esetekben akár extrém nagy lokalizált felületi nyomásértékek is létrejöhetnek. Ez a jelentősen befolyásolja a hőátadási tényező értékét, amit szintén figyelembe kell venni a modellalkotás során.

Erre dolgozták ki az AutoForm programrendszerben a 10. ábrán bemutatott diagramot. A 10. ábra baloldali része írja le azt az állapotot, amikor az adott szerszámfelület még nem érintkezik a lemezzel és közöttük definiálja a rés fogalmát. Az ábrából nyilvánvaló, hogy ha a lemez és a szerszám között kellően nagy rés van, akkor a szerszám hőátadási tényezője megegyezik a környezet (levegő) hőátadási tényezőjével ($HTC=0,02 \text{ mW/mm}^2\text{K}$). Ahogy a szerszám közeledik a lemezhez a hőátadási együttható növekedni kezd és a $d_{50\%}$ résméretnél eléri a zérus nyomással érintkező hőátadási együttható ($HTC^0=1,05 \text{ mW/mm}^2\text{K}$) 50%-át. A nulla résmérethez az érintkező felületek HTC^0 együttható értéke tartozik.



10. ábra. Hőátadási tényező résméret és felületi nyomás függése

A 10. ábra jobb oldala mutatja az érintkezési ponttól felépülő felületi nyomás értékének függvényében a hőátadási tényező változását. Általános gyakorlati tapasztalat, hogy 20 MPa felületi nyomás felett a HTC^{max} érték, már elhanyagolható mértékben változik.

4.2. A numerikus modellezés összeállítása

A numerikus modellezéssel az volt a célkitűzésünk, hogy megvizsgáljuk, milyen technológiai változtatásokkal tudunk egy ismert geometriájú HPF® technológiával megvalósított alkatrészgyártást, a tömegcsökkenés szempontjából áttervezni, AA7075 nagyszilárdságú Al-ötvözet alapanyagra, a nyilvánvaló technológiai változtatások mellett.

Ez egyben arra is alkalmas, hogy megvizsgáljuk a HFQ™ technológia AutoForm programrendszerben történő numerikus modellezésének lehetőségét.

Az alkatrész átvételi kritériumai a tényleges fizikai gyártás során ismertek voltak. Az egyik legszigorúbb kritérium, hogy a lemez vékonyodása sehol nem érhet el 30%-nál nagyobb értéket. A vizsgálati stratégiánk az volt, hogy a szerszámkonceptiót és a terítékalakot nem

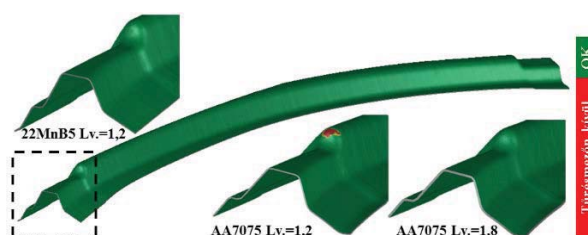
változtatva, legyártható-e az alkatrész az ismert átvételi kritériumokkal úgy, hogy lényegében csak a teríték alapanyagán és az ezzel összefüggő alakítási hőmérsékleten változtatunk.

A modellezés összeállításának részleteit a területi korlátok miatt itt részletesen nem ismertetjük. A technológiai paramétereikről, a projekt bizonyos kötelezettségei miatt csak az alakítás kezdeti hőmérsékletét közöljük, ami 350°C-os terítéket jelent.

4.3. Az eredmények kiértékelése

A numerikus megvalósíthatósági vizsgálat egyik legkritikusabb eredmény változója, hogy az előírt 30%-os vékonyodást tartani tudjuk.

A 11. ábrán, a vizsgált alkatrész egyes numerikus modellezési eredményei láthatók a lemezevékonyodást megjelenítve. Az AutoForm programrendszer lehetőséget biztosít arra, hogy ne csak az egyes eredményváltozó számszerűsített eloszlását jelenítse meg egy színskálához rendelt, hanem azt is, hogy az ipari szemléletmódot jobban tükrözően, az előírt tűrésmezőn belüli értékekhez zöld színt rendelve, a tűrésmezőn kívüli értékekhez piros színt rendelve rámutasson azokra a területekre ahol tűrésmezőn kívüli eredményváltozó értékek jelenhetnek meg.



11. ábra. Modellezési eredmények a vékonyodás ábrázolásával az alkatrész (vékonyodás szempontjából) kritikus területén

A 11. ábrán az látható, hogy az alakítás vékonyodás szempontjából legkritikusabb része a rádiuszok összefutásánál az alkatrész egyik legmagasabb pontján jelentkezik. Ezt a 22MnB5 alapanyaggal 1,2 mm-es lemezevastagságú terítéssel sikeresen meg lehetett valósítani.

Az alapanyag változtatás (AA7075) első lépésében az Al-ötvözetnél is ezt az 1,2 mm-es terítékvastagságot alkalmaztuk. A 11. ábra középső részén látható, hogy ebben az esetben nem megengedett mértékű vékonyodást tapasztaltunk a kritikus területen.

Ezt követően 0,3 mm-enként növeltük az AA7075 teríték lemezevastagságát. Ennek a vékonyodás szempontjából összefoglalt eredményét tartalmazza az 5. táblázat. Az 5. táblázat vékonyodásokat összefoglaló sorában látható, hogy az AA7075 alapanyaggal csak 1,8 mm-es teríték méret esetén tudjuk tartani az előírt vékonyodási értéket a 22MnB5 acél alapanyag 1.2 mm-es lemezevastagságához képest.

Mivel a HFQTM technológia sikeres alkalmazásának egyik fő célja az új alapanyag és technológiai eljárás tömegcsökkentő hatása ezért érdemes azt is megvizsgálni, hogy egy lehetséges anyag- és technológiaváltás ezen a téren milyen változást eredményezne.

5. táblázat. Eredmények összevetése

Teríték anyaga	Lv. mm	Tömeg kg	Vékonyodás ε (%)
22MnB5	1,2	1,15	28
	1,2	0,42	42
AA7075	1,5	0,52	37
	1,8	0,62	29

Az 5. táblázatból jól látható, hogy az alapanyagváltással, bár a vékonyodás megfelelő határok közötti tartása miatt növelt lemezzvastagsággal, de még így is 46%-os tömegcsökkentés valósítható meg.

Ez a numerikus kísérlet annak igazolására is alkalmas, hogy a technológiai- és szerszámtervezést támogató szoftverek kis módosításokkal alkalmasak a HFQTM és hasonló melegalakító lemezalakítási technológiák numerikus modellezésére. A hideg- és a melegalakítás közötti váltás inkább az anyagparaméterek meghatározásánál okoz nehézségeket.

5. 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 Intézet Mechanikai Technológiai Intézet Tanszékének közreműködésével végzett alakítás-technológiai 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 feszültségvalódi 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.

A projektben fontos feladatunkat képezte a tömegcsökkentés érdekében alkalmazható könnyűfém helyet-

tesítő anyag numerikus modellezésének vizsgálata is. E vizsgálatok keretében kimutattuk, hogy a sikeres alakítás az új anyag alkalmazásával rendszerint további, technológiai módosításokat is igényel. Az acél alapanyagok alumínium ötvözetekkel való helyettesítése esetenként alakíthatósági problémákat eredményezhet, amely gyakran áthidalható az áttervezett alkatrész lemezzvastagságának növelésével. Bár a lemezzvastagság növelése a tömegcsökkentés szempontjából kedvezőtlen, ugyanakkor a lényegesen kisebb sűrűségű alumínium ötvözet alkalmazásával még így is jelentős – mintegy 46%-os – tömegcsökkentés érhető el a példaként bemutatott alkatrésznél.

6. 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.

7. 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.
- [3] Dynamic Systems Inc. Gleeble-3500 thermo-mechanical physical simulator, <https://www.bleeble.com/products/bleeble-systems/bleeble-3500.html>
- [4] Tisza, M., Kovács, P., Kuzsella, L., Lukács, Zs.: Recommendation of material testing for the HFQ® forming, Research Report in LoCoMaTech H-2020 project (NMP-08-2016), University of Miskolc, Miskolc, 2018. pp. 1-31.
- [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.
- [6] Tisza, M.: Development of Lightweight Steels for Automotive Applications, in: High Entropy Steels and Alloys, Intech Open Publ, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.91024>