

Kerámia gömbhéjakkal erősített fémhab kompozitok szerkezetének CT alapú rekonstrukciója

I. Kozma, G. Dorogi, Sz. Papp

*Széchenyi István Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék
Egyetem tér 1., 9026 Győr, kozma@sze.hu,*

Absztrakt

Kerámia gömbhéjakkal erősített fémhab kompozitok szerkezetének rekonstrukciója szükséges a véges elemes analíziseknél használatos 3D modellek létrehozásához. Két új algoritmus került kifejlesztésre a rekonstrukcióhoz. Az egyik algoritmus CT rétegfelvételeken található alakzatok körszerűségének vizsgálatán alapszik, a másik algoritmus a rádiuszok fokozatos növelésével keresi a gömbhéjak kontúrait ugyancsak CT felvételeken. Mindkét algoritmussal megfelelően pontos 3D CAD modell készíthető.

1. Bevezetés

A fémhabok családjának egyik érdekes csoportját adják a kerámia gömbhéjakkal erősített fémhabok, amelyeket szintaktikus habok néven is említ a szakirodalom. A fém mátrixú szintaktikus haboknak számos alkalmazásával lehet találkozni járművek burkoló elemeinél és az elektromechanikai iparban, ezeket az alkalmazásokat a kiváló energiaelnyelő képesség és a csillapító hatások indokolják. Ezekben a porózus anyagokban apró kerámia gömbök belső üregei (buborékjai) adják a porozitást [1]. A mikroméretű gömbök a kereskedelmi forgalomban is kaphatóak, különböző oxidkerámia fajtákban [2, 3].

A fém mátrixú szintaktikus habok legfontosabb tulajdonságai a jó nyomószilárdság és a kiváló energiaelnyelő képesség [4-10].

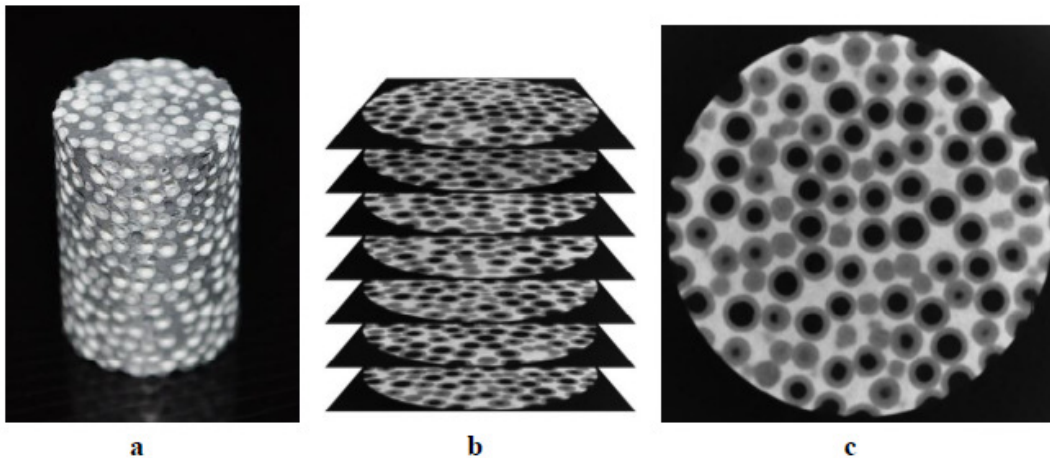
A mikrogömböket általában keveréssel és gravitációs öntéssel, vagy nyomásos infiltrálással adják a fém mátrixhoz [11-13]. A mikrogömbök kémiai összetétele és minősége a szintaktikus habok számos tulajdonságát erősen befolyásolja. A mikrogömbök minőségének a habok mechanikai tulajdonságaira való erős hatása miatt a szintaktikus habok szerkezetének vizsgálata rendkívül fontos. A mikrogömbök előállításáról, geometriai, mechanikai, termikus tulajdonságairól, dinamikus viselkedéséről, a tönkremeneteli folyamatokról szakkönyvekben is találunk összefoglalást [19].

Ebben a munkában CT-alapú rekonstrukciós módszert céloztunk meg a szintaktikus habok szerkezetéről CAD modellek előállításához. CT-alapú szerkezetrekonstrukciót alkalmaztak már több anyag szerkezeti modelljének előállítására is, mint pl. porózus polimereknél [14], valamint nyitott vagy zárt cellás fémhaboknál [15-16, 20], üzemanyagcellák porózus anyagain [17] és talajmintákon [18].

A szintaktikus habok szerkezetének CT-alapú rekonstrukciójához új algoritmusokat kifejlesztésre volt szükség, ebben a cikkben ezeknek az elvét és alkalmazását mutatjuk be.

2. Rekonstrukciós algoritmusok

Ebben a munkában kerámia gömbhéjakkal erősített Al kompozit minta szerkezetének 3D rekonstrukcióját tűztük ki célul. A kiindulás a kompozit anyag próbatestje volt, amelyről fotót láthatunk az 1.a. ábrán. A hengeres próbatest mérete $\varnothing 10 \times 15$ mm. A rekonstrukció alapja CT leképezés volt. Az 1.b. ábrán a próbatestről készült néhány CT rétegfelvételt mutatunk, egy rétegfelvételt külön is részletezünk az 1.c. ábrán. A CT rétegfelvételeket a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi Tanszékének laboratóriumában készítettük YXILON CT Modular típusú ipari CT berendezéssel, 225kV μ fókuszú röntgensóvel, 7 μ m-es felbontással.

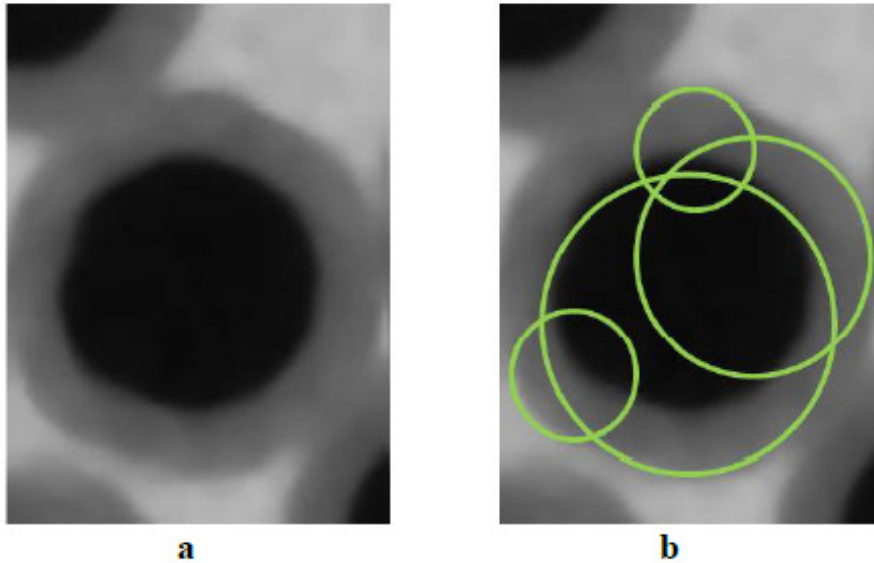


1. ábra: *a:* A kerámia gömbhéjakkal erősített Al kompozit minta. *b:* CT rétegfelvételek sorozata. *c:* Egy CT rétegfelvétel.

A CT rétegfelvételeket feldolgozó szoftverek (pl. Mimics, Geometry, YXlon CT berendezés kezelő szoftvere) képesek a szerkezetben detektált légzárványok (pl. öntvényekben található lunkerek) gömbök formájában való rekonstrukciójára. Ez a rekonstrukció azonban a kerámia gömbhéjakkal csak a belső felületeket modellezi, a külső felületek rekonstrukciója nem megoldott. A CT rétegfelvételek elemzésénél azt tapasztaltuk, hogy a kerámia gömbhéjak falvastagsága nem azonos, ezen kívül előfordul az is, hogy nem koncentrikusak a külső és belső gömbfelületek. Továbbá a szerkezetben számos helyen található metsződő gömbök is, és ez tovább komplikálja a rekonstrukciót. Ezen problémák miatt a CT kezelő és feldolgozó szoftverek segítségével nem tudtuk közvetlenül megoldani a szerkezet teljes rekonstrukcióját. A kerámia gömbhéjak belső gömbfelületeinek modelljeit azonban már ki tudtuk nyerni a mérésekből, ezeket fel is használtuk a kompozit teljes modelljének építéséhez.

A kerámia gömbhéjak külső gömbfelületeinek rekonstrukciójához a CT rétegfelvételeken található körök detektálásával kerestük a megoldást. A körök detektálásához először a Hough Circle algoritmust [21] alkalmaztuk. A 2.a. ábrán egy CT felvételtől kiválasztott kerámia gömbhéj metszetet mutatunk. Látszik, hogy különösen a külső kontúr nem szabályos kör. A Hough Circle algoritmus a kontúrnak több részletéhez, több körívhez illeszt köröket, lásd 2.b. ábra. A legtöbb esetben azonban ezen körök egyike sem lesz a tényleges külső kontúrhoz legjobban illeszthető kör. A gömbhéjak külső kontúrához jól illeszkedő körök (a 3D szerkezetben gömbök) meghatározására saját algoritmusokat dolgoztunk ki. Két különböző elven működő algoritmust fejlesztettünk: a körszerűség elvén működő algoritmust és a rádiusz-inkrementálás algoritmusát.

Kozma I., Dorogi G., Papp Sz., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2014) 60-72



2. ábra: **a:** CT rétegfelvétel részlete egy kerámia gömbhétről. **b:** Különböző körívrészekhez Hough Circle algoritmussal illesztett néhány kör.

2.1. Körszerűség elvének algoritmusa

Egy CT rétegfelvételen sokféle elkülönülő területet szegmentálhatunk. Ezek közül keressük a körszerű területeket. Mivel csak a külső kontúrok detektálására van szükség, a belső körök területét (a 2. ábrán fekete terület) egyesítjük a sötétszürke gömbhéjak területével. Egy alakzat körszerűségének eldöntéséhez a következő két mennyiségre van szükség:

A szegmentált terület: TS, amelyet egyszerűen a területhez tartozó pixelek területösszegeként határozzunk meg.

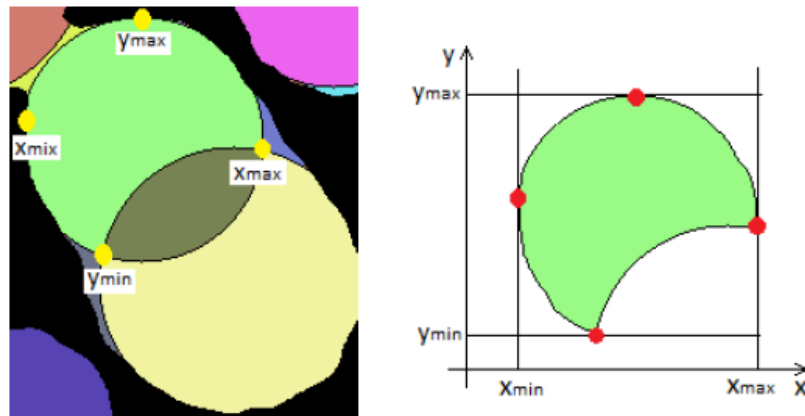
A szegmentált terület szélső koordinátái (3. ábra) segítségével meghatározott

(1)

sugarú kör területe: TC.

Az RC sugarú kör középpontjának koordinátái:

Kozma I., Dorogi G., Papp Sz., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2014) 60-72



3. ábra: Szegmentált terület körszerűségéhez szükséges szélső koordináták meghatározása a világoszöld alakzat példáján. (Részlet egy CT rétegfelvételen szegmentált alakzatokról.)

Egy alakzat körszerűségét a következő körszerűégi paraméterrel definiáljuk:

$$\text{-----} \quad (2)$$

Ha a vizsgált alakzat pontosan kör, akkor C értéke 100%.

Ha az alakzat formája eltér a körtől, akkor:

kismértékű eltérés esetén C értéke a 100%-hoz közelít,

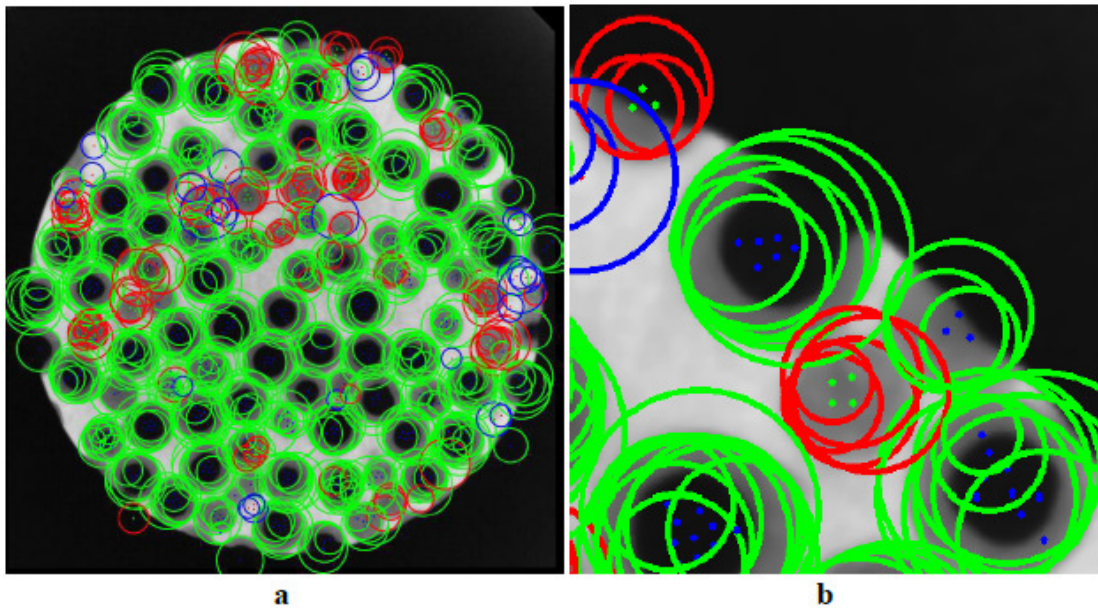
nagymértékű eltérés esetén C értéke is nagymértékben eltér a 100%-tól.

A körszerűség pontosabb megállapításához ugyanazt az alakzatot elforgatott koordinátarendszerekben is vizsgáltuk. Minden elforgatott koordinátarendszerben meghatároztunk egy-egy RC értéket, ezek átlagából számítottuk a TC körterületet. Ebben a munkában minden alakzathoz 36 db 100-onkénti elforgatás átlagából számítottuk a TC körterületet.

Metszett körök, mint szegmentált alakzatok (pl. a 2. ábrán a világoszöld terület) C körszerűégi paramétere sosem közelítheti elegendően jól a 100% értéket. Ezért az algoritmust kiegészítettük a következő művelettel:

Egy alakzat körszerűségének (C értékének) megállapítása után megkerestük az alakzattal szomszédos szegmentált területeket. Egyenként vettünk egy-egy szomszédal való uniót. Ha az unióra számított C érték közelebb esett 100%-hoz, mint az eredeti C érték, akkor az uniót használtuk az eredeti terület helyett. Pl. a 3. ábrán a világoszöld területnek a szomszédos, szilvماغ alakú szürke területtel vett uniója jóval pontosabb kört ad, mint a világoszöld terület önmagában. Ilyen módon a metszett körök (kerámia ikergömbök) problémáját is sikerült megoldani.

A körszerűség elve önmagában egyszerű, könnyen programozható. Az alkalmazáshoz szükség volt még a területek szegmentálásának lépésére. Ehhez felhasználtuk a Hough Circle algoritmust. Azt tapasztaltuk, hogy a Hough Circle algoritlussal minden gömbhøj metszethez találunk befoglaló köröket. A 4. ábrán látható körök sokaságból egy kerámia gömbhøj metszete körül a maximális (legnagyobb sugarú) kört tekintettük befoglaló körnek.



4. ábra: Befoglaló körök keresése Hough Circle algoritmussal.
a: egy CT rétegfelvétel.
b: Részlet a CT rétegfelvételből.

A befoglaló körökön belül az RGB kódokat használtuk az egybefüggő területek elkülönítésére. A tesztfuttatások során az $R=G=B < 130$ szűrési feltétel bizonyult megfelelőnek a területek szegmentálására.

2.2. Rádiusz-inkrementálás algoritmusa

A rádiusz-inkrementálás módszerénél abból indultunk ki, hogy a gömbhéjak belső gömbfelülete ismert. A következő lépésekből áll az algoritmus:
Egy CT rétegfelvételen a belső, fekete körökből indulunk ki.

A belső körök sugarát lépésről-lépésre növeljük egy pixelnyi mérettel.

Minden rádiusznövelés után megvizsgáljuk, hogy elértük-e már a külső kör szélét. Ehhez megszámláltuk, hogy a növelt sugarú kör által átmetszett pixelek között milyen arányban jelennek meg a világosszürke színű, alumínium mátrixnak megfelelő pixelek.

Tapasztalat szerint akkor kaptunk jól illeszkedő kört, amikor az átmetszett világosszürke pixelek aránya elérte az 50%-ot.

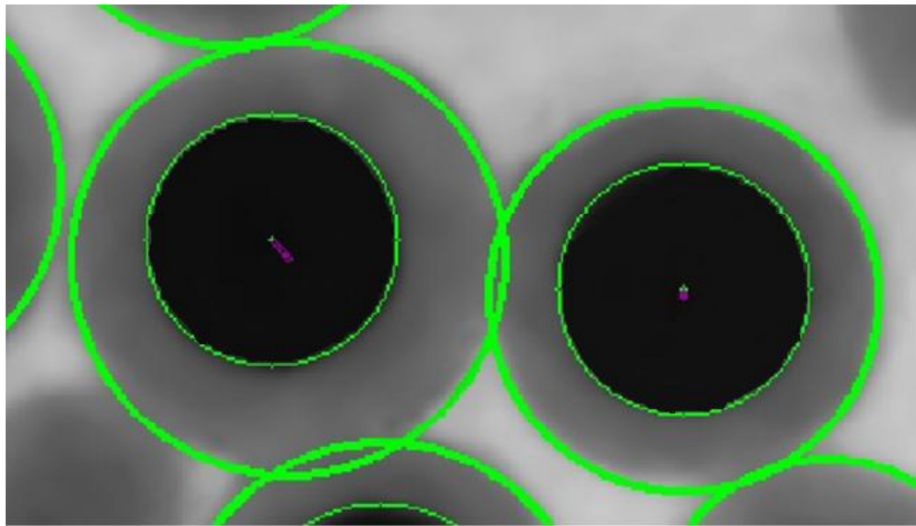
Ha a sötétszürke átmetszett pixelek aránya növekszik, azonnal leállítjuk az algoritmust, hiszen ez az eset egymást metsző köröknél fordulhat elő, amikor már a szomszéd körgyűrű pixeleibe csúszunk.

A fenti lépések sorozata is egyszerű, könnyen programozható feladat. Ebben az esetben akkor adódik komplikáció, amikor a belső és külső körök nem koncentrikusak. Ezért minden rádiusznövekményes lépés után egy origó-korrekción is végzünk.

A korrekció során a növelt rádiuszú körrel metszett körvonalai pixelek alacsony intenzitású (sötétszürke pixelek) pontjai felé, egy lépésben egyetlen pixelrel mozdítjuk el az origót. Az origó elmozdításának irányát az eredeti középpontból az alacsony intenzitású pixelek felé

Kozma I., Dorogi G., Papp Sz., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2014) 60-72

mutató vektorok eredőjének végpontja határozza meg. Ez után a vezérlést az inkrementálás visszakapja, és eldönti, kell-e még korrigálni a rádiuszon, vagy az origón. Az 5. ábrán látható kerámia gömbhéj metszeten a külső és belső körök nem koncentrikusak. Ezért az origót néhány pixellel mozgatni kellett (lila pixelek) a rádiusz-növekményes algoritmus során.



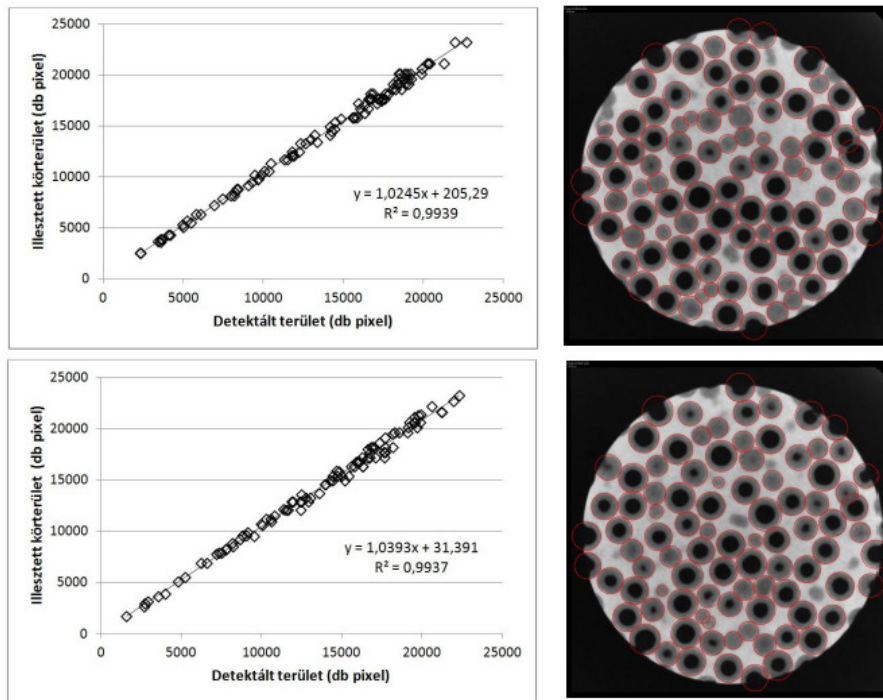
5. ábra: Origó-korrektúra a rádiusz-növekményes algoritmusnál.

2.3. Az algoritmusok tesztelése

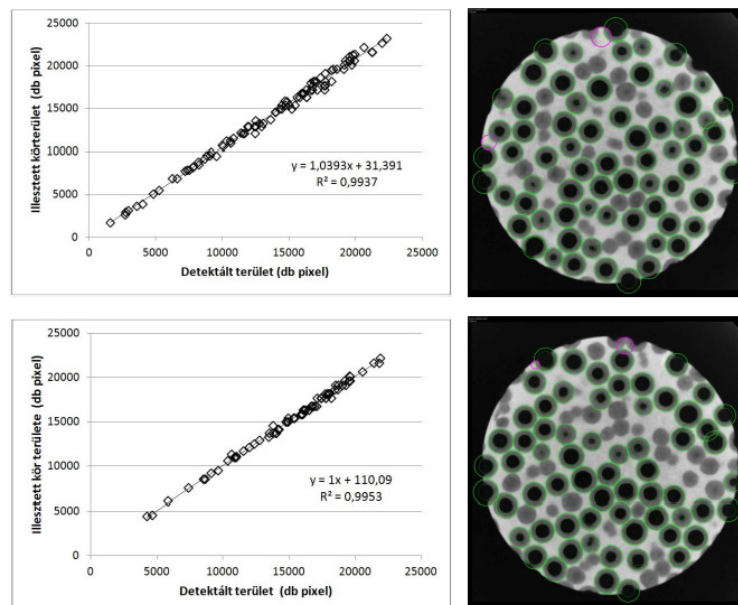
Mindkét algoritmussal futtatásokat végeztünk szintaktikus fémhab mintáról készült CT rétegfelvételek kiértékelésére. A körök illesztésének minőségét a detektált területek és az illesztett körterületek összehasonlításával végeztük.

A 6-7. ábrákon mindkét algoritmushoz két-két rétegfelvétel kiértékelését mutatjuk. A diagramokon a detektált terület és az illesztett kör területe által meghatározott pontokhoz számított lineáris trendvonal meredeksége majdnem pontosan "1", minden esetben. A területeket a pixelek számával adtuk meg, egy pixel területe 0.04 mm.

Kozma I., Dorogi G., Papp Sz., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2014) 60-72



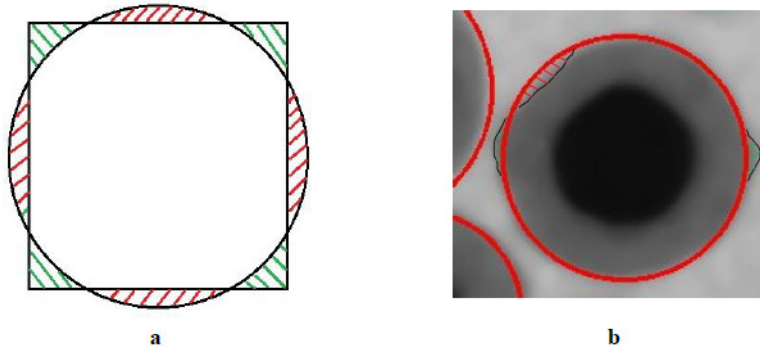
6. ábra: Körszerűség módszerével illesztett körök (piros színnel) a CT rétegfelvételeken. A diagramokon a detektált terület és az illesztett körterület által meghatározott pontokat és a számított lineáris trendvonalat mutatjuk a jobboldali rétegfelvételekre értelmezve.



7. ábra: Rádiusz inkrementálás módszerével illesztett körök (zöld színnel) a CT rétegfelvételeken. A diagramokon a detektált terület és az illesztett körterület által meghatározott pontokat és a számított lineáris trendvonalat mutatjuk a jobboldali rétegfelvételekre értelmezve.

Kozma I., Dorogi G., Papp Sz., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2014) 60-72

A detektált területek és az illesztett körterületek összehasonlítása elvileg nem elégséges a módszerek kiértékelésére. Ugyanis elvileg nyilvánvalóan előfordulhat, hogy két különböző alakzat területe megegyezik, mégis más alakzatokról van szó. A 8.a. ábrán pl. azonos területű négyzetet és kört illesztettünk egymásra. A 8.b. ábrán pedig egy CT rétegfelvételen detektált alakzathoz illesztett kört mutatunk.



8. ábra: Külső és belső hibák különböző alakzatokhoz illesztett köröknél. **a:** négyzethez illesztett kör esetén, **b:** CT rétegfelvételen detektált területhez illesztett kör esetén.

A négyzetre illesztett körhöz hasonló durva hibák nem fordulhatnak elő a körszerűség elvének algoritmusában. Ott ugyanis a több körbeforgatásból számított átlagos körszerűségi paraméter segítségével ezek a durva hibák kiszűrhetők. A rádiusz inkrementációs módszernél azonban elvileg előfordulhatnak durva hibák is.

A körök illesztésének hibáját a körökhöz tartozó belső és külső hibák segítségével is meghatároztuk. A belső és külső hibákat a következőképpen definiáltuk:

Belső hibák: azon pixeleknek a száma, amelyek az illesztett körön belül találhatóak, de intenzitás szerint az alumínium mátrix anyagának felelnek meg (8. ábrán pirossal vonalkázott területek).

Külső hibák: azon pixelek száma, amelyek az illesztett körön kívül találhatóak, intenzitás szerint a kerámia gömbhéj anyagának felelnek meg, de nem tartoznak egyetlen másik detektált területhez sem (utóbbi feltétel az átmetsződő körök miatt szükséges). Ezek a hibák a 8. ábrán zölddel vonalkázott területek.

Minden detektált kör esetében kiszámítottuk, hogy a belső és a külső hibák összege hány százalékát adja ki az illesztett kör területének. Ezt a százalékos hibát vettük egy illesztett kör hibájának, még akkor is, ha ez a hiba nemcsak az illesztés hibáját mutatja, hanem ezzel együtt a detektált területnek a szabályos körtől való eltérését is.

A körönként számított százalékos illesztési hibákat a 100 analizált CT rétegfelvételnél detektált körökre átlagoltuk és szórást is számítottunk. Az eredményeket az 1. táblázatban mutatjuk.

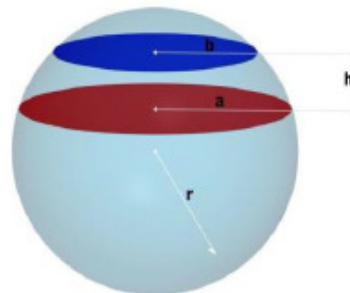
1. Táblázat: Körök illesztésének átlagos hibái, külső és belső hibák értelmezésével

	Átlagos illesztési hiba	Szórás
Körszerűség elve	3,1-4,1 %	1,9-2,3 %
Rádiusz inkrementálás	1,0-1,5 %	0,9-1,3 %

A detektált területek és illesztett körterületek különbségéből adódó hibák (1. táblázat, 6-7. ábrák), valamint az illesztett körök külső és belső hibáinak a minősítése alapján is azt mondhatjuk, hogy mindkét új algoritmus illesztési hibái kismértékűek, az új algoritmusok alkalmasak a fém-kerámia kompozitok szerkezetének CT alapú rekonstrukciójára.

2.4. Futtatási eredmények, CAD modell

Az 1. ábrán mutatott próbatestről 1600 rétegfelvételt készítettünk. Az összes rétegfelvételen lefuttattuk a kördetektáló algoritmusokat. Egy gömbsugar két metszetből való meghatározását mutatjuk a 9. ábrán.



9. ábra: Rétegfelvételek metszeti köreiből származtatott gömb paraméterek

A 9. ábra jelöléseivel a gömbsugar (r) az alábbi összefüggéssel számítható:

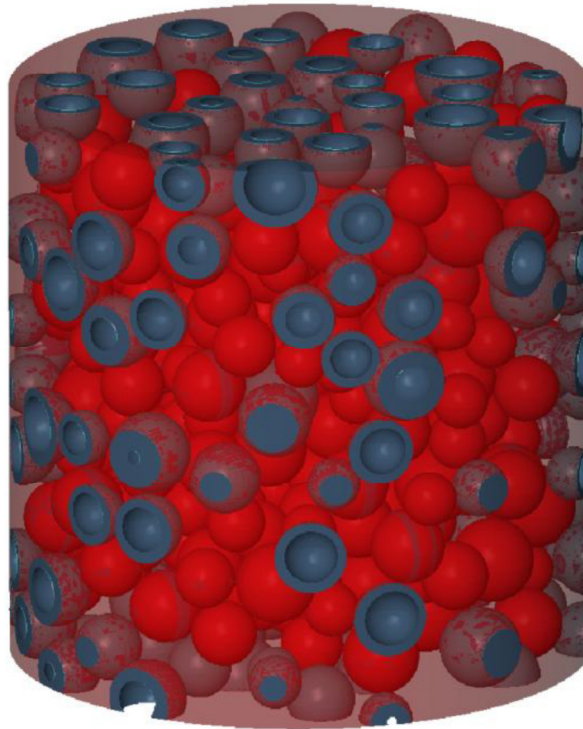
$$r = \sqrt{\frac{[(a-b)^2 + h^2][(a+b)^2 + h^2]}{4h^2}} \quad (3)$$

ahol „a” és „b” két különböző rétegfelvételen illesztett metszeti kör sugara, „h” a metszetek közötti távolság.

Az összefüggés módosulhat akkor, ha a két metszeti kör két különböző félgömbbe esik. Egy-egy kerámia-gömbhéj rekonstrukciója esetén vigyáztunk arra, hogy ugyanabba a félgömbbe eső metszetekből számítsuk a gömb sugarát és a középpont koordinátáit.

Kozma I., Dorogi G., Papp Sz., *Anyagok Világa (Materials Word)* 1 (2014) 60-72

A detektált gömbök adataiból elkészült a CAD modell, amelyen lehetővé válik különböző mérnöki analízisek (pl. végeselemes analízisek) futtatása. A CAD modellt a 10. ábrán mutatjuk, a gömbhéjak láthatása érdekében kettévágott modellt mutatunk.



10. ábra: A félbevágott CAD modell.

3. Összefoglalás

A körszerűség elvének algoritmusát és a rádiusz inkrementálás algoritmusát fejlesztettük ki és analizáltuk kerámiagömbökkel erősített alumínium kompozitok CT-alapú rekonstrukciójához. Mindkét algoritmussal jól rekonstruálhatók a CT rétegfelvételeken található kerámia gömbhéjak burkoló körei, abban az esetben is, amikor sűrűn pakolt, érintkező, vagy metsződő gömbhéjakról van szó. A rekonstruált CAD modell könnyen generálható az új algoritmusok segítségével.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a "Járműipari anyagfejlesztések" című TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 azonosító számú projekt támogatásával valósult meg.

Hivatkozások

- [1] I. N. Orbulov, J. Dobránszky, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 52:35-42, 2008.
- [2] Envirospheres Ltd., <http://www.envirospheres.com/products.asp>, 2011.
- [3] Sphere Services Inc., <http://www.sphereservices.com/>, 2011.
- [4] G. H. Wu, Z.Y. Dou, D. L. Sun, L.T. Jiang, B. S. Ding, B. F. He, *Scripta Materialia* 56:221-224, 2007.
- [5] I. N. Orbulov, J. Ginzler, *Composites Part A* 43:553-561, 2012.
- [6] I. N. Orbulov, K. Májlinger, *International J. of Materials Research* 104:903-911, 2013.
- [7] P. K. Rohatgi, J. K. Kim, N. Gupta, S. Alaraj, A. Daoud, *Composites Part A* 27:430-437, 2006.
- [8] R. A. Palmer, K. Gao, T. M. Doan, L. Green, G. Cavallaro, *Materials Science and Engineering A* 464:85-92, 2007
- [9] D. K. Balch, J. G. O'Dwyer, G. R. Davis, C. M. Cady, G. T. Gray III, D. C. Dunand, *Materials Science and Engineering A* 391:408-417, 2005.
- [10] W. J. Drury, S. A. Rickles, T. H. Sanders, J. K. Cochran: Light weight alloys for aerospace applications, *The Minerals Metals and Materials Society* 311-322, 1998.
- [11] P. K. Rohatgi, R.Q. Guo, H. Iksan, E. J. Borchelt, R. Asthana, *Materials Science and Technology A* 244:22-30, 1998.
- [12] T. Bárczy, Gy. Kaptay, *Materials Science Forum* 473-474:297-302, 2005.
- [13] P. K. Trumble, *Acta Materialia* 46:2363-2367, 1998.
- [14] A. Léonard, C. Calberg, G. Kerckhofs, M. Wevers, R. Jérôme, J.P. Pirard, A. Germain, S. Blacher, *J. Porous Mater.* 15:397-403, 2008.
- [15] J. Vicente, F. Topin, J.V. Daurelle, *Materials Transactions* 47:2195-2202, 2006.
- [16] I. Jeon, K. Katou, T. Sonoda, T. Asahina, K.J. Kang, *Mechanics of Materials* 41:60-73, 2009.
- [17] E.A. Wargo, T. Kotaka, Y. Tabuchi, E.C. Kumbur, *J. of Power Sources* 241:608-618, 2013.
- [18] A.N. Houston, S. Schmidt, A.M. Tarquis, W. Otten, P.C. Baveye, S.M. Hapca, *Geoderma* 207-208:154-165, 2013.
- [19] A. Oechsner, C. Augustin, *Multifunctional Metallic Hollow Sphere Structures*, Springer, 2009
- [20] M. Vesenjajk, M. Borovinsek, T. Fiedler, Structural characterisation of advanced pore morphology (APM) foam elements, *Materials Letters*, 110 (2013) 201-203
- [21] H.K. Yuen, J. Princen, J. Illingworth, J. Kittler, *Image and vision computing* 8:71-77, 1990.