



Acélcsőbe töltött alumíniummátrixú szintaktikus fémhabok egylépéses gyártása

Fabrication of In-situ Syntactic Aluminium Foam-Filled Steel Tubes

Pados Gábor,^{1,2,a*} Kemény Alexandra,^{1,2,b} Szovák Benedek,^{1,2,c} Károly Dóra,^{1,2,d}
Orbulov Imre Norbert^{1,2,e}

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Budapest, Magyarország.

² MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország.

^{a*} padosgabor@edu.bme.hu, ^b kemeny.alexandra@gpk.bme.hu, ^c szovak.benedek@edu.bme.hu,

^d karoly.dora@gpk.bme.hu, ^e orbulov.imre.norbert@gpk.bme.hu

Abstract

In all areas of industry, when choosing a material, compromises must be made since there is no material with all the properties that are preferential for any use. In the automotive sector, lighter and less dense materials can provide a considerable advantage, for example, lower fuel consumption due to weight reduction. Specialists dealing with materials science within metal foams have been trying to exploit the low density, high specific strength and high energy absorption capacity of metal foams in as many ways as possible for a long time. This research describes the one-step production method of syntactic metal foams with an aluminum matrix infiltrated into a thin-walled steel tube, intended to create functional structures with a strong adhesive bond and metal foam filling in a feasible way.

Keywords: *metal matrix syntactic foam, foam-filled tubes, low-pressure infiltration.*

Összefoglalás

Az ipar minden területén, amikor anyagválasztásra kerül sor, kompromisszumokat kell kötni, hiszen nincsen olyan anyag, amelynek minden tulajdonsága kedvező lenne bármely felhasználásra. A járműiparban a könnyebb és kisebb sűrűségű anyagok nagy előnyt jelentenek, például a tömegcsökkenés következtében elérhető kevesebb üzemanyag-fogyasztás miatt. Az anyagtudománnyal, azon belül is a fémhabokkal foglalkozó szakemberek régóta igyekeznek a fémhabok kis sűrűségét, nagy fajlagos szilárdságát és nagy energiaeinyelő képességét a lehető legtöbb módon kiaknázni. Ebben a kutatásban vékony falú acélcsőbe infiltrált, alumíniummátrixú, szintaktikus fémhabok egylépéses gyártási módszerét ismertetjük, amely erős adhéziós kötésű, fémhab töltetű funkcionális szerkezetek létrehozására hivatott, kivitelezhető módon.

Kulcsszavak: *fém mátrixú szintaktikus hab, habbal kitöltött csövek, kisnyomásos infiltrálás.*

1. Bevezetés

A szintaktikus fémhabokat legtöbbször önmagukban állítják elő, és nem funkcionális szerkezeti elemekként [1–3]. A közelmúltban viszont egyre több kutatás foglalkozik a fémhabbal kitöltött csövekkel, amelyek valamilyen falvastagságú csövekbe helyezett fémhabokat tárgyalnak. Ugyanis

a fémhabok tulajdonságait tovább növelhetjük, ha adott (fém) anyagú, tömör vagy üreges zárt-szelvényekbe töltjük őket, és a fémhab töltet és az azt körülvevő zárt-szelvény egymást támasztják meg [4].

A fémhabbal kitöltött csövek jobban ellenállnak a különböző típusú terheléseknek, mint a fémha-

bok magukban. A két legfontosabb igénybevétel ilyen szerkezeteknél a nyomás és a hajlítás, ezért a kutatók főként ezekkel a tulajdonságokkal jellemzik a habbal töltött csöveket. Ezeknek a szerkezeteknek az előállítása kétféle módon történhet: egy lépésben vagy több lépésben. Egylépéses előállítás során a hab gyártási folyamata már eleve a zártszelvényben történik, míg a többlépéses gyártásnál a fémhabot előállítás után megfelelő méretűre megmunkálják, majd csőbe helyezik vagy valamilyen módon rögzítik.

Linul és társai [5, 6] különböző hőmérsékletek hatását vizsgálták csőbe helyezett fémhabok axiális, kvázistatikus zömítésére. Az A356 (AlSi7Mg) zárt cellás habokat bekeveréses öntéssel állították elő és $\varnothing 20 \times 20$ mm-es darabokra vágták. A $0,38\text{--}0,46$ g/cm³ sűrűségű habmintákat $\varnothing 22 \times 20$ mm külső méretű, 1 mm falvastagságú, hengeres X5CrNi18-10 rozsdamentes acélcsövekbe helyezték, ragasztóanyag nélkül. A kvázistatikus zömítővizsgálatokat 10 mm/min keresztfejsebességgel végezték szobahőmérsékleten és emelt hőmérsékleteken (150 °C, 300 °C és 450 °C). Az összesen nyomott mintákat pásztázó elektronmikroszkóppal és optikai mikroszkópos módszerekkel vizsgálták. A hőmérséklet növelésével az alumíniumhab rideg viselkedése képlékennyé változott, 150 °C felett pedig az üres csövek és a habbal töltött csövek közötti csúcspontkülönbség csökkenni kezdett az alumínium habtöltet lágyulása miatt. Azt is megfigyelték, hogy az acélcsőben lévő hab csökkentette a mikrorepedések méretét és eloszlását.

Csak kevés, egy lépésben gyártott fémhabbal kitöltött zártszelvényről szóló tudományos cikk érhető el a szakirodalomban, ezeket foglaljuk össze alább.

Duarte és társai [7] porösszenyomásos habosítási technikával zárt cellás AlSi7 habokat gyártottak tömör alumíniumhéjjal úgy, hogy a habosítható prekurzort AlMgSi0,5 csőbe helyezték, és ott tartották 700 °C-on 12 percig. A gyártási módszer a hab szoros illeszkedését, de a szilárdság és az energiaelnyelés csökkenését eredményezte kvázistatikus és dinamikus axiális összenyomás hatására.

Kemény és társai [8] az egy lépésben létrehozott mintákat kisnyomású infiltrálással gyártották le, ahol az olvadt mátrixanyagot (AlSi12) közvetlenül az AlMgSi0,5 anyagú, duzzasztott agyagkavicsal megtöltött csőbe öntötték. A mátrix és a cső anyagának kis olvadáspontbeli különbsége az infiltrálási paraméterek pontos beállítását követelte meg. Az előállított minták külső átmérője $\varnothing 50$ mm

és belső átmérője $\varnothing 40$ mm volt. Az alkalmazott gyártási eljárás sokban hasonlít a jelen kutatásban alkalmazotthoz, viszont fontos különbség az egylépéses gyártás során alkalmazott cső anyaga és falvastagsága, illetve az alkalmazott berendezésben is különbség lehet fel.

Chilla [9] és kutatócsoportja zárt cellás alumíniumhabbal töltött, X2CrNiMo17-12-2 rozsdamentes acél csöveket vizsgált, amelyek befoglaló méretei $\varnothing 31,7 \times 100$ mm, falvastagsága pedig 1,85 mm volt. Háromféle próbatestet gyártottak, az első típusnál a töltelékül szolgáló fémhabot szoros illesztéssel helyezték bele az acélcsőbe, a második típusú próbatestekben az alumínium prekurzort még habosítás előtt helyezték a csőbe, és ott habosították azzal a céllal, hogy adhézió alakuljon ki a habanyag és a cső anyaga között. A harmadik típusú próbatestekben az acélcsövek belső felületét rézzel galvanizálták a csőben történő habosítás előtt, hogy a rézréteg elősegítse a hab és a cső közötti erős kötés kialakulását. Ez sikeres eljárásnak bizonyult, hiszen az alumínium habosítása után az összefüggő rézbevonat eltűnt, és egy reakciótermék keletkezett a hab és a cső határfelületén, amely alumíniumot, rezet, ónt és vasat is tartalmazott.

Taherishargh és társai [10] egy lépésben csőbe töltött szintaktikus fémhabokat állítottak elő infiltrációs módszerrel vákuum segítségével AlSi7Mg mátrixból és 2–2,8 mm méretű expandált perlitszemcsékből. Az infiltrálás X5CrNi18-10 rozsdamentes acélcsövek belsejében történt, amelyek $\varnothing 25,4$ külső átmérőjű és 0,9 mm, illetve 1,2 mm falvastagságúak voltak. A próbatesteket számítógépes tomográfiával és energiadiszperziós röntgen spektrométerrel (EDS) vizsgálták, illetve kvázistatikus axiális zömítésnek és hárompontos hajlításnak tették ki, előbbi 3 mm/min keresztfejsebességgel, utóbbit pedig 0,1 mm/s és 284 mm/s keresztfejsebességgel 30 mm elmozdulásig vizsgálták. A 0,9 mm-es falú próbatestek általános tulajdonságai jobbakk voltak, és az EDS megerősítette a mátrix és a cső közötti kapcsolatot. A szakítószilárdságot a hajlítási tulajdonságok alapján becsülték.

Movahedi és kutatócsoportja [11] $\varnothing 28 \times 30$ mm-es, szintaktikus fémhabbal körülvett, kör keresztmetszetű zártszelvényeket gyártott egy lépésben ellengravitációs infiltrációval Zn27Al2Cu0,015Mg ötvözetből, 2–2,8 mm-es expandált perlitszemcsékből és AlMgSi0,5 anyagú csövek felhasználásával. Az $\varnothing 12 \times 36$ mm-es, 1,6 mm falvastagságú csövet a forma közepébe helyezték infiltrálás előtt, amely expandált perlitszemcsékkel volt

körülvéve. A pásztázó elektronmikroszkópi képek szoros illeszkedést mutattak a cső és a mátrixanyag között, de az EDS-analízis nem mutatott kémiai reakciót a határfelületen.

2. Felhasznált anyagok

A kutatás során alumíniummátrixú (AlSi10Mn-Mg – Silafont-36) szintaktikus fémhabokat gyártottunk lágyacél (S235) csövekbe, amelyek falvastagsága 1 mm, külső átmérője pedig Ø30 mm volt.

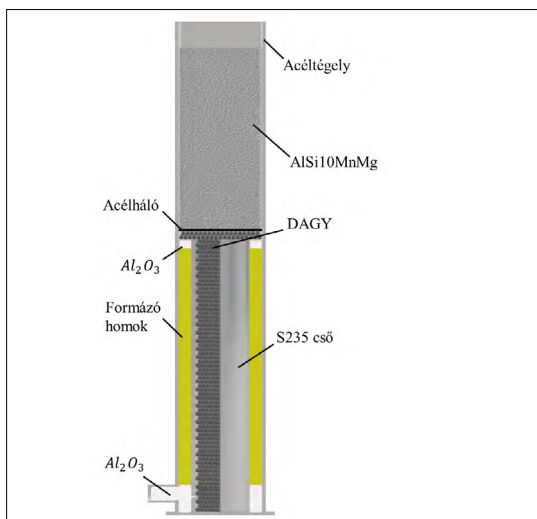
A szintaktikus fémhab töltőanyagaként a Liapor GmbH & Co. KG által forgalmazott duzzasztott agyagkavics (DAGY) részecskéket alkalmaztunk.

3. Egylépéses előállítás

A gyártási folyamat előre legyártott, acélból készült téglék segítségével történt, amelyek 40×50 mm keresztmetszetű, 280 mm magas téglalap alapú, üreges hasábtégelyek voltak, belül a talpazatuk közepéhez pedig vékony falú acélcső volt hegesztve (1. ábra). A folyamat az acéltégely belső felületének és a belehegesztett acélcső külső felének grafitemulzióval történő kikenésével kezdődött. Ezután az acéltégely oldalára hegesztett kivezető csőszakasz és az acéltégelyben lévő vékony falú acélcső közti teret alumínium-oxid paplannal kitöltöttük, amelynek szerepe az olvadék átfolyásának megakadályozása. A vékony falú acélcső oldalán is található egy kilevegőztető furat, aminek a tetejétől további ~5 mm magasságig alumínium-oxid paplan tömés került. Ezt követően erre a vastag paplanrétegre, az acélcső és tégely közti hézagot öntőforma homokkal töltöttük ki, amely homok, bentonit és víz elegyéből

tevéődik össze, így jó tapadást biztosít. A formázó homok funkciója, hogy ha öntés közben az olvadékáram a cső szája mellé folyrna, akkor se folyhasson az acélcső külső feléhez, így elkerülve, hogy felesleges anyagmennyiség hozzátapadjon a később felhasználandó funkcionális szerkezethez. A homok nagy hőterhelhetősége miatt pedig nem fog hozzátapadni az acélcsőhöz, így az öntés után könnyen letisztítható lesz a felületről. A belső cső köré, a felső részéhez is alumínium-oxid paplan tömítést tettünk, illetve a homokrétet tetejére is került egy réteg alumínium-oxid. Az acélcsőbe a megfelelő mennyiségű, Ø3,5–4,0 mm átmérőjű duzzasztott agyagkavics került elhelyezésre, tetején egy rozsdamentes acélhálóval, ami az elmozdulást és az agyagkavicsok felszínre úszását akadályozza meg, illetve egy acélháló feljebb is elhelyezkedett a megfelelő leszorítás biztosítása érdekében.

Az acéltégelyeket ezt követően előhevítés céljából Lindberg/Blue M kemencébe helyeztük, és 400 °C hőmérsékletre hevítettük elő. A kemencében legalább 45 percen át hőn tartottuk, hogy a test minden pontján a kemence hőmérsékletével megegyező legyen a hőmérséklet. Mindez idő alatt a mátrix anyagként szolgáló AlSi10MnMg tömböt IND F-10 indukciós olvasztókemencében vörösen izzó állapotig hevítettük. Ezt az állapotot elérve, az indukciós kemence kikapcsolása után, az olvadék hűlése közben, az olvadék hőmérsékletét egy Maxthermo MD-3003 K típusú digitális hőmérő segítségével mértük. Az alkalmazott mátrixanyag + töltőanyag + vékony falú acélcső rendszerben 820 °C olvadék-hőmérséklet volt szükséges a sikeres gyártáshoz, hogy az infiltrálás a kis előhevítési hőmérséklet mellett is teljesen megtörténjen. Az infiltráláshoz szükséges nyomást jól szigetelt pipán keresztül adtuk rá a tégelyre. A nyomás nagynyomású argon palackból érkezett, az olvadék lenyomására 0,4 MPa nyomást alkalmaztunk. Infiltrálás után a tégelyt folyó víz alatt lehűtöttük, majd a külső tégelyt eltávolítottuk, és a 2. ábrán látható állapotban kaptuk meg a gyártási folyamat végén.



1. ábra. Egylépéses acélcsőbe töltött szintaktikus fémhab infiltrálásának sematikus ábrája



2. ábra. Egylépéses gyártással acélcsőbe töltött szintaktikus fémhab, lehűlés után



3. ábra. Egy lépésben előállított, szintaktikus fémhabbal kitöltött vékony falú acélcső

Ezt követően a felesleges alumíniumot az acélcső tetejéről levágtuk, és ezzel az egy lépésben előállított, szintaktikusfémhab-töltetű funkcionális szerkezetet kaptuk végeredményként, amelynek metszeti képe a **3. ábrán** látható.

A szerkezet látszólagos sűrűségét geometriai és tömegmérések alapján határoztuk meg, értéke $2,30 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, amely az alkalmazott alumínium-ötvözet sűrűségénél ~15%-kal, az acélcső sűrűségénél pedig ~70%-kal kisebb.

4. Következtetések

A kutatás eredményeiből az alábbi következtetéseket vontuk le:

- a kisnyomású infiltrálás megfelelő eljárás a fémhabbal töltött acélcsövek egylépéses előállítására;
- a kutatás során megfelelő öntőtégelyt hoztunk létre a gyártáshoz;
- eredményül kis sűrűségű funkcionális szerkezetet kaptunk, amelyet beépítés előtt csak darabolni szükséges;
- érdemes a legyártott szerkezet további kutatása, a szakirodalom alapján elsősorban zömítő és hajlító tulajdonságainak feltérképezése.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-22-0080 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg.

Ezt a munkát részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta az OTKA-FK_21 138505 támogatási szerződés keretében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Hong K., Kádár C., Knappek M., Drozdenko D., Jenei P., Kim M. Y., Choe H., Máthis K., Park H., Gubicza J.: *Comparison of morphology and compressive deformation behavior of copper foams manufactured via freeze-casting and space-holder methods*. Journal of Materials Research and Technology, 15/nov-dec. (2021) 6855–6865. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.108>.
- [2] Jenei P., Kádár C., Szabó Á., Hung S. M., Kuo C. J., Choe H., Gubicza J.: *Mechanical behavior of freeze-cast Ti foams with varied porosity*. Materials Science and Engineering: A, 855. (2022) 143911. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143911>.
- [3] Bálint A., Szlancsik A.: *Mechanical properties of iron hollow sphere reinforced metal matrix syntactic foams*. Materials Science Forum 812. (2015) 3–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.812.3>.
- [4] Banhart J.: *Metal foams – From fundamental research to applications [C]*. Frontiers in the Design of Materials (FDM 2005).
- [5] Movahedi N., Linul E.: *Quasi-static compressive behavior of the ex-situ aluminum-alloy foam-filled tubes under elevated temperature conditions*. Materials Letters, 206. (2017) 182–184. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.018>.
- [6] Linul E., Movahedi N., Marsavina L.: *The temperature effect on the axial quasi-static compressive behavior of ex-situ aluminum foam-filled tubes*. Composite Structures, 180. (2017) 709–722. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.034>.
- [7] Duarte I., Vesenjaj M., Krstulović-Opara L., Ren Z.: *Static and dynamic axial crush performance of in-situ foam-filled tubes*. Composite Structures, 124. (2015) 128–139. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.014>.
- [8] Kemény A., Leveles B., Kincses D. B., Károly D.: *Manufacturing and Investigation of In Situ and Ex Situ Produced Aluminum Matrix Foam-Filled Tubes*. Advanced Engineering Materials, 24/1. (2022) 2100365:1–8. <https://doi.org/10.1002/adem.202100365>.
- [9] Chilla V., Mondal D. P., Ram G. D. J., Mukherjee M.: *Processing of in-situ aluminium foam-filled stainless steel tube with foam-tube bonding for enhanced crashworthiness*. Journal of Manufacturing Processes, 82. (2022) 488–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.020>.
- [10] Taherishargh M., Vesenjaj M., Belova I. V., Krstulović-Opara L., Murch G. E., Fiedler T.: *In situ manufacturing and mechanical properties of syntactic foam filled tubes*. Materials & Design, 99. (2016) 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.077>.
- [11] Movahedi N., Murch G. E., Belova I. V., Fiedler T.: *Manufacturing and compressive properties of tube-filled metal syntactic foams*. Journal of Alloys and Compounds, 822. (2020) 153465. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153465>.