

# Szintaktikus fémhabok deformációja során fellépő szerkezeti változások

## The structural changes in syntactic foams during deformation

SEBŐK Dániel<sup>1,a</sup>, WIENER Csilla<sup>2,3,b</sup>, KUKOVECZ Ákos<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Szegedi Tudományegyetem, Interdiszciplináris Kiválósági Központ, Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék, H-6720 Szeged, Rerrich Béla tér 1, [asebokd@chem.u-szeged.hu](mailto:asebokd@chem.u-szeged.hu), [kakos@chem.u-szeged.hu](mailto:kakos@chem.u-szeged.hu)

<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Anyagtudomány és Technológia Tanszék, H-1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 7, +36-1-4631234, Fax: +36-1-4631366,

[kadar@eik.bme.hu](mailto:kadar@eik.bme.hu), [www.att.bme.hu](http://www.att.bme.hu)

<sup>3</sup>MTA-BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

### Összefoglaló

*Az anyagok előállítása során keletkező hibák felderítése alapvető fontosságú, hiszen ezek sokszor meghatározó szerepet játszanak az anyag deformációja során. Jelen cikkben infiltrációval előállított, alumínium mátrixú, duzzasztott agyagkavicsokat tartalmazó szintaktikus habok mátrixában jelentkező nem kívánt porozitás hatását vizsgáltuk röntgentomográfiával a deformáció előrehaladtával. A vizsgálat során olyan módszert fejlesztettünk ki, mellyel a mátrixban és az agyagkavicsokban jelenlévő porozitás szétválasztható, és ezáltal ezek hatása a deformációs sáv kialakulására vizsgálható.*

**Kulcsszavak:** fémmátrixú kompozit, összenyomás, mikrotomográfia, deformációs sáv, szintaktikus hab

### Abstract

*The different manufacturing methods introduce different failures into the materials affecting the mechanical properties of the material during deformation. We investigated the effect of the unwanted pores (of the matrix) of an expanded clay aluminum syntactic foam, produced by the infiltration method on the deformation mechanism. For the investigation, X-ray microtomography was applied. To be able to study the effect of the unwanted porosity on the formation of the deformation band, we developed a new method to separate the pores of the matrix material and the clay particles.*

## 1. BEVEZETÉS

Napjaink egyik legfontosabb környezetvédelmi és energiapolitikai kihívása a klímaváltozás kezelése, mérséklése. A fosszilis energiaforrások használata közben felszabaduló gázok okozta üvegházhatás csökkentése érdekében világszerte egyre nagyobb szerepet kapnak a kibocsátást csökkentő újítások. Jelenleg Európában a szén-dioxid-kibocsátás mintegy 15%-áért a személygépkocsik és a teherautók felelősek [1]. Az Európai Bizottság javaslata szerint az új gépjárművek szén-dioxid-kibocsátását 2025-től 15 százalékkal, 2030-ig pedig újabb 15 százalékkal kell csökkenteni [1].

A gépjárművek károsanyag-kibocsátásának csökkentése elérhető például a járművek tömegének csökkentésével is. Ennek egyik lehetséges módja, ha a mátrixba a mátrix anyagánál kisebb sűrűségű anyagot keverünk. Ezáltal nemcsak kisebb tömegű, de nagyobb fajlagos szilárdságú anyagokhoz is juthatunk. Ha a tömeg csökkenését a fémmátrixba bevitt (a mátrix sűrűségénél kisebb sűrűségű) porózus anyag, például duzzasztott perlit, kerámia/fémgömbhéj vagy duzzasztott agyagkavics biztosítja, akkor a szintaktikus fémhabokhoz jutunk.

Napjainkban egyre több helyen alkalmaznak szintaktikus fémhabokat, elsősorban nagy fajlagos szilárdságuk és jó energiaelnyelő tulajdonságuk miatt. Az ilyen típusú anyagok legnagyobb előnye, hogy tulajdonságaik a mátrix anyagának, a porózus anyag mechanikai tulajdonságainak, méretének és sűrűségének megválasztásával tág határok között változtathatók.

Itt tárgyalt vizsgálatainkhoz duzzasztott agyaggömböt (LECA) tartalmazó alumíniummátrixú szintaktikus habot választottunk. Míg különböző gömbhéjakat tartalmazó fémhabokat széles körben vizsgálták [2-5], agyaggömböket tartalmazó szintaktikus habokról igen kevés információ áll rendelkezésre [6,7], annak ellenére, hogy a LECA jóval olcsóbb, mint a kerámia gömbhéjak. Általánosságban is elmondható, hogy az eddigi kutatások során leginkább a gömbök átmérőjének és kémiai összetételének, valamint a mátrix összetételének hatását vizsgálták a mechanikai (és egyéb) tulajdonságokra [2,3], míg a gyártás során az anyagba kerülő hibákat és azok hatását többnyire elhanyagolták, dacára annak, hogy ezek jelentősen megváltoztathatják a hab mechanikai tulajdonságait. Jelen cikkben infiltrálással előállított szintaktikus fémhabokban jelentkező térfogati üregek tomográfiával való jellemzését, és a deformációra gyakorolt hatásának vizsgálatát tűztük ki célul.

## 2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÉRÉSI MÓDSZEREK

A deformációs mechanizmus vizsgálatához duzzasztott agyaggömböket tartalmazó alumínium mátrixú fémhabot használtunk. A szintaktikus habot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagtudomány és Technológia Tanszék Kompozit Laborjában állítottuk elő nyomásos infiltrálással. Részletesebb leírás található a [8]-ban. A hosszú feszültségplató biztosításához technikai tisztaságú alumínium mátrixot és szitált, 3 mm átmérőjű expandált agyaggömböket használtunk. A habból készített minta 30 mm magas, 27 mm oldalhosszúságú négyzet alaplapú téglatest volt.

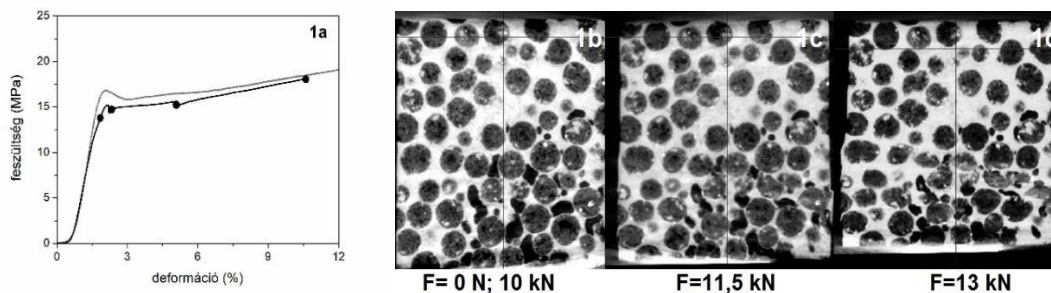
A mintát egy Zwick Roell, Zmart Pro, BZC-MMRKM250.RK01-AC típusú géppel nyomtuk össze 0,01 mm/s állandó keresztfej-sebességgel. A befogófej és a minta közötti súrlódást a mintára tekert teflonszalaggal csökkentettük. Az összenyomást 4 helyen állítottuk meg: a kvázi-lineáris szakasz végén (10 kN), majd 11 kN, 11,5 kN, illetve 13 kN terhelések esetén (1a. ábra). Ellenőrzésként egy másik ugyanilyen méretű mintát is összenyomtunk azonos körülmények között.

A kezdeti, deformálatlan mintáról, valamint ugyanezen minta további négy (deformált, majd leterhelt) állapotáról a mikro-CT felvételeket egy Bruker SkyScan 2211 Multiscale X-ray Nanotomograph készülékkel készítettük, az alábbi paraméterek mellett: 150 kV gyorsító feszültség, 0,5 mm-es Ti-szűrő, 250  $\mu$ A áram. A radiográf képek 45 ms expozíciós idővel készültek, és a 3D rendeléshez 10 képből számított átlagból számoltunk. A voxel-felbontás 30  $\mu$ m volt. A 3D rendereléshez a CTvox (Bruker), a regisztrációhoz a DataViewer (Bruker), a binarizáláshoz és a szeletek kvantitatív értékeléséhez a CTAn (CT Analyzer, Bruker) szoftvereket használtuk. Az egyes rétegekben a binarizált térfogatban a fázisokhoz tartozó voxelek számának összeszámlálását saját készítésű programmal végeztük.

## 3. EREDMÉNYEK

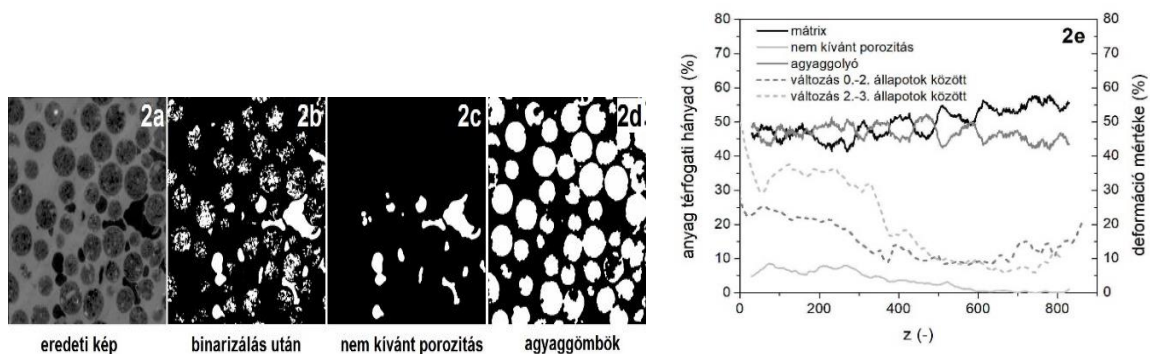
Az 1a. ábra az előállított szintaktikus fémhabok deformációs görbét mutatja azokkal a pontokkal, ahol az összenyomást megállítottuk, majd leterhelés után a tomográf-felvételeket készítettük. A deformációs görbe kb. 10 % deformációig két részből áll. Az első szakasz az ún. kvázi-lineáris szakasz, ahol eddigi akusztikus emissziós méréseink alapján lokálisan képlékeny deformáció megy végbe [7]. Ezt követi a plató szakasz, ahol a hab közel konstans feszültség mellett nagy alakváltozást szenved. A tomográf felvételekből egy, a terheléssel párhuzamos sík látható az 1b.–1d. ábrán, különböző deformációk esetén. A deformáció előtt készített tomográf felvételen jól látszódnak a minta alsó felében található, a gyártás során a mátrixban létrejött üregek, melyekre a továbbiakban nem kívánt porozitásként fogunk utalni (1b. ábra). Szembetűnő, hogy nagyobb pórusokat, üregeket nem csak a mátrixban, hanem az agyaggömbökben is találhatunk, némelyikben akár mm-es nagyságút is (1b. ábra).

A különböző mértékű deformációk utáni tomográf felvételekből kinyert kétdimenziós metszeteken jól látható, hogy a minta szerkezete a kvázi-lineáris szakaszban nem változik (1b. ábra), ezzel szemben a kvázi-lineáris szakasz után inhomogénean, ún. deformációs sávok segítségével deformálódik (1c.-1d. ábra). A deformáció előrehaladtával a deformációs sávban található agyaggömbök összetörnek, és a mátrixban lévő üregek is záródnak. A gömbök közti mátrixanyag, az ún. cellafal deformációja, nyíródása is felfedezhető a deformációs sávban. A sávon kívül a minta alig deformálódik, ebben a térrészben a deformációtól makroszkopikus szinten lényegében eltekinthetünk. A tomográf képek tanúsága alapján ezek a deformációs sávok az összenyomás irányára közel merőlegesek.



1. ábra A duzzasztott agyaggömböket tartalmazó szintaktikus alumíniumhab összenyomási görbéje (1a. ábra), és a deformációs görbén bejelölt pontokban, a minta leterhelése után készített tomográf képekből azonos helyről kinyert (a terheléssel párhuzamos) szelet (1b.-1d. ábra)

A deformációt befolyásoló tényezők feltárásához először analizáltuk a 3D tomográf képeket: elválasztottuk a nem kívánt porozitáshoz tartozó voxeleket az agyaggolyókban található pórusokhoz tartozó voxelektől. Itt az egyszerű binarizálás nem vezet célra, mert a tomográf képeken a kétfajta porozitás ugyanazt a szürkeárnyalatot eredményezi (2c.ábra). A nem kívánt porozitáshoz tartozó voxeleket a binarizált képből a nyitás–zárás műveletsorok többszöri elvégzése után kaphatjuk meg. A binarizált képből kivonva a nem kívánt porozitáshoz tartozó képet (2d. ábra), a zárás–nyitás műveletsorok többszöri elvégzése után az agyaggömbökhöz tartozó voxeleket kapjuk (2e. ábra). Jól látható, hogy a leírt eljárás, kisebb eltérésektől eltekintve, jól adja vissza a hab szerkezetét.



2.ábra A tomográf kép átalakítása (1b.-1d. ábra): az agyaggömbökben lévő üregek miatt a nem kívánt porozitást nem kapjuk meg egyszerű binarizálással (1b. ábra). A mátrix anyagának (fekete folytonos vonal), az agyaggolyóknak (sötétszürke folytonos vonal) és a nem kívánt porozitásnak (világosszürke folytonos vonal) a térfogati hányada az egyes vízszintes síkokban (2e. ábra). Z a függőleges tengely, 0 jelöli a minta alját. Szaggatott vonal jelöli, hogy a tomográf képek között az egyes z értékeknél a voxelek hány százaléka tér el az előző állapottól (2e. ábra)

Végül megvizsgáltuk, hogy milyen széles egy deformációs sáv, és van-e összefüggés a nem kívánt porozitás jelenléte és a deformációs sáv kialakulásának helye között. Mivel a deformációs sáv közel vízszintes, így a szintaktikus habban található különböző anyagok (mátrix/agyaggömb/nem kívánt pórusok) térfogati arányát is elég csak a vízszintes síkokon meghatározni. A 2d. ábra mutatja, hogy az egyes anyagok térfogati aránya hogyan változik a vízszintes síkokban, a minta aljától a teteje felé haladva. Látható, hogy az agyaggolyók eloszlása kisebb ingadozásoktól eltekintve egyenes: átlagosan a térfogat 47%-a agyaggolyó (a szórás csak 2%). Ezzel szemben a mátrix anyag átlagosan 50% térfogatot foglal el, és jól láthatóan a minta alsó részében a mátrix térfogati hányada az átlagérték alatt, míg a minta felső részében az átlag felett található (mátrix esetén a szórás 4%). A különbség a nem kívánt porozitásnak köszönhető, mely a minta alsó részében elérheti akár a 8%-ot is.

Az első deformációs sáv kialakulásának helyét a DataView programmal határoztuk meg, mely lehetővé teszi két tomográf kép összehasonlítását és a különbségek regisztrálását. A kezdeti szintaktikus hab és a 11,5 kN-ig deformált, valamint a 11,5 kN-ig deformált és a 13 kN-ig deformált habtérfogatok közötti különbség-térfogatoknál megszámlálva a különbség-térfogatokban található voxelek arányát

minden egyes vízszintes síkra jó közelítéssel kirajzolja a deformációs sáv helyét. A 2e. ábrán szaggatott vonallal jelöltük a különbség-térfogatokban található voxelek arányát a hab teljes keresztmetszetében lévő voxelek számához képest. A 2e. ábrán jól látható, hogy a hab összenyomófejjel érintkező része jelentősen deformálódik, a grafikonról pedig az is leolvasható, hogy a hab kezdetben nem csak ott deformálódik, ahol nagy a nem kívánt porozitás, hanem a minta felső részén is. További összenyomás hatására azonban azok a részek deformálódnak tovább, ahol a nem kívánt porozitás nagyobb volt.

#### 4. KÖVETKEZTETÉSEK

Alumínium mátrixú, duzzasztott agyaggömböt tartalmazó szintaktikus habokra sikerült olyan képmódosító eljárásokat találnunk, melyekkel a habról készült tomográf felvételeken a mátrixban lévő porozitás elválasztható a mátrixba szándékosan bevitt pórusoktól, lehetővé téve ezek hatásának különválasztását. A vizsgált mintán a módszer segítségével azt találtuk, hogy a plató szakasz kezdetén nem csak a nem kívánt porozitás és a lokális sűrűség határozza meg a deformációs sáv kialakulásának helyét. A deformáció növekedésével azonban a nem kívánt pórusok jelentősége nő.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási eredmények és a cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült (Wiener Csilla). A szerzők köszönetet mondanak a GINOP-2.3.3-15-2016-00010 projekt anyagi támogatásáért.

#### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] <https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20180920STO14027/uj-limit-az-autok-szen-dioxid-kibocsatasara>
- [2] I.N. Orbulov, K. Májlínger, On the microstructure of ceramic hollow microspheres, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* (54) (2012) 89-94.
- [3] N. Gupta, E. Woldesenbet, P. Mensah, Compression properties of syntactic foams: effect of cenosphere radius ratio and specimen aspect ratio, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (35) (2004) 103-111
- [4] L. P. Zhang, Y. Y. Zhao, Mechanical Response of Al Matrix Syntactic Foams Produced by Pressure Infiltration Casting *Journal of Composite Materials* (41)(2007) 2105–2117
- [5] I.N. Orbulov, Á. Németh, J. Dobránszky, Composite Production by Pressure Infiltration, *Mater Sci Forum* (589) (2008) 137-142.
- [6] H. Puga, V.H. Carneiro, C. Jesus, J. Pereira, V. Lopes, Influence of particle diameter in mechanical performance of Al expanded clay syntactic foams. *Compos Struct* (184) (2018) 698–703.
- [7] C. Kádár, K. Máthis, F. Chmelík, M. Knapek, I. N. Orbulov, The Deformation of Expanded Clay Syntactic Foams during Compression Characterized by Acoustic Emission, *elfogadva: 11th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams Conference Proceedings*
- [8] A. Szlancsik, B. Katona, A. Kemény, D. Károly, On the Filler Materials of Metal Matrix Syntactic Foams, *Materials* 2019, 12(12), 2023