

FÉM HABOK SZERKEZETI ÉS MECHANIKAI VIZSGÁLATA

Wiener Csilla

Témavezetők: Dr. Lendvai János, egyetemi tanár, D.Sc.

Dr. Rajkovits Zsuzsanna, egyetemi docens, Ph.D.

ELTE TTK Fizika Doktori Iskola

Vezető: Dr. Horváth Zalán

Anyagtudomány és Szilárdtestfizika Program

Programvezető: Dr. Lendvai János

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Anyagfizikai Tanszék

Budapest, 2006

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	4
2.	Irodalmi áttekintés	7
2.1.	Alapfogalmak	7
2.2.	Fémhabok előállítása	9
2.2.1.	Fémhabok előállítása olvadékból	9
2.2.1.1.	Buborékoltatásos habosítás	9
2.2.1.2.	Olvadék habosítása fúvatóanyaggal	10
2.2.1.3.	Granulátumra öntés	12
2.2.1.4.	Precíziós öntés	13
2.2.2.	Porkohászati módszerek	13
2.2.2.1.	Fémpor habosítása fúvatóanyaggal	13
2.2.2.2.	Habosítás pórusokba zárt gázzal	14
2.2.2.3.	Üreges granulátum szinterelése	14
2.2.3.	Bevonásos technikák	15
2.3.	Fémhabok mechanikai tulajdonságai	15
2.3.1.	Fémhabok deformációja összenyomás során	15
2.3.2.	Fémhabok deformációja benyomódás során	19
2.3.3.	Mérethatások	20
2.4.	Vizsgálati módszerek	23
2.4.1.	Röntgentomográfia	24
2.4.2.	Akusztikus emisszió	28
2.5.	Fémhabmodellek	31
2.5.1.	A Gibson-Ashby modell	35
3.	Új modellek a platófeszültség emelkedésének leírására [S1]-[S3]	39
3.1.	Kis relatív sűrűségű, nyitott cellás modell	39
3.1.1.	Kis relatív sűrűségű habok energiaelnyelő-képessége	42
3.2.	Kis relatív sűrűségű, zárt cellás modell	42
3.3.	Nagy relatív sűrűségű, nyitott cellás modell	44
3.4.	A nyitott cellás fémhab platófeszültségét befolyásoló paraméterek	45
3.4.1.	Cellaméret-eloszlás hatása a normált platófeszültségre	47
3.5.	Kísérleti körülmények	48
3.6.	Kis relatív sűrűségű fémhabok modelljének összevetése a mért deformációs görbékkel	50

3.6.1.	A zárt cellás fémhab platófeszültségét befolyásoló paraméterek.....	56
3.7.	Nagy relatív sűrűségű, nyitott cellás fémhabok modelljének összevetése a mért deformációs görbékkel.....	57
3.8.	A 3. fejezet eredményei.....	60
4.	Deformációs mechanizmusok vizsgálata akusztikus emisszióval [S4].....	62
4.1.	Kísérleti körülmények.....	62
4.2.	Egytengelyű összenyomás.....	64
4.3.	Benyomódás.....	68
4.4.	A 4. fejezet eredményei.....	72
5.	Benyomódás szimulálása végeelem módszerrel [S5].....	73
5.1.	Kísérleti körülmények.....	73
5.2.	Deformációs zóna benyomódás során.....	74
5.3.	Az 5. fejezet eredményei.....	81
6.	Összefoglalás.....	82
	A témához kapcsolódó saját publikációk.....	83
	Irodalomjegyzék.....	84
	Köszönetnyilvánítás.....	89
	Magyar nyelvű összefoglaló – új tudományos eredmények.....	90
	Summary – new scientific results.....	91

1. Bevezetés

A természetben számos olyan anyag található, melynek szerkezete apró cellákból áll. Ilyen a fa, a szivacs, de ilyen például az emberi koponya és combcsont is. Az emberiség már több ezer éve használ természetes celluláris anyagokat, de csak a XX. században kezdett el mesterséges celluláris szerkezeteket előállítani; először polimerekből, később fémekből és kerámiákból.

Az első fémhabot Sosnik állította elő alumíniumból az 1940-es években. Azóta számos eljárást dolgoztak ki fémhabok előállítására nemcsak alumíniumból [1]-[7], hanem magnéziumból, cinkből, titánból, acélból, sőt még nikkel szuperötvözetekből is [1], [8]-[11]. Napjainkban egyre több területen alkalmaznak habokat, mivel a habosítás során sokszor újszerű, szokatlanul kedvező tulajdonságokkal rendelkező anyagok jönnek létre. Fémek esetén így juthatunk nagy fajlagos szilárdságú, jó energiaelnyelő anyagokhoz, amelyek több száz fokos hőmérsékleten is stabilak, így a műanyaghabokkal ellentétben magas hőmérsékleten nem bocsátanak ki mérges gázokat. Emellett jó hangelnyelők, alkalmazhatók elektromágneses árnyékolásra és rezgéscsillapításra is, ugyanakkor a fémhabok száz százalékban újrahasznosíthatók.

Ezekből adódóan az egyik fő felhasználási terület a járműipar, ahol fémhabokat alkalmaznak ütközésienergia-elnyelőként az autók lökhárítójában és ajtajainak belsejében, vagy merevítésként például küszöbök belsejében. Így nemcsak az utasok védhetők hatékonyan, de jelentős súlycsökkenés – és ezáltal üzemanyag-megtakarítás – is elérhető. Alumínium habokat használnak például az Audi A8-ban, a legújabb Ferrari F430 sportkupékban és a Siemens Combino[®] villamosaiban, buszaiban és vasúti kocsijaiban is [12], de terveztek már emelhető munkaállvány-kart [13] és páncélautó golyóvédő borítását [14] is fémhabokból. Egy másik fontos alkalmazás a hangszigetelés: Japánban például magasutak, viaduktok alját borítják alumínium habbal [15].

Az eddig említett alkalmazásokhoz a fémhabokat nagy térfogatban kell előállítani. Az erre alkalmas előállítási módszerek kivétel nélkül zárt cellás habokat eredményeznek. Létrehozhatunk azonban nyitott cellás habokat is, amelyeknél a cellák átjárhatók. Ilyen típusú fémhabokat használnak például szűrőként, hőcserélőként, elemként, elektródaként, optikai tükröként, áteresztő védőmembránként, katalizátor-hordozóként, stb. [1], [16].

A fémhaboknak a felsoroltakon kívül is számtalan alkalmazási lehetősége merül fel, ezek széleskörű elterjedését azonban egyelőre gátolja az a tény, hogy – bár számos gyár foglalkozik fémhabok előállításával, és igen sok kutató vizsgálja az előállított habok tulajdonságait – sok alapvető kérdés még mindig nem tisztázott.

A fémhabok mechanikai, akusztikus, elektromos, stb. tulajdonságait alapvetően három tényező befolyásolja:

- 1) a habot alkotó szilárd fázis tulajdonságai (például a habot alkotó fém mikroszerkezete),
- 2) a szilárd fázis térfogati hányada, az úgynevezett relatív sűrűség, valamint, különösen mechanikai tulajdonságoknál
- 3) a szilárd fázis térbeli elrendeződése, azaz a fémhab szerkezete.

Míg az első két tényező hatását már ismerjük a hab különböző tulajdonságaira [1], [4], [16], addig a szerkezet szerepe annak bonyolultsága miatt még nem tisztázott.

Napjainkban e témában két kulcsfontosságú kutatási terület létezik. Az első terület az előállítási módszerek fejlesztése. Ezalatt egyrészt az előállítási költségek csökkentését, másrészt az előállítás során keletkező különböző gyártási hibák (például görbült, repedt, hiányzó cellafalak, cellaélek) számának mérséklését értjük. Ide sorolható ezeken kívül a tervezhetőség növelése is, azaz annak kutatása, hogy hogyan érhető el különböző előállítási eljárásokkal adott tulajdonságú (adott relatív sűrűségű, vagy adott szerkezetű) fémhab.

A másik fontos kutatási terület a szerkezetet meghatározó tényezők hatásának vizsgálata a hab tulajdonságaira és deformációs mechanizmusaira. Mint említettük, a fémhab tulajdonságait meghatározó tényezők közül egyedül a szerkezet szerepe nem tisztázott még.

A fémhab szerkezetét számos paraméterrel jellemezhetjük, például a cellaélekben és cellafalakban tárolt fém térfogati hányadával, a szilárd anyag eloszlásának egyenletességével, a cellák alakjával, méretével és eloszlásával, az előállítás során keletkezett repedések számával, nagyságával. Legtöbbször modellek vagy szimulációk segítségével vizsgálják azt, hogy ezek a szerkezeti paraméterek hogyan befolyásolják a fémhab mechanikai, elektromágneses stb. tulajdonságait. Mivel az egyszerű periodikus modellekbe a szerkezetet meghatározó paraméterek nem építhetők be, (hiszen ezzel például periodikus hibahelyeket vezetnénk be), ezért még a leegyszerűsített, egy-egy szerkezeti paraméter hatásának vizsgálatára kifejlesztett

modellek is gyakran olyan bonyolultak, hogy analitikusan nem, csak különböző numerikus számítások, vagy szimulációk segítségével oldhatók meg.

Jelen dolgozat alumíniumhabok mechanikai tulajdonságaival foglalkozik. Első eredményünk (3. fejezet) a fent említett két fő kutatási terület közül a másodikhoz kapcsolódik: egy fontos szerkezeti paraméter, a cellaméret-eloszlás hatását vizsgáljuk összenyomás során a fémhab alakítási keményedésére. A cellaméret-eloszlás hatásának tanulmányozására olyan modellt dolgoztunk ki, amely egyszerű cellaméret-eloszlások esetén analitikus megoldásra vezet.

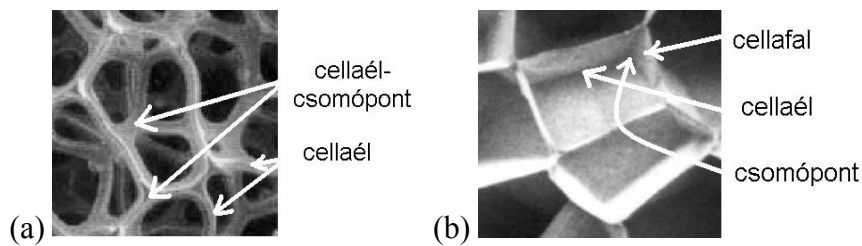
Ezt követően az összenyomás és benyomódás során lejátszódó deformációs folyamatokat tanulmányozzuk akusztikus emisszió segítségével. A 4. fejezetben megmutatjuk, hogy a benyomódás során mért akusztikus emissziós aktivitás alkalmas a fémhab deformációs mechanizmusainak azonosítására. Ezáltal lehetővé válik, hogy a deformáció során fellépő deformációs mechanizmusokat a mérhető elkerülése végett ne a szokásos nagy mintákon, hanem ennél jóval kisebbeken vizsgáljuk.

Végül a fémhab valódi szerkezetét figyelembe vevő végeselem szimuláció segítségével nyomon követjük a hab deformációját benyomódás során, majd a benyomódás során keletkezett deformációs zóna nagyságára adunk becslést (5. fejezet).

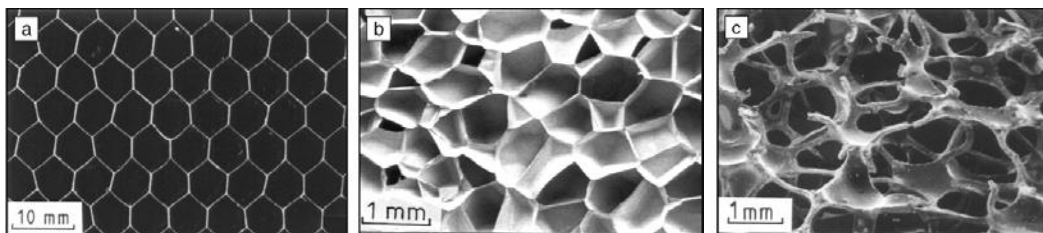
2. Irodalmi áttekintés

2.1. Alapfogalmak

Celluláris anyagoknak vagy celluláris szerkezeteknek nevezzük tömör rudak és/vagy tömör lemezek összefüggő hálózatát. A tömör rudakat a celluláris anyag éleinek, a lemezeket cellafaloknak, a cella üregét pedig pórusnak hívjuk (1. ábra). A celluláris anyagok lehetnek két-, illetve háromdimenziósak (2. ábra), ez utóbbiakat hívjuk haboknak. Ha egy hab csak cellaélekből áll, azaz a cellák nyitott cellaoldalon keresztül érintkeznek, akkor nyitott vagy nyílt cellás habról beszélünk. Ellenkező esetben, azaz ha a cellákat cellafal választja el, a hab zárt cellás. Természetesen léteznek félig zárt, félig nyitott cellás habok is, ezek azonban az alkalmazások szempontjából csekély jelentőséggel bírnak, így vizsgálatuktól jelen dolgozatban eltekintünk.



1. ábra. (a) Nyitott és (b) zárt cellák szerkezete [17]



2. ábra. Különböző szerkezetű celluláris anyagok: (a) kétdimenziós méhsejt szerkezet, (b) zárt cellás hab, (c) nyitott cellás hab [17]

Habosítással az anyagok tulajdonságai drámaian megváltoztathatók. Persze nem minden tulajdonság változik azonos módon, és vannak olyan tulajdonságok is (mint például a hőtágulási együttható), amelyek egyáltalán nem változnak. A habok legtöbb anyagi tulajdonságáról azonban elmondható, hogy függ a habban lévő tömör anyag

térfogatától. Emiatt a habok egyik legfontosabb paramétere a relatív sűrűség (ρ_{rel}), amely a hab sűrűségének és a hab tömör vázát alkotó anyag sűrűségének a hányadosa. Ez a paraméter a habban lévő szilárd anyag térfogati hányadát jellemzi, ha a cellákat kitöltő gáz tömegétől eltekintünk.

A fémhabok sajátosságait alapvetően a habot alkotó fém anyaga, a hab relatív sűrűsége, és celláinak nyitottsága/zártsága határozza meg. Fémhabok mechanikai, elektromos, hővezetési és akusztikus tulajdonságai P tulajdonság esetén általában a következő alakban írhatók:

$$P_{hab} = A \cdot P_s \cdot \rho_{rel}^n, \quad (2.1)$$

ahol P_{hab} illetve P_s a hab és a váz anyagának a tulajdonsága, míg n és az A arányossági tényező a hab szerkezetétől függő konstansok [1], [18]-[19]. Sok esetben tehát nem csak a relatív sűrűség és a váz anyaga befolyásolják a hab tulajdonságait, hanem a szerkezet is:

- zárt, vagy nyitott cellás-e a hab,
- zárt cellás hab esetén a cellaélekben és cellafalakban tárolt anyag térfogati hányada,
- a tömör anyag eloszlásának egyenletessége,
- a cellák mérete és eloszlása,
- a cellák alakja és anizotrópiája,
- az egy csúcsból kiinduló cellaélek átlagos száma,
- különböző hibák: repedések, meggörbült cellaélek, cellafalak, stb.

Az elmúlt években számos kutató vizsgálta a fentiekben felsorolt szerkezeti paraméterek hatásait a fémhab mechanikai tulajdonságaira [20]-[24]. Ezekből a kutatásokból az derült ki, hogy a mechanikai tulajdonságok szempontjából a relatív sűrűség mellett a fémhab szerkezetének hatása különösen jelentős.

A mechanikai tulajdonságokat a habot alkotó fém mikroszerkezete is nagymértékben befolyásolja, ugyanis ez határozza meg a váz anyagának mechanikai tulajdonságait. Kevesen tanulmányozták azonban ezidáig a mikroszerkezet szerepét. Ezek a vizsgálatok arra utalnak, hogy a cellaélek és cellafalak mikroszerkezete elsősorban csak a P_s -t, a fém anyagi tulajdonságát és a deformálódáskor lejátszódó deformációs mechanizmusokat befolyásolja [4], [25].

2.2. Fémhabok előállítása

Sok különböző fémhab előállítási technika ismeretes. Néhány módszer hasonlít a vizes habok és a műanyaghabok előállításához (fúvatóanyaggal történő habosítás), de vannak olyanok is, amelyeket speciálisan fémekre terveztek (elektrolitikus bevonatás, szinterelés). A leggyakoribb előállítási módszereket három csoportba sorolhatjuk [1], [26], [27]:

Olvadékból történő előállítás	Porkohászati módszerek	Bevonásos technikák
<ul style="list-style-type: none"> • Buborékoltatásos habosítás • Habosítás fúvatóanyaggal • Granulátumra öntés • Precíziós öntés 	<ul style="list-style-type: none"> • Fémpor habosítása fúvatóanyaggal • Habosítás pórusokba zárt gázzal • Üreges granulátum szinterelése 	<ul style="list-style-type: none"> • Bevonás galvanizálással • Bevonás porlasztással • Bevonás vákuumpárologtatással

1. táblázat. Fémhabok előállítása különböző módszerekkel

Az előállítási eljárás nagy mértékben befolyásolja a fémhab anyagi tulajdonságait, hiszen az alkalmazott előállítási módszer meghatározza a fémhab szerkezetét, a cellaélek és cellafalak mikroszerkezetét, valamint (adott határokon belül) a relatív sűrűséget is. Ezért az alábbiakban röviden ismertetjük a fontosabb előállítási módszereket és részletesen kitérünk a dolgozatban vizsgált fémhabok előállítási módszereire, szerkezeti tulajdonságaira és a hab vázának mikroszerkezeti sajátosságaira.

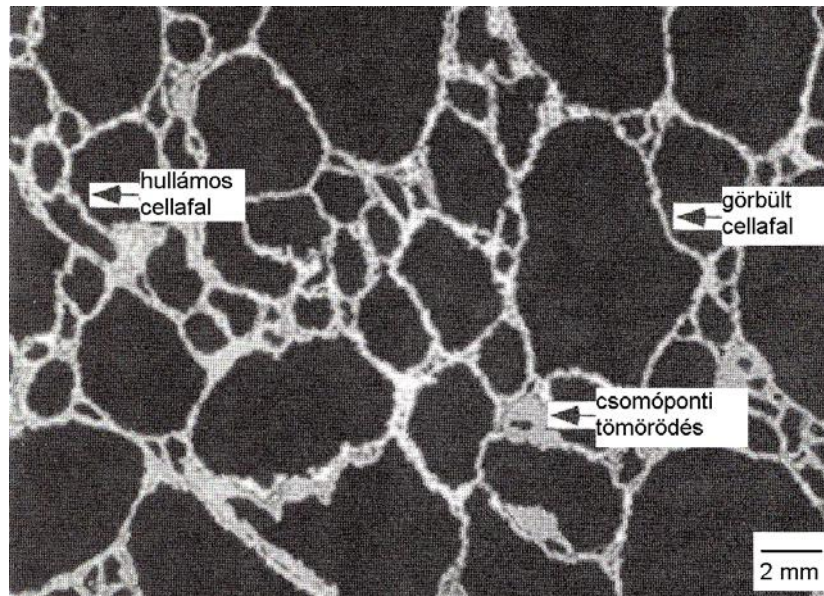
2.2.1. Fémhabok előállítása olvadékból

2.2.1.1. Buborékoltatásos habosítás

A módszer lényege, hogy a fémolvadékhoz először adalékanyagot, SiC vagy Al_2O_3 részecskéket adnak, amely növeli az olvadék viszkozitását és a hab stabilitását. A második lépésben az olvadékba benyomott gázt forgólapát vagy fúvóka segítségével apró gázbuborékokra bontják. A keletkező viszkózus buborék-olvadék keverék az olvadék felszínére emelkedik, ahonnan a folyadékhabot szállítószalag segítségével emelik ki. Megszilárdulás után vágják a fémhabot a megfelelő alakra. Az eljárás előnye a többi módszerrel szemben, hogy buborékoltatásos habosításnál a fémhab előállítása

folyamatos. A módszert Norvégiában (Hydro Aluminium) és Kanadában (Alcan International) is alkalmazzák.

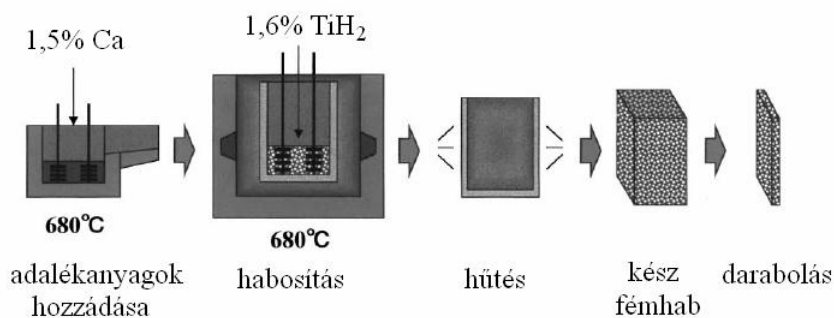
A buborékoltatásos habosítással előállított habok jellegzetes hibája a cellafalak görbültségén és hullámosságán kívül a hab nagymértékű inhomogenitása (csomóponti tömörödés, széles tartományban változó cellaméret és cellafal-vastagság) (3. ábra).



3. ábra. Alcan hab szerkezete [28]

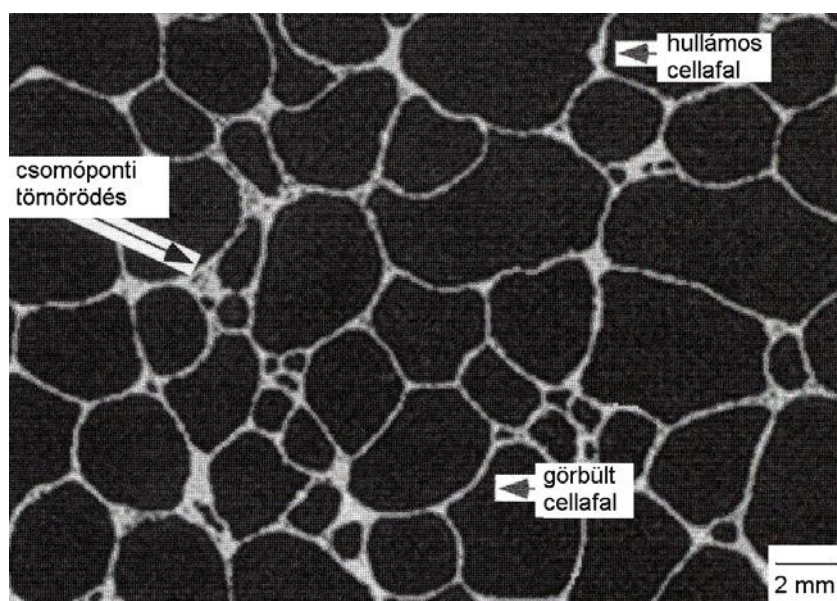
2.2.1.2. Olvadék habosítása fúvatóanyaggal

Ennél a módszernél gázképződés közben bomló anyag (fúvatóanyag) segítségével állítanak elő habot az olvadt alumíniumötvözetből. Ezt az eljárást, az úgynevezett Shinko Wire módszert alkalmazzák az Alporas habok gyártására [15]. Az előző eljáráshoz hasonlóan itt is növelni kell az olvadt fém viszkozitását. E célra kalciumot alkalmaznak, amiből 1,5-3 tömegszázaléknyit kevernek az olvadt alumíniumötvözetbe. (A keletkező kalcium-oxid (CaO) és kalcium-alumíniumoxid (CaAl_2O_4) növeli az olvadék viszkozitását.) Miután a viszkozitás elérte a megfelelő értéket, 1,6 tömegszázalék titán-hidridet (TiH_2) kevernek az olvadékhoz, ami ezen a hőmérsékleten ($680\text{ }^\circ\text{C}$) hidrogéngáz bomlása közben felfújja a viszkózus olvadéket, amely hűtéssel fémhabbá szilárdul (4. ábra). A fémhab sűrűségét és cellaméretét a viszkozitással és a habosodás alatt alkalmazott túlnyomással lehet változtatni.



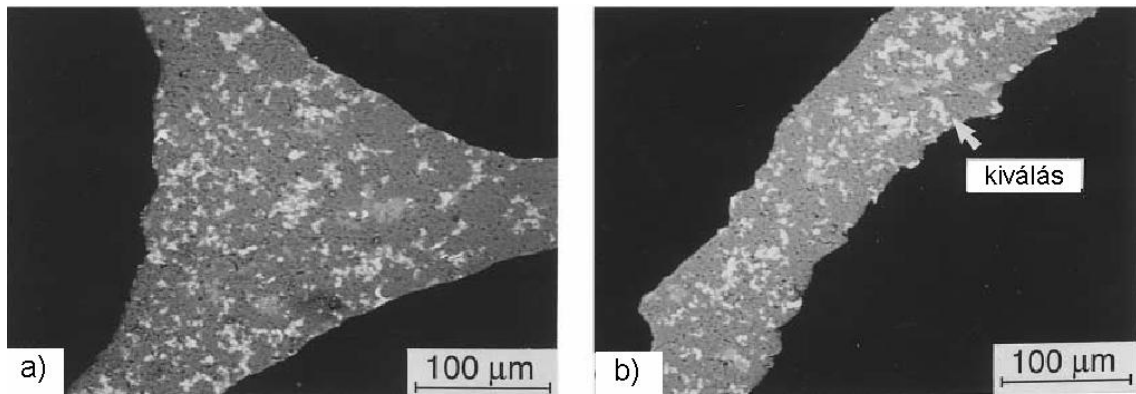
4. ábra. Alporas hab előállítása [15]

Az így előállított hab a legkevesebb hibát tartalmazó zárt cellás habok közé tartozik: a szerkezet homogénnek és izotrópnak tekinthető [20], a cellaéleken és a cellafalakon nincsenek repedések [29]. Az Alporas habok jellemző hibái közé a cellafalak görbültségét, hullámosságát, a csomóponti pórusok jelenlétét [26], [28], illetve a hiányzó cellafalakat [30] sorolhatjuk (5. ábra).



5. ábra. Alporas hab szerkezete [28]

A 6. ábra az Alporas hab vázának mikroszerkezetét mutatja. Az alumínium szilárdoldatban (99,47% Al, 0,32% Si, 0,01% Ca, 0,13% Ti és 0,06% Fe) kétféle kiválás különböztethető meg: Al-Ca-Ti fázisú (79,78% Al, 5,83% Ca és 14,27%Ti) diszperz kiválás és a hálózatot alkotó Al₄Ca kiválás [20].

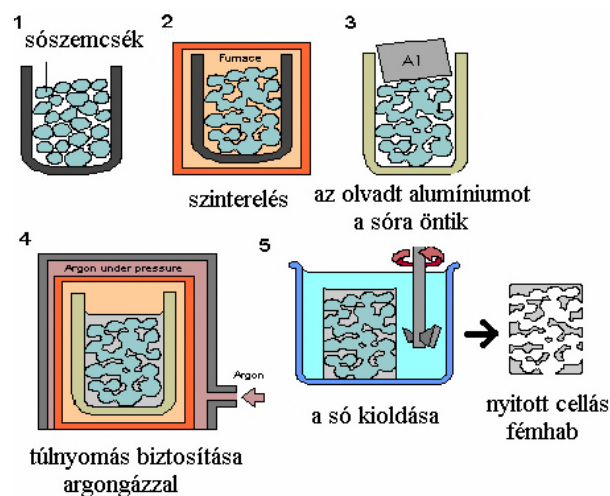


6. ábra. Pásztázó elektronmikroszkóppal készült felvételek az Alporas hab (a) cellaélének és (b) cellafalának mikroszerkezetéről [20]

2.2.1.3. Granulátumra öntés

Ezzel a módszerrel mind zárt, mind nyitott cellás habok előállíthatók. Az eljárás lényege, hogy az öntőformába olyan granulátumokat helyezünk, amelyek a fém olvadáspontján stabilak (például só, üreges korundgömbök). Ezután a granulátumra olvadt fémet öntünk, majd inert gáz segítségével túlnyomást hozunk létre, ami elősegíti az olvadék beáramlását a granulátumok közé. A keletkezett kompozitból a granulátumok eltávolításával nyitott cellás habot kapunk. A granulátumra öntés a legolcsóbb eljárások közé tartozik, ahol a cella alakja és mérete megfelelő granulátum választásával előre meghatározható. Hátránya viszont, hogy az így előállított hab relatív sűrűsége általában 20% fölött van [26].

Az egyik leggyakrabban alkalmazott granulátum a konyhasó. Ebben az esetben a sószemcséket szinterelik is, hogy a só kioldásával nyitott cellás habot nyerhessünk (7. ábra).



7. ábra. Granulátumra öntés

2.2.1.4. Precíziós öntés

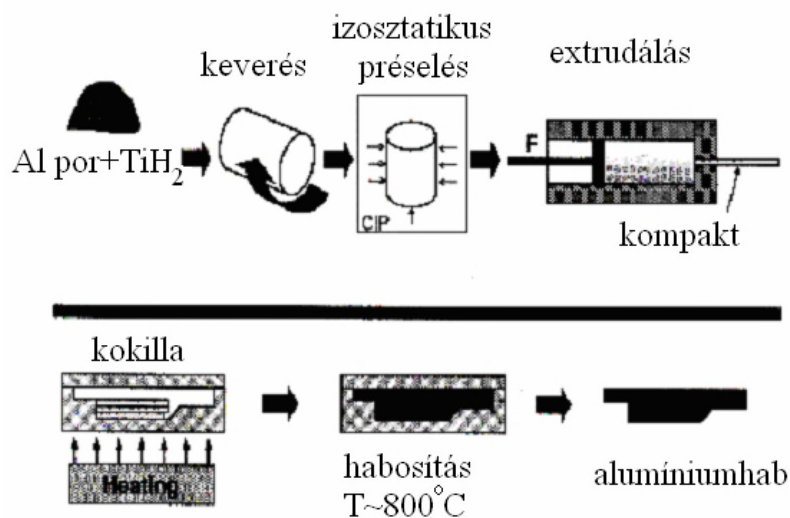
Az eljárás során egy műanyaghab szerkezetét másolják le. Először egy nyitott cellás műanyaghab üregeit folyékony, hőálló anyaggal, például gipsszel töltik ki, majd a műanyagot hőkezeléssel eltávolítják. A műanyag helyét fémolvadékkal töltik fel. Hűtés után a hőálló anyagot eltávolítják, így az eredetivel egyező szerkezetű fémhabhoz jutunk. Ezzel az eljárással készülnek a Duocel márkanévű habok.

2.2.2. Porkohászati módszerek

2.2.2.1. Fémpor habosítása fúvatóanyaggal

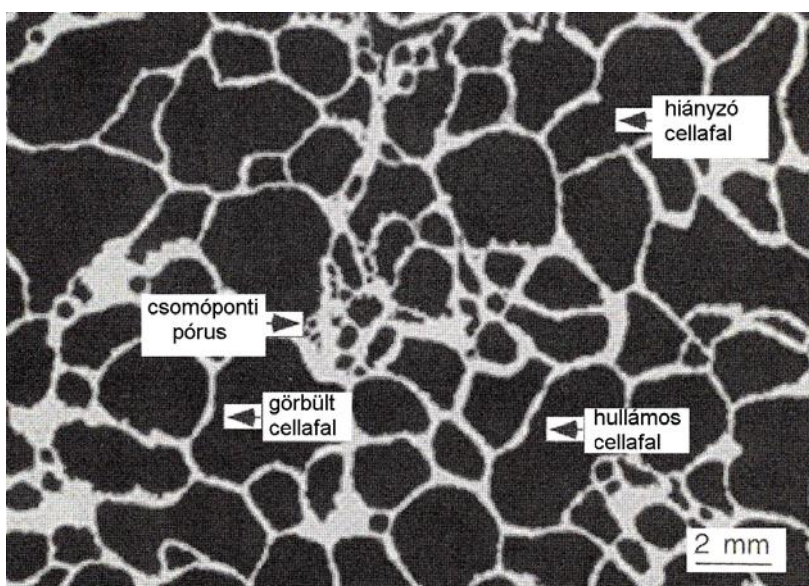
Ezt az előállítási módszert, habár porkohászati elemeket is tartalmaz, gyakran az olvadék habosításához sorolják, mivel a habosításkor az anyag olvadt állapotban van.

A fémport (általában alumíniumötvözet) először összekeverik a habosítóanyaggal, amely a fúvatóanyaggal történő habosításhoz hasonlóan itt is titán-hidrid. Ezt követően izosztatikus préssel, extrudálással vagy hengerléssel tömörítik a port, attól függően, hogy milyen alakú kompaktra van szükség. Végül a kompaktot kokillában a fém olvadáspontja fölé melegítik, ahol a titán-hidrid hidrogéngáz fejlődése közben elbomlik. Ez a hidrogéngáz fújja fel a már olvadt állapotban lévő fémet (8. ábra).



8. ábra. Alulight hab előállítása

A keletkező zárt cellás hab felületét az eljárás következtében vékony, tömör réteg borítja, amely sok felhasználási területen (például ütközésienergia-elnyelő rendszerekben) kifejezetten előnyös [31]. Az eljárás másik előnye, hogy bonyolult alakzatú fémhabok is létrehozhatók [32]. Problémaként jelentkezik viszont a szerkezet inhomogenitása, és a habban található különböző típusú hibák (cellafalak görbültsége, hullámossága, csomóponti pórusok [28], mikro- és makrorepedések a cellafalon [29], hiányzó cellafalak (9. ábra)), ami miatt az így készült habok mechanikai tulajdonságainak kicsi a reprodukálhatósága [33].



9. ábra. Alulight hab szerkezete [28]

2.2.2.2. Habosítás pórusokba zárt gázzal

Az előző eljáráshoz hasonlóan ennél a módszernél is fémpor a kiindulási anyag, amelyet először tömörítenek. Tömörítés közben az anyag pórusaiban argongázt nyeletnek el. Az anyag melegítésekor a pórusokba zárt nagy nyomású gáz fújja fel az anyagot. (A pórusok a fém kúszása következtében növekednek.) Az eljárással legfeljebb 50 %-os porozitású anyag nyerhető. A módszert a Boeing fejlesztette ki, főként titánötvözetek habosítására használják.

2.2.2.3. Üreges granulátum szinterelése

A módszer azon a megfigyelésen alapul, hogy porlasztáskor bizonyos körülmények között melléktermékként üreges gömbök keletkeznek. Ezeket a gömböket válogatás után folyadékfázisú szintereléssel vagy meleg izosztatikus préseléssel szinterelik.

2.2.3. Bevonásos technikák

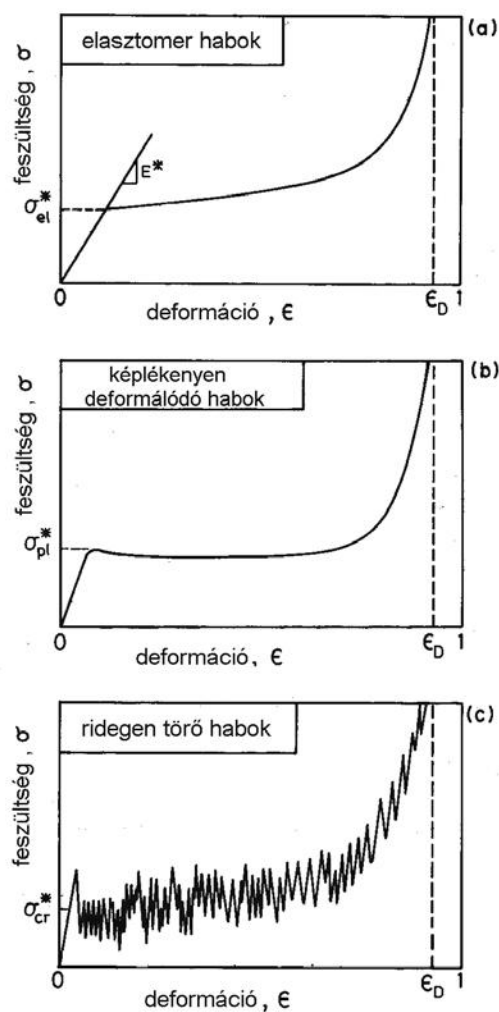
Mindhárom bevonásos módszernél nyitott cellás hab (általában műanyaghab) szerkezetét reprodukálják úgy, hogy különböző technológiákkal (galvanizálással, katódporlasztással vagy vákuumpárologtatással) vékony bevonatot képeznek a nyitott cellás hab cellaélein, majd a kiindulási hab anyagát kiégetik. Az így keletkező fémhab üreges cellaéleit ezután általában tömörítik, például szintereléssel. Ezekkel a módszerekkel érhető el a legkisebb relatív sűrűség (akár 0,02-0,05), emellett a cellák nagysága is széles tartományban változtatható; elérhető akár néhány μm átmérőjű cellákat tartalmazó anyag is.

2.3. Fémhabok mechanikai tulajdonságai

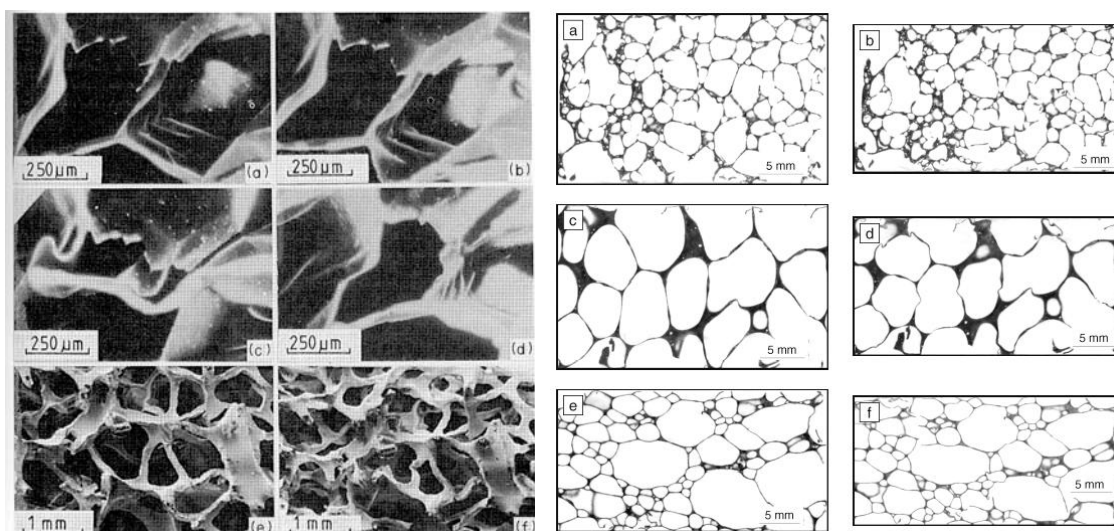
Zárt cellás fémhabokat jelenleg leginkább ütközésienergia-elnyelésre használnak autók, buszok, villamosok lökhárítójában, illetve tankok golyóvédő borításában, golyóvédő mellényekben. Újabban lakóépületek hangszigeteléséhez is alkalmaznak fémhabokat. Az alkalmazások szempontjából fontos ismerni a fémhabok különböző deformáció hatására megjelenő mechanikai tulajdonságait. Jelen dolgozatban alumíniumhabok összenyomási és benyomódási viselkedését vizsgáljuk, így a következő alfejezetekben csak a fémhabok összenyomási és benyomódási tulajdonságaira térünk ki részletesen.

2.3.1. Fémhabok deformációja összenyomás során

A 10. ábra eltérő anyagokból készített celluláris szerkezetek jellegzetes összenyomási alakítási görbéit mutatja. A deformációs görbe mindhárom esetben három szakaszra osztható: kvázi-lineáris szakaszra, hosszú platóra, és végül a tömörödési (denzifikációs) szakaszra. A különböző tartományokban a jellemző deformációs mechanizmus más és más. Az egyes deformációs szakaszokban végzett kiegészítő vizsgálatok (röntgen-tomográfia [29][20], optikai és pásztázó elektronmikroszkópia [16]) a következő szerkezeti változásokat tárták fel (11. ábra).



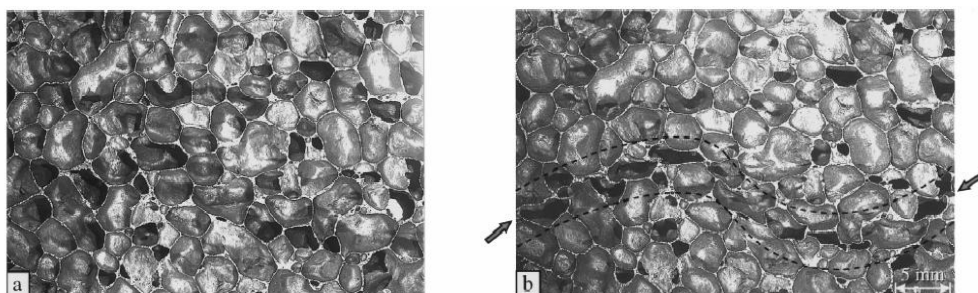
10. ábra. Sematikus feszültség-deformáció görbe [16]



11. ábra. Deformáció során fellépő szerkezeti változások különböző szerkezetű fémhabok esetén. (Páztázó elektronmikroszkóppal (1. és 2. oszlopok) [16] és röntgen-tomográfiával (3. és 4. oszlopok) [29] készült felvételek.) Az 1. és 3. oszlop képei a deformáció előtt, míg a 2. és 4. oszlop képei a deformáció után készültek.

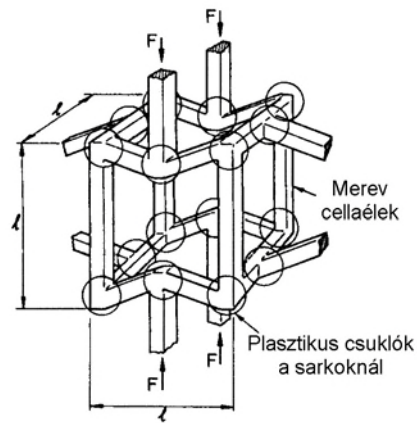
Kis deformációk esetén a nyitott cellás habok a cellaélek meghajlásával és megnyúlásával, illetve összenyomódásával, a zárt cellás habok pedig főként a cellafalak megnyúlásával deformálódnak. Nagyon kis deformációk esetén a hab rugalmas alakváltozást szenved, míg ha tovább terheljük, a hab szerkezete lokálisan már maradandó alakváltozást is mutathat [4.2. fejezet]. Ez a deformációs szakasz az E^* merevségi modulusszal jellemezhető.

A második szakaszban a deformáció növekedtével az átlagos feszültség nem, vagy csak alig emelkedik. A habok feszültség-deformáció görbéje leginkább ebben az úgynevezett platószakaszban tér el a tömör anyagok alakítási viselkedésétől. Míg a tömör anyagok általában homogéneen deformálódnak, addig a cellás szerkezetű anyagok deformációja a gyenge vagy túlterhelt területek celláira korlátozódik. Az itt lévő cellák roncsolódása után gyakran a szomszédos területek is meggyengülnek vagy túlterheltek lesznek, így a deformáció továbbterjed a szomszédos területekre, és úgynevezett deformációs sávot alkot (12. ábra) [34], [35]. A tapasztalatok szerint a habok a deformációs sávon kívül eső tartományokban nem, vagy csak alig deformálódnak, míg a deformációs sávokban a cellák összeroppannak, majd további alakítás hatására csaknem teljesen összetömörödnek.



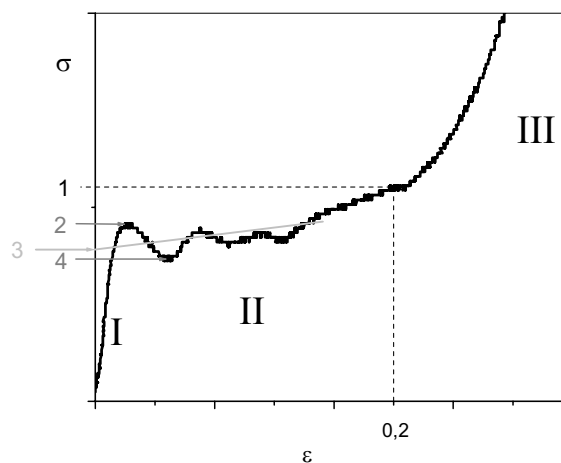
12. ábra. Deformációs sáv kialakulása Alporas habban: (a) eredeti cellaszerkezet, (b) a cellaszerkezet 4,4 % deformáció hatására [35]

A cellák összeroppanása különböző mechanizmusokkal mehet végbe, melyek függenek a cellaéleket és cellafalakat alkotó anyag mikroszerkezetétől, és a celluláris anyag szerkezetétől is. Eszerint háromféle celluláris szerkezetet különböztethetünk meg: elasztomer, képlékenyen deformálódó és ridegen törő habokat. Míg a platószakaszban az elasztomer habok a cellaélek és cellafalak rugalmas kihajlásával reverzibilis módon deformálódnak, addig a képlékeny habok alakváltozásakor a cellaélek találkozásánál, a csomópontokban, úgynevezett plasztikus csuklók keletkeznek (13. ábra). Rideg haboknál a cellaösszeroppanás főként a vázszerkezet rideg törésével megy végbe.



13. ábra. Plasztikus csuklók kialakulása [16]

Ez a deformációs szakasz mindhárom típusú hab esetén az úgynevezett σ_{pl}^* platófeszültséggel jellemezhető, amelyet általában a feszültség-deformáció görbe platójára illesztett egyenes tengelymetszeteként értelmezünk (10. ábra: rideg és elasztomer habok platófeszültsége, 14. ábra: interpolációval számolt feszültség). Képlékenyen deformálódó habok feszültség-deformáció görbéjénél gyakran egy felső és egy alsó folyáspont is észlelhető (14. ábra). Az ilyen típusú habok platófeszültségének általában a felső, ritkábban az alsó folyáspontban mérhető feszültségértéket veszik. További lehetőség, hogy a hab platófeszültségének adott, például a 20 százalékos deformációnál fellépő feszültségértéket tekintünk [36].



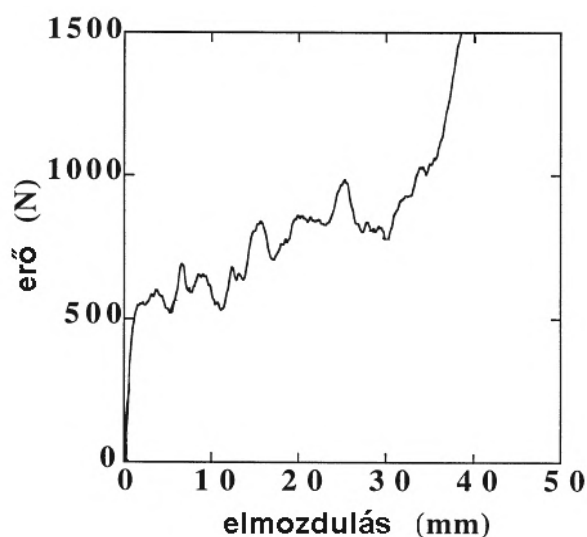
14. ábra. A platófeszültség definiálásának lehetőségei: **1** 20%-os deformációnál fellépő feszültség; **2** felső folyáshatár; **3** interpolációval számolt feszültség; **4** alsó folyáshatár

Azokban az alkalmazásokban, ahol a habokat ütközési energia elnyelésére használják, a platószakasz vége, az ε_D denzifikációs deformáció is fontos paraméter (10. ábra).

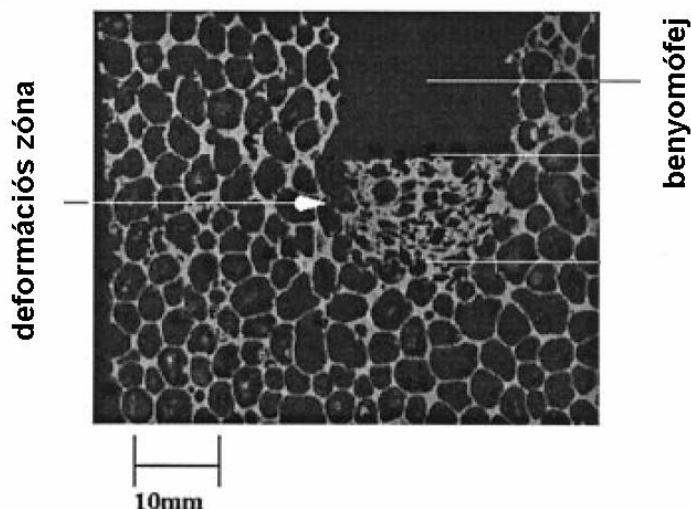
A harmadik, tömörödési szakaszban a már összeroppant cellák anyaga meredeken emelkedő feszültséget eredményezve tovább tömörödik. A deformáció növekedtével az összenyomott hab porozitása egyre kisebb lesz, míg végül az anyag jó közelítéssel eléri a tömör anyag sűrűségét.

2.3.2. Fémhabok deformációja benyomódás során

A fémhabok benyomódási görbéje (15. ábra) nagyon hasonlít az összenyomási görbékre. A benyomódási görbék is három részre oszthatók: egy kvázi-lineáris részre, amit a feszültségplató követ, végül pedig egy tömörödési szakaszra. Az egyes szakaszokban a fémhab itt is az összenyomásnál leírt deformációs mechanizmusok szerint deformálódik azzal a különbséggel, hogy míg összenyomáskor a deformáció a minta teljes térfogatában végbemehet, addig benyomódás esetén a hab lényegében csak a benyomófej alatt deformálódik (16. ábra), mivel a plasztikus Poisson szám közel nulla [37]. Ezáltal a deformáció benyomódás esetén kis térfogatra lokalizálódik.



15. ábra. Tipikus erő-elmozdulás görbe benyomódás esetén [37]



16. ábra. Deformációs zóna benyomódás során [37]

A platószakasz benyomódáskor még képlékenyen deformálódó fémhabok esetén is erősen fogazott. Az összenyomási görbékkel ellentétben itt jelentős alakítási keményedés tapasztalható, különösen akkor, ha a benyomódás csak néhány cellaméretnyi benyomófejjel történik. Növelve a benyomófej átmérőjét az alakítási keményedés egyre csökken. Természetesen mind a platófeszültség, mind az alakítási keményedés mértéke függ a benyomófej alakjától. A benyomódási vizsgálatoknál legtöbbször sík benyomófejet alkalmaznak [4], [16], [37]. A tapasztalat azt mutatja, hogy körülbelül nyolcszoros cellaátmérőjű sík benyomófej esetén a benyomódási és összenyomási alakítási keményedés megegyezik [37].

2.3.3. Mérethatások

Ha a minta mérete csupán néhány cellaátmérő nagyságú, a minta mérete befolyásolhatja a mért mechanikai paramétereket. Szabályos méhsejt szerkezeten végzett számítások és fémhabokon végzett mérések azt mutatják, hogy a minta lényeges méreteinek (mint például a magasság és a szélesség) csökkenése benyomódás esetén növeli, összenyomás esetén csökkenti az anyag szilárdságát a tömbi fémhab szilárdságához képest [38]-[40]. (Tömbi fémhabon most az átlagos cellaméretnél jóval nagyobb méretű, mérethatást már nem mutató fémhabot értünk.)

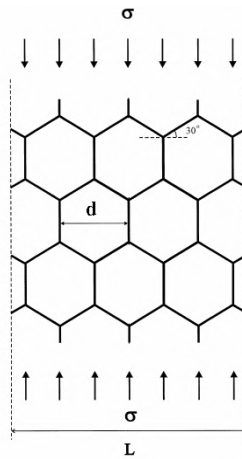
A mérethatás fémhabok esetében két okra vezethető vissza.

- A minta méretének csökkenése esetén nő a feszültségmentes, terhet nem viselő cellaélek és cellafalak aránya, így csökken a terhet viselő cellaélek és cellafalak száma.

- Másrészt a felület mentén elhelyezkedő cellafal- és cellaél-csomópontok (több él illetve fal találkozási helye) a szimulációk szerint nagyobb mértékben fordulnak el, mint a minta belsejében lévő csomópontok, növelve ezáltal a keskeny minták függőleges irányú behajlását.

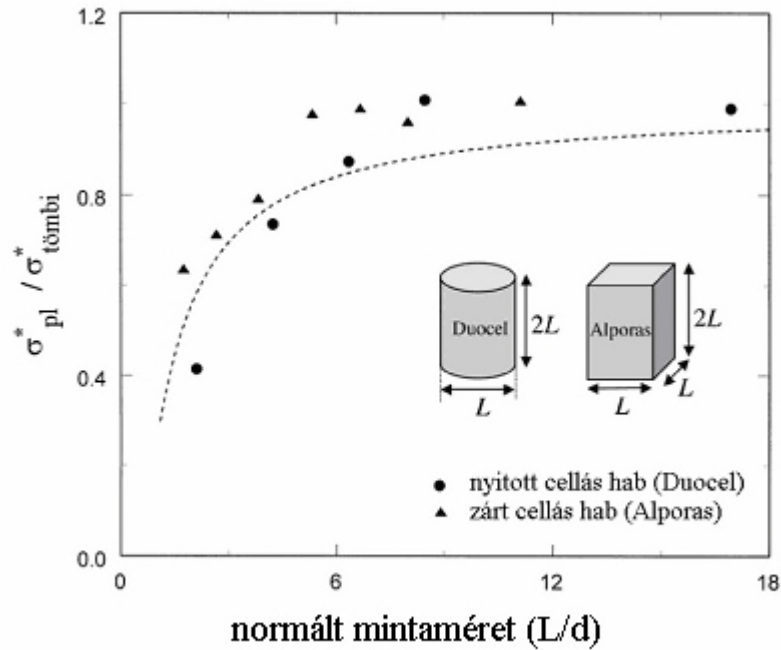
Összenyomás esetén a minta méretének csökkenésével csökkenő szilárdság a minta felületén elhelyezkedő feszültségmentes cellaélek és cellafalak arányának növekedésével magyarázható. Az L széles és d cellaátmérőjű szabályos méhsejt szerkezeten (17. ábra) végzett számítások alapján a minta σ_{pl}^* platófeszültsége a tömbi fémhab $\sigma_{tömbi}^*$ platófeszültségének segítségével a következőképpen fejezhető ki [38]:

$$\sigma_{pl}^* = \frac{(L/d - 1/2)^2}{(L/d)^2} \sigma_{tömbi}^* \quad (2.2)$$



17. ábra. L széles, d cellaátmérőjű szabályos méhsejt-szerkezet

A 2.2 kifejezésből látható, hogy ha a minta mérete elég nagy a cellamérethez képest, akkor a minta platófeszültsége lényegében megegyezik a tömbi fémhabon mért platófeszültség értékével. Zárt cellás Alporas és nyitott cellás Duocel habokon végzett mérések azt mutatják, hogy $L/d \geq 6$ esetén ez a feltétel már teljesül (18. ábra) [39].



18. ábra. A minta méretének hatása a platófeszültségre. A tömbi fémhab platófeszültségével normált platófeszültség a cellaátmérővel normált mintaméret függvényében, nyitott és zárt cellás habokra. A szaggatott vonal a (2.2) egyenletnek felel meg [39].

Benyomódás esetén a benyomódáshoz szükséges F_{be} erő két tagból tevődik össze: a benyomófej alatti hab összenyomásához szükséges $F_{\text{össze}}$ erőből és a benyomófej kerülete mentén ható $F_{\text{nyíró}}$ nyíróerőből. Így az erő D átmérőjű benyomófej esetén, ha a nyírás mélysége csak egy cellaátmérő

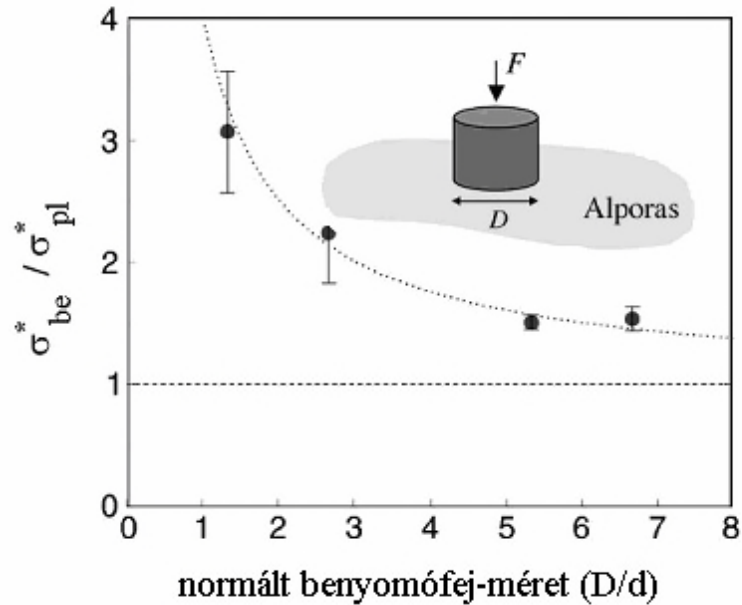
$$F_{be} = F_{\text{össze}} + F_{\text{nyíró}} = \sigma_{pl}^* \frac{\pi D^2}{4} + \tau_{pl}^* \pi D d . \quad (2.3)$$

A (2.3) kifejezésből a feszültségekre a

$$\frac{\sigma_{be}^*}{\sigma_{pl}^*} = 1 + \left(\frac{\tau_{pl}^*}{\sigma_{pl}^*} \right) \frac{d}{D} \quad (2.4)$$

adódik, ahol σ_{pl}^* és τ_{pl}^* a tömbi fémhab plató- és nyírófeszültsége, míg d az átlagos cellaátmérő.

Alporas habon végzett benyomódási kísérletek azt mutatják, hogy ha a benyomófej átmérője legalább a cellaátmérő hatszorosa, akkor a mérethatásoktól eltekinthetünk (19. ábra) [39].



19. ábra. A benyomófej átmérőjének hatása a benyomódási platófeszültségre. A tömbi fémhab összenyomási platófeszültségével normált platófeszültség a cellaátmérővel normált benyomófej-méret függvényében, zárt cellás Alporas habokra. A szaggatott vonal a (2.4) egyenletnek felel meg [39].

Általánosan megállapíthatjuk, hogy összenyomás és benyomódás esetén eltekinthetünk a mérethatásoktól, ha a minta illetve a benyomófej mérete legalább hatszorosa a cellaátmérőnek.

2.4. Vizsgálati módszerek

A celluláris anyagok modellezése és szimulációja mind a kutatók, mind a habok gyártói és ipari felhasználói részéről széleskörű érdeklődésre tart számot. Ezen a területen a kutatások két fő irány mentén folynak: egyrészt optimális tulajdonságú habok előállítása, másrészt különféle alkatrészek tervezése celluláris anyagokból. Míg az elsónél fontos ismerni például a habot jellemző különböző szerkezeti paraméterek hatását a hab egyes tulajdonságaira, addig az alkatrészek tervezésénél inkább egyszerű és gyorsan alkalmazható összefüggésekre van szükség, amelyeket „ökölszabályként” lehet használni.

A két kutatási iránynak megfelelően a habokat mikro-, mezo- és makroszkopikus skálán vizsgálják. A hab mechanikai tulajdonságainak meghatározásakor a relatív sűrűségeen kívül a habot alkotó anyag tulajdonságait és a hab szilárd vázának és

üregének térbeli elhelyezkedésének a hatását is figyelembe veszik. A celluláris anyagot ekkor tehát mikroszkopikus és mezoszkopikus skálán is vizsgálják. A fémhabalkatrészek tervezésénél ezzel szemben a hab viselkedését makroszkopikus skálán nézik, azaz a hab bonyolult celluláris szerkezete helyett olyan homogén anyag deformációját vizsgálják, amelynek tulajdonságai megegyeznek a celluláris anyag makroszkopikus tulajdonságaival. Természetesen ez utóbbi módszer csak abban az esetben alkalmazható, ha a minta vagy alkatrész mérete sokszorososa az átlagos cellaméretnek.

A következő alfejezetekben olyan, a dolgozatban is használt roncsolásmentes vizsgálati módszereket tekintünk át, amelyekkel a fémhabok szerkezeti és mechanikai tulajdonságai mikro- és mezoszkopikus skálán vizsgálhatók; ezek a röntgentomográfia és az akusztikus emisszió.

2.4.1. Röntgentomográfia

A fémhabok mechanikai tulajdonságait lényegesen befolyásolja a hab szerkezete: a cellák alakja, mérete, a cellák átmérőjének és a cellaélek, cellafalak vastagságának eloszlása, a cellafalak, cellaélek hullámossága, görbültsége, stb. A szerkezetet leíró paraméterek meghatározásához legtöbbször nem elég a szerkezet két dimenziós metszetének vizsgálata. A háromdimenziós szerkezet feltérképezésének egyik lehetséges módszere a röntgentomográfia, amelynek segítségével a szerkezet pontosabban írható le, mint a hagyományos metallográfiai módszerekkel.

A röntgenradiográfia a röntgensugarak elnyelődésén alapul, amelyet a Beer-Lambert törvénnyel írhatunk le. Az abszorpciós törvény megadja a mintán való áthaladás után kilépő fotonok számának (N_1) és a belépő fotonok számának (N_0) hányadosát a μ lineáris abszorpciós együttható függvényében. Ha μ változik a γ út mentén, akkor a lineáris abszorpciós együttható γ útra vett integráljával kell számolni:

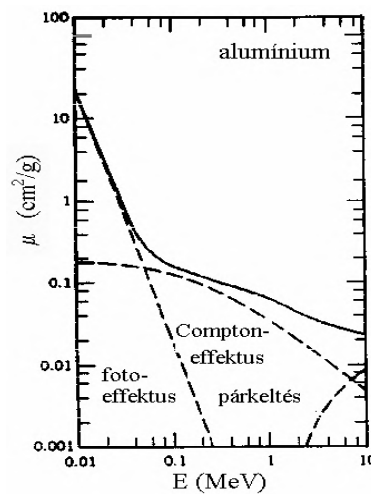
$$\frac{N_1}{N_0} = \exp\left[-\int_{\gamma} \mu(x, y, z) dz\right]. \quad (2.5)$$

A lineáris abszorpciós együttható függ a foton E energiájától, az anyag ρ sűrűségétől és Z rendszámától. Kis energiákon (MeV alatt) a μ értékét meghatározó két legfontosabb kölcsönhatás a röntgenfotonok és az anyag között a fotoeffektus és a Compton-effektus [1], [41] (20. ábra). Kisenergiás röntgenfotonok és az anyag

kölcsönhatásában (alumínium esetén 60 keV-nél kisebb energiájú fotonok esetén) a fotoeffektus dominál, ekkor

$$\mu(x, y, z) = K\rho \frac{Z^4}{E^3}, \quad (2.6)$$

ahol K konstans. Nagyobb energiáknál (alumíniumnál körülbelül 60 keV és 2 MeV között) a Compton-effektus lesz jelentős. Ekkor a lineáris abszorpciós együttható közel független a beeső foton energiájától és a vizsgált anyag rendszámától, ekkor μ a minta sűrűségével arányos.



20. ábra. Az alumínium lineáris abszorpciós együtthatójának energiafüggése a különböző kölcsönhatási folyamatokra vonatkozóan

A Beer-Lambert törvény megmagyarázza a kontrasztot az anyag röntgenradiográfiával kapott képen: ha a röntgensugár olyan heterogén rendszeren halad át, amelyet alkotó anyagok lineáris abszorpciós együtthatói eltérőek, akkor a lineáris abszorpciós együttható különböző γ utakra vett integrálja a hely függvényében változik. Ezt használják ki az orvosi alkalmazásokban is (testrészekről készített röntgenfelvételek). Adott heterogén anyag esetén (például fémhaboknál) jobb kontrasztot kaphatunk, ha a méréseket a fotoeffektus tartományában végezzük.

A radiográfia hátránya, hogy sok információt vetít egymásra, emiatt a keletkezett képet sokszor nehéz értelmezni. Ha azonban elegendően sok, különböző szögben felvett radiogram áll a rendelkezésünkre, akkor az adatokból következtethetünk a lineáris abszorpciós együttható mintán belüli térbeli eloszlására. Ennek kiszámítására többféle módszer is létezik, a gyakorlatban a Radon-tételt alkalmazó módszer terjedt el,

amellyel a leggyorsabban számíthatjuk ki a lineáris abszorpciós együttható térbeli eloszlását. (A Radon-tétel azt mondja ki, hogy egy kétváltozós $\mu(x,y)$ függvény valamely egyenesre vett vetületének Fourier-transzformáltja megegyezik a $\mu(x,y)$ függvény kétdimenziós Fourier-transzformáltjának ugyanezen egyenes mentén vett metszetével [41].)

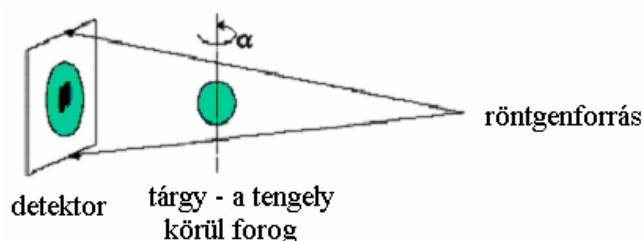
A röntgentomográfia a gyakorlatban többféle elrendezéssel is megvalósítható, amelyeket az elérhető felbontás alapján két nagy csoportba oszthatunk [42]:

- *közepes felbontású röntgentomográfiára*, ahol a maximális felbontás $10\ \mu\text{m}$ (az orvosi készülékek felbontása $300\ \mu\text{m}$ körül van), és
- *nagy felbontású röntgentomográfiára*, itt akár $1\ \mu\text{m}$ -es felbontás is elérhető.

Az elrendezések közös jellemzője, hogy mindegyik egy forrásból, egy forgó mintaállványból és egy röntgendetektorból áll. Manapság a detektoron kapott jelet megfelelő optikai lencsék segítségével kétdimenziós CCD kamerára továbbítják, így rögtön a kétdimenziós radiogramok digitalizált képét kapjuk meg.

Fémhabok szerkezetének (cellák, cellafalak alakja, nagysága, stb.) vizsgálatához elegendő a közepes felbontású röntgentomográfia, hiszen a cellafalak, cellaélek vastagsága legtöbbször néhány száz μm , míg a cellák ennél jóval nagyobbak.

A közepes felbontású tomográfiánál alkalmazott szokásos elrendezés a 21. ábrán látható. A mintát ebben az esetben kúp alakú nyalábtérrel képezik le. Mivel a laboratóriumi körülmények között előállított röntgennyaláb intenzitása monokromatikus nyaláb esetén kicsi lenne, legtöbbször polikromatikus nyalábot használnak. Ezzel kerülnek el, hogy az adatgyűjtési idő túl hosszú legyen. Ennek ellenére egy minta tomográf felvételének elkészítése a felbontástól függően több órát is igénybe vehet.



21. ábra. Közepes felbontású röntgentomográfiához használt kísérleti elrendezés. Ilyen elrendezést alkalmaznak a legtöbb egyetemi és ipari laboratóriumban.

$10\ \mu\text{m}$ -nél jobb felbontást érhetünk el, ha röntgenforrásnak nem egyszerű röntgensövet, hanem szinkrotronoknál előállított nyalábot használunk. A

szinkrotronoknál a nyaláb gyakorlatilag párhuzamos sugarakból áll, a kúp alakú nyalábtérrel ellentétben itt elég a mintát csak 180° -kal forgatni, így egy háromdimenziós felvétel elkészítése fél óra alatt (a legújabb technológiával akár már 15 perc alatt is) elvégezhető. A szinkrotron forrás alkalmas in-situ mérések elvégzésére is, például fémhabok deformációs mechanizmusainak vizsgálatára.

Röntgentomográfia segítségével a fémhab kiindulási cellaszerkezetét is feltérképezhetjük. A kapott adathalmazból azonban sokszor nehéz kinyerni a szerkezetet jellemző paramétereket. Az egyik legegyszerűbb eljárás, amivel a fémhabok cellaátmérőjének vagy cellafalvastagságának eloszlásáról képet kaphatunk, a *granulometria*, amely ugyan csak közelítőleg adja meg az eloszlásokat, sok esetben azonban nincs más lehetőség arra, hogy a kívánt paramétereket a tomográf képekből kinyerjük.

A granulometria során két morfológiai transzformációt alkalmazunk, az eróziót és a dilatációt. A transzformációk elvégzése előtt a háromdimenziós képeket fekete-fehér, úgynevezett bináris képpé kell alakítani. Jelöljük a pórusoknak megfelelő fekete voxeleket egyessel, a fémnek megfelelőket (fehér voxelek) pedig nullával. A kép eróziója után egy voxel új értéke legyen nulla, ha az értéke eredetileg is nulla volt, vagy volt olyan lapszomszédja, amelynek értéke nulla, minden más esetben az értéke legyen egy. Szemléletesen ez azt jelenti, hogy például egy fallal körbezárt pórus erodált képét úgy kapjuk, hogy a fal és a pórus határfelületén lévő voxeleket a falhoz csatoljuk. Az erózió komplementer művelete a dilatáció, amely azon voxelek értékét változtatja nulláról egyre, melyeknek van egyes értékű lapszomszédja.

Granulometria során ezt a két műveletet alkalmazzuk felváltva. A pórusméret meghatározásához első körben egy eróziót követően egy dilatációt alkalmazunk. A következő, második körben két erózió után két dilatációt alkalmazunk és így tovább; az n . körben n számú erózió után n dilatációt végzünk el a fekete-fehér képen. Minden egyes körben feljegyezzük, hogy az előző körhöz képest a képen hány fekete (egyes értékű) voxellet kevesebb. Ez a voxelkülönbség ad információt a cellák méreteloszlásától. Kör alakú pórusok esetén ugyanis az elvégzett eróziók illetve dilatációk száma (n) közelítőleg a pórusátmérő felével egyenlő, míg az ebben a körben „eltűnő” fekete voxelek száma az $n/2$ sugarú gömbök összterfogatát adja meg. A cellafalak és cellaélek vastagságának eloszlását kapjuk a fenti módszerrel, ha a bináris képen a fémnek megfelelő voxeleket jelöljük egyessel, a pórusoknak megfelelőket pedig nullával.

Jelenleg nyitott cellás habok pórusméret-eloszlását, és zárt cellás habok átlagos fal- és élvastagságát lényegében csak granulometriával lehet meghatározni. (Megpróbálták már nyitott cellás habok pórusméretét-eloszlását a cellák zárásának módszerével meghatározni [43], de ilyen módon a pórusok mérete csak kis térfogatban számítható, mivel az eljárás még nem automatizált.)

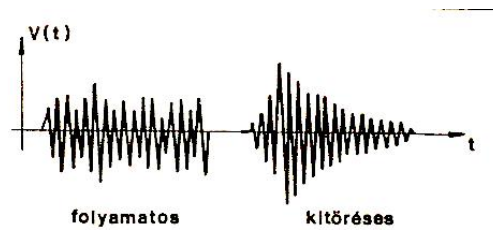
A tomográfiával nemcsak a fémhab szerkezetét térképezhetjük fel, hanem deformáció során a szerkezet változásait is nyomon követhetjük. Az ilyen vizsgálatok jól kiegészíthetők akusztikus emissziós mérésekkel, melyekkel a habokban terhelés hatására bekövetkező deformáció mechanizmusai vizsgálhatók.

2.4.2. Akusztikus emisszió

Akusztikus emisszióknak (AE) nevezzük a szilárdtestben tárolt energia felszabadulása közben keletkező rugalmas hullámokat [44]. Akusztikus emissziót váltanak ki például a szilárd anyag szerkezetében terhelés hatására létrejövő mikroszkopikus változások és a repedési felületek súrlódása is [45]. Az akusztikus emissziós forrásokat általában az alábbi négy csoportba sorolják [44]:

- diszlokáció mozgások,
- fázisátalakulások,
- súrlódások,
- repedések kialakulása és terjedése.

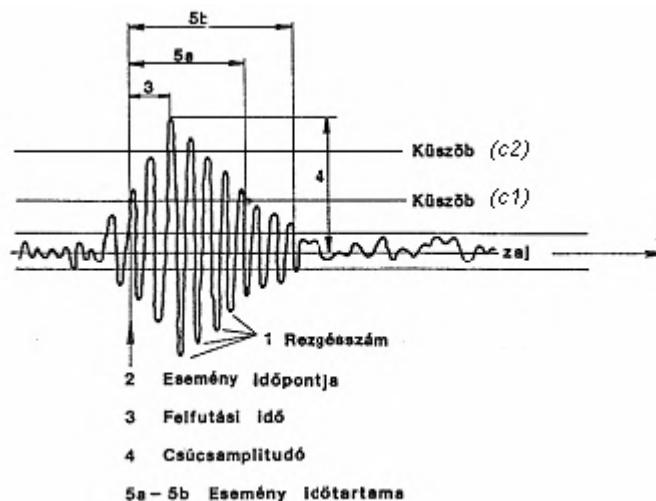
A különböző forrásokból származó jelek alakja más és más. Megkülönböztethetők egyedi hangkitörések, illetve több forrás egyedi hangkitöréseinek eredőjeként létrejövő AE jelek, amelyeknél az egyes események illetve kitörések nem különülnek el. Az előbbit kitöréses emisszióknak, míg az utóbbit folyamatos emisszióknak nevezzük [46] (22. ábra). Folyamatos emissziót detektálunk például diszlokáció-mozgáskor, de ilyen jelet ad a gépzaj is. Ezzel szemben kitöréses emissziót észlelünk a folyamatos emissziónál több nagyságrenddel nagyobb energia-felszabadulással járó folyamatoknál, mint például repedések keletkezésénél és terjedésénél. Fémhaboknál a folyamatos emisszió forrása a már megrepedt vagy eltört cellaélek és cellafalak súrlódása, illetve az élek és a falak képlékeny deformációja, míg kitöréses emissziót okoznak a cellafalakban és élekben létrejövő mikrorepedések, ezek terjedése és a cellaélek és cellafalak kihajlása és törése [47].



22. ábra. Folyamatos és kitöréses emisszió jelalakja [44]

A kapott jel kiértékelésénél fontos tudni, hogy milyen tényezők hogyan befolyásolják a mért AE jelet, hiszen a mért jel amplitúdója és az AE aktivitás (azaz az AE események száma) nemcsak a forrástól, hanem az anyag szilárdságától, hőmérsékletétől, szemcseszerkezetének durvaságától is függ. Általában az alábbi körülmények növelik az AE jel gyakoriságát és amplitúdóját: nagy szilárdság, alacsony hőmérséklet, anizotrópia, rideg törés, inhomogenitás és durva szemcseszerkezet. Ezzel ellentétben alacsony akusztikus aktivitásra számíthatunk szívós törés, képlékeny alakváltozás, magas hőmérséklet valamint kis szilárdság esetén [44].

Az anyag AE aktivitásának mérésekor az anyagban tárolt energia felszabadulása közben keletkező rugalmas hullámokat egy piezoelektromos érzékelő alakítja át elektromos jellé [44], [48]. Egy ilyen elektromos jel látható a 23. ábrán.



23. ábra. Tipikus akusztikus emissziós jel és paraméterei [44]

A rugalmas hullámot létrehozó akusztikus esemény az alábbi paraméterekkel jellemezhető (23. ábra):

- esemény időpontja: az az időpont, amelynél a jel burkológörbéje átlépi a küszöbértéket,

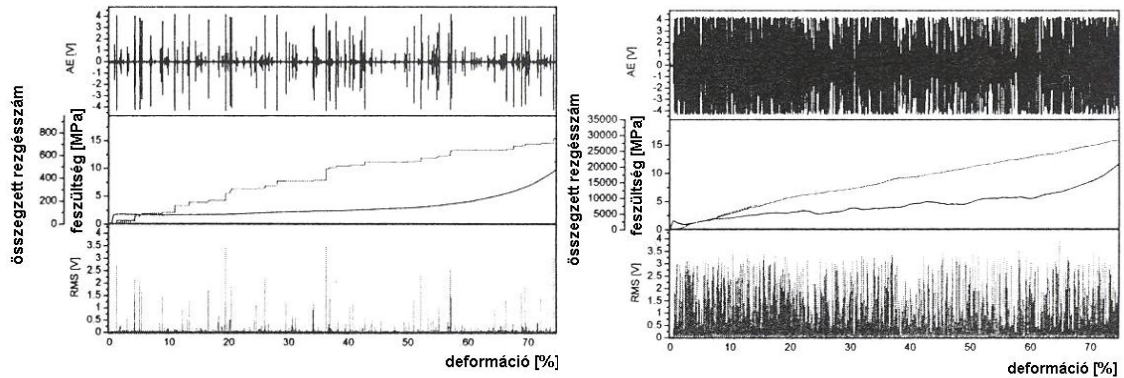
- esemény vége: amely időpont után a jel burkológörbéje T_d (holtidő) ideig nem lépi túl a küszöbértéket,
- felfutási idő: az esemény kezdetétől a csúcserték eléréséig eltelt idő,
- eseményszám-gyakoriság: időegységre eső események száma,
- rezgésszám-gyakoriság: időegység alatt $c1$ illetve $c2$ küszöbértéket átlépő rezgésszám (\dot{N}_{c1} , \dot{N}_{c2}),
- összegzett rezgésszám: a rezgésszám folyamatosan összegzett értéke,
- $$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} .$$

Bár az akusztikus emissziós vizsgálat olcsó, gyors, roncsolásmentes eljárás, amely alkalmas a terhelés hatására végbemenő deformációs mechanizmusok vizsgálatára, a gyakorlatban mégsem szokták fémhabok deformálódásának jellemzésére használni. Ennek az az oka, hogy nehéz a mérés során kapott eredmények értelmezése. A forrástól az érzékelőig terjedő úton megváltozik ugyanis a hullámok amplitúdója és fázisa, ezért a forrásra jellemző emissziós jel csak áttételesen ismerhető. A fémhaboknál ráadásul a sok határfelület is változtatja, torzítja a hullámokat, így az AE-t az utóbbi időkig többnyire csak más mérésekkel együtt, kiegészítő mérésnek vagy összehasonlító kvalitatív jellemzésre használták.

Fémhabokon mostanáig csak Baumgärtner és társai végeztek akusztikus emissziós méréseket [47]. Méréseiknél különböző anyagokból (AlSi7, AlSi12; Al99,7; AlSi6Cu4, AlMg1Si0,6CuCr) készült, körülbelül azonos sűrűségű ($0,3 \text{ g/cm}^3$) fémhabok akusztikus emisszióját vizsgálták összenyomás során. Vizsgálataik kimutatták, hogy a mért AE görbe tükrözi a habra jellemző deformációs mechanizmusokat. A képlékenyen deformálódó Al99,7-ből készült fémhabnál összenyomáskor a folyamatos emisszió dominál, a kitöréses emisszió ritka, és inkább csak a deformáció második, platószakaszában jelenik meg (24. ábra). Ez arra enged következtetni, hogy a fémhab ekkor képlékeny csuklók kialakulásával deformálódik a cellafalak törése nélkül.

Ezzel ellentétben a többi fémhab esetén az AE görbék a következő sajátosságokat mutatták: a deformáció első, kvázi-lineáris szakaszában alig van AE aktivitás, és a jel többnyire folyamatos típusú, míg a második, platószakaszt nagy energiás, kitöréses emissziók jellemzik, amelyek összegzett rezgésszáma ridegen törő fémhaboknál lineárisan nő a deformációval (24. ábra). Ennek alapján az mondható,

hogy a rideg anyagból készült habok a deformáció első szakaszában lényegében rugalmasan deformálódnak, majd a terhelés növelésével a második szakaszban a fő deformációs mechanizmus a repedések keletkezése és terjedése.



24. ábra. A feszültség, az RMS és az összegzett rezgésszám (2 V-os küszöbértéknél) a deformáció függvényében Al99,7 (bal oldal) és AlSi12 (jobb oldal) fémhabok esetén [47]

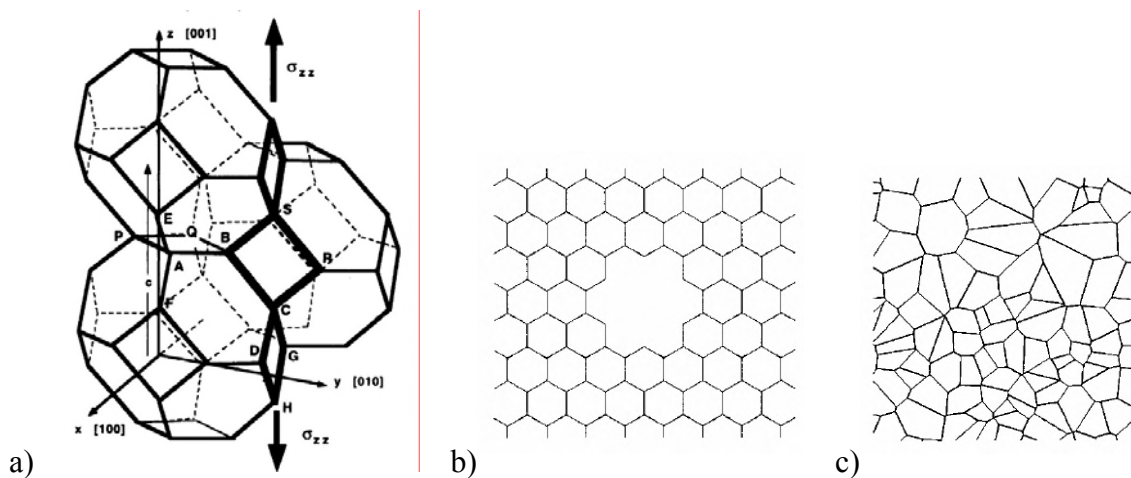
A szerzők vizsgálták továbbá az AE jelalakok és a deformációs mechanizmusok közötti kapcsolatot is alumínium habbal töltött szendvics-szerkezetek segítségével, de nem sikerült a kapott AE jeleknek elemi deformációs mechanizmusokat (kihajlás, repedés keletkezése, képlékeny csuklók kialakulása) megfeleltetniük.

Baumgärtner és társai által kapott eredmények azt jelzik, hogy az AE alkalmas módszer a fémhabban végbemenő deformációs mechanizmusok vizsgálatára, különösen összehasonlító mérésekben, vagy más mérésekkel kiegészítve.

2.5. Fémhabmodellek

Ipari alkalmazásoknál fontos szerepet játszik az egyes anyagi tulajdonságok optimalizálása. Ehhez elengedhetetlen a fémhab tulajdonságait meghatározó paraméterek ismerete. Néhány paraméter (mint például a relatív sűrűség, vagy a habot alkotó szilárd fázis tulajdonságainak) hatása jól ismert, ugyanez azonban nem mondható el a szerkezetet leíró paramétereiről. A fémhabok és más celluláris anyagok szerkezetét ugyanis szinte lehetetlen teljes részletességében leírni. Egy ilyen leírás túl sok adatot tartalmazna, így a kezelése igen nehézkes lenne. Ennél sokkal eredményesebben vizsgálhatjuk a fémhabok egy-egy tulajdonságát, a szerkezeti paraméterek hatását, ha leegyszerűsítjük az eredeti szerkezetet. Ezt alapvetően kétféleképpen tehetjük meg: egyszerűsíthetjük a szerkezet geometriáját és/vagy csökkenthetjük a dimenziószámot.

A legegyszerűbb szerkezetek, amelyek már mutatják a habok deformációs tulajdonságainak néhány jellemzőjét, a periodikus szerkezetek. A periodikus rendszerek egységcellák és megfelelő határfeltételek segítségével írhatók le. Egyszerűbb egységcellák esetén a különböző mechanikai tulajdonságokra analitikus formulákat kaphatunk. A legtöbbet használt egységcella-modell az úgynevezett Gibson-Ashby modell [16], ahol az egységcella kocka (2.5.1 fejezet). Gyakran alkalmazzák még – különösen habok rugalmas deformációjának és platószakaszának vizsgálatakor – a Kelvin-modellt (tetrakaidekaéder egységcella) (25. (a) ábra) [22], [34], [49], [50].



25. ábra. Fémhabok modellezése (a) tetrakaidekaéder egységcella-moddal [50] (b) beagyazásos módszerrel [51] és (c) két-dimenziós Voronoi-szerkesztéssel [24]

Az egységcella-modellek – és ezzel együtt az analitikus modellek – általában csak egyszerű esetekben használhatók; például a gyártás során keletkezett hibák csak akkor tanulmányozhatók, ha a hibák periodikusak. Ezért ezek a modellek nem alkalmazhatók például cellafal hiányának, egy-egy görbült cellaél hatásának vizsgálatára, vagy olyan jelenségek, mint például a denzifikáció és deformációs sáv kialakulásának tanulmányozására sem, hiszen az egységcella-modell a cellák közti kölcsönhatásokat figyelmen kívül hagyja. Ilyen esetekben a vizsgálatra többféle lehetőség kínálkozik: a beagyazásos, a statisztikus modellek, valamint a valódi mikroszerkezetet használó módszerek (2. táblázat).

FÉM HABOK MODELLJEI	
IDEALIZÁLT SZERKEZETI MODELLEK	TOMOGRÁF KÉP ALAPJÁN KÉSZÍTETT MODELLEK
<ul style="list-style-type: none"> • Egységcella modellek • Beágyazásos modellek • Statisztikus modellek: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Voronoi-szerkesztés ▪ Random-módszer ▪ Perturbációs módszer ▪ Delaunay-szerkesztés ▪ stb. 	<ul style="list-style-type: none"> • rúd-elem modell • voxel-elem módszer • tetraéder-elem módszer

2. táblázat. Fémhabmodellek

A beágyazásos módszernél egy szabályos periodikus szerkezet néhány elemét változtatják meg (például néhány cellafalat eltörölnek) (25. (b) ábra) [51]-[53]. A beágyazásos módszert általában kétdimenziós esetekben használják, növelve ezzel a számítás gyorsaságát. A módszer segítségével megvizsgálhatjuk néhány, a gyártás során keletkezett hiba hatását, nem alkalmas ugyanakkor például a különböző méretű és alakú cellák okozta hatások vizsgálatára.

A statisztikai módszerekkel nemcsak a cellák alakjának és nagyságának a hatása, hanem a cellák közti kölcsönhatás és a rendezetlenség következményei is vizsgálhatók. A statisztikus modellek véletlenszerűen elhelyezett pontok (seed) köré geometriai szabályok szerint felépített cellákból állnak. A három legelterjedtebb módszer a Voronoi-szerkesztés, a Delaunay-szerkesztés és a véletlen gömb-modell.

Voronoi-szerkesztés során a véletlenszerűen elhelyezett pontok szakaszfelező merőlegesei illetve szakaszfelező síkjai jelölik ki a cellafalakat két, illetve három dimenzióban (25. (c) ábra). Egy-egy üreghez tehát azok a pontok tartoznak, amelyek az adott (véletlenszerűen elhelyezett) ponthoz az összes pont közül a legközelebb vannak. Azok a kis relatív sűrűségű habok, amelyek például olvadékból történő habosítással keletkeztek, jól modellezhetőek háromdimenziós Voronoi-szerkezetekkel. A szerkesztés ugyanis úgy is értelmezhető, hogy a cellafalak azokon a helyeken alakulnak ki, ahol a kezdetben véletlenszerűen elhelyezkedő apró buborékok – azonos növekedési sebesség esetén – a növekedés során összeérnek [24], [54], [55].

Ennek duálisa a Delaunay-szerkesztés. Egy Voronoi-szerkesztéssel előállított szerkezetből úgy jutunk a duális Delaunay-szerkezethez, hogy a Voronoi-szerkesztéskor használt véletlenszerűen elhelyezett pontok közül azokat kötjük össze éllel, amelyek szomszédos Voronoi-cellákban vannak. Az így keletkezett nyitott cellás habban egy csúcsból átlagosan 14 cellaél indul ki.

Nagyobb relatív sűrűségű celluláris anyagok esetében inkább a véletlen gömbmodell használatos, amelynél adott térrészbe véletlenszerűen helyeznek el gömböket. A gömbök mérete és átfedése változtatható paraméterek.

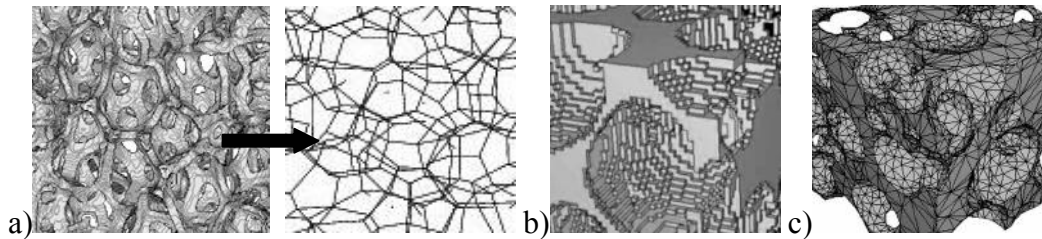
A perturbációs módszerrel kapott szerkezetekkel is modellezhetők a fémhabok. Ennél az eljárásnál olyan szabályosan elhelyezkedő pontokból indulnak ki, amelyből Voronoi-szerkesztéssel szabályos rácsot (általában hatszögrácsot) kapunk. A pontokat ezután véletlenszerűen elmozdítják a pont egy kis t sugarú környezetében. Minél nagyobb a t a kiindulási pontok kezdeti távolságához képest, annál nagyobb a perturbáció. Nagy perturbáció esetén random-módszerrel szerkesztett habokhoz juthatunk [24].

Az ezekkel a statisztikai módszerekkel készített modelleknek több száz cellát kell tartalmaznia ahhoz, hogy a modell makroszkopikus tulajdonságainak a szimulálásakor pontos eredményt kaphassunk [18], [55]. Így, habár mindegyik módszer alkalmazható három dimenzióban is, a számítási igények lecsökkentése érdekében az eddig tárgyalt szerkezetek mechanikai tulajdonságait legtöbbször vagy csak a lineárisan rugalmas tartományban, vagy csak két dimenzióban vizsgálják (például deformációs zóna kialakulásának tanulmányozására [56]).

Az eddig felsorolt módszerekkel a fémhab szerkezetét jellemző egy-egy vonás hatása egyszerűsített szerkezeteken vizsgálható. Tomográfiával készített felvételek segítségével ugyanakkor lehetőség nyílik arra is, hogy a szerkezetet teljes részletességében tanulmányozzuk. A mechanikai tulajdonságok végelem módszerrel történő szimulációjakor az alkalmazott végelem-típus alapján három módszer különböztethető meg.

Nyitott cellás haboknál legtöbbször az úgynevezett rúd-elem módszert alkalmazzák. Ebben az esetben a tomográfiával meghatározott cellaéleket rúd-elemekkel helyettesítik (26. (a) ábra) [57]. A voxel-elem módszernél a végelemek a tomográf kép voxeljei lesznek (26. (b) ábra), míg a tetraéder-elem módszernél a tömör anyag egy tetraéder-hálóját konvertálják végelemekké (26. (c) ábra). A három módszer közül a leggyorsabb a rúd-elem módszer, a feszültségállapotokat viszont a

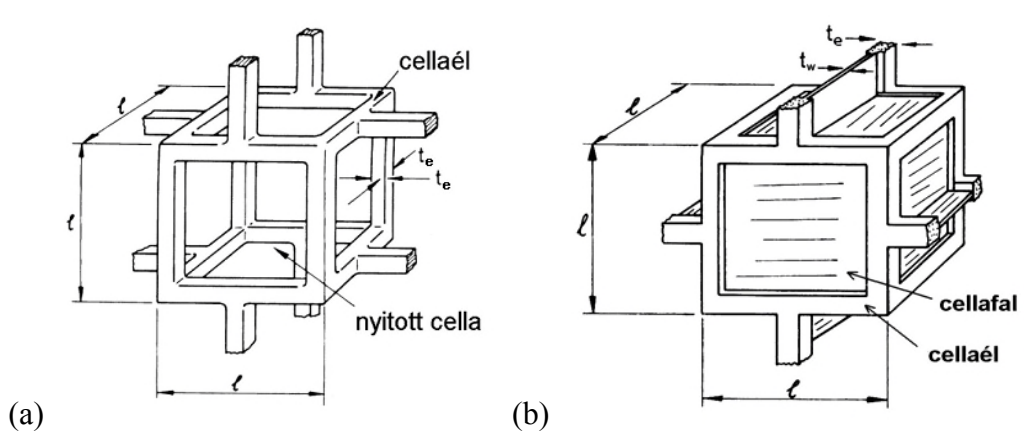
tetraéder-elem módszer adja vissza a legjobban [58], [59]. Néhány évvel ezelőtt a voxel-elem módszer is népszerű volt, mivel ebben az esetben a legkönnyebb a végelem modellt megalkotni [1].



26. ábra. Tomográf kép alapján készített modellek: (a) rúd-elem módszer [57], (b) voxel-elem módszer [60] és (c) tetraéder-elem módszer [59]

2.5.1. A Gibson-Ashby modell

A fémhabok összenyomási deformációját leíró modellek közül a legegyszerűbb és leggyakrabban használt modell a Gibson-Ashby modell [16]. Ebben a modellben kocka alakú cellákat használnak, amelynél a cellaél négyzet keresztmetszetű rudak, míg a cellafalak (zárt cellás hab esetén) vékony lemezek, ezek alkotják az egymáshoz képest eltolt kockák éleit, illetve oldalait (27. ábra). Az egymással szomszédos cellák egymáshoz képest fél cellaél távolságra vannak eltolva, így a szomszédos cellák élei az élek felezőpontjainál illeszkednek.



27. ábra. (a) Nyitott és (b) zárt cellás habok Gibson-Ashby-féle modellje [16]

Az olyan fémhabok, melyek vázát alkotó anyag folyáshatárral rendelkezik, képlékeny tulajdonságokat mutatnak: a hab cellái képlékenyen omlanak össze, ha a rugalmasság határán túl terheljük őket. Képlékenyen deformálódó habok esetén a hosszú feszültségplató ennek a folyamatos cellaösszeomlásnak köszönhető.

A platófeszültség értéke a Gibson-Ashby modellszerkezet alapján dimenzióanalízissel mind nyitott, mind zárt cellás habokra kiszámítható.

Legyen l a cellaél hossza és t_e a cellaél, t_w pedig a cellafal vastagsága. Nyitott cellás hab esetén plasztikus összeomlás akkor következik be, amikor a rúd egy keresztmetszetének minden pontjában az anyagban ébredő feszültség eléri a cellaél anyagának $\sigma_{y,s}$ folyásfeszültségét, azaz amikor a cella éleire ható forgatónyomaték eléri a képlékeny alakításhoz szükséges nyomatékot [61]. A t_e oldalhosszúságú, négyzet keresztmetszetű rúdra (27. (a) ábra) ez a forgatónyomaték

$$M_p = \frac{1}{4} \sigma_{y,s} t_e^3 \quad (2.7)$$

Ha a cellaélre ható F erőnek van az élre merőleges komponense is, akkor a maximális hajlítónyomaték arányos $F \cdot l$ -lel. Mivel a habban ébredő σ_{pl}^* feszültség

$$\sigma_{pl}^* = \frac{F}{l^2}, \quad (2.8)$$

a platófeszültségre a következő összefüggés írható fel:

$$\sigma_{pl}^* \propto \frac{M_p}{l^3}. \quad (2.9)$$

Ebből a σ_{pl}^* -ra a (2.7) egyenlet felhasználásával

$$\sigma_{pl}^* = A \sigma_{y,s} \frac{t_e^3}{l^3} \quad (2.10)$$

kifejezést kapjuk, ahol A az úgynevezett alaki tényező, melynek értéke függ a cellaélek alakjától. Az A paraméter legtöbbször csak kísérleti úton határozható meg.

Zárt cellás haboknál a képlékeny összeroppanás során a cellafalak is deformálódnak: egyrészt a cellafal az összenyomás irányában meggyűrődik, másrészt a terhelés irányára merőlegesen megnyúlik. Ha a cellafalak vékonyak, akkor a hab szilárdságának növekedéséhez jelentősen csak a cellafal megnyújtásához szükséges munka járul hozzá. Ekkor az F erő δ (képlékeny) elmozdulás során végzett munkája a cellaélek képlékeny deformálására és a cellafal megnyújtására fordítódik:

$$F\delta = C_1 \frac{M_p \delta}{l} + C_2 \sigma_{y,s} t_w l \delta, \quad (2.11)$$

ahol C_1 és C_2 konstansok. A nyitott cellás habra végzett számításokhoz hasonlóan a

(2.7) és (2.8) egyenleteket felhasználva a zárt cellás habok platófeszültsége a következő alakra hozható:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{y,s}} = \frac{C_1}{4} \left(\frac{t_e}{l} \right)^3 + C_2 \left(\frac{t_w}{l} \right). \quad (2.12)$$

A nyitott cellás esethez hasonlóan a C_1 és C_2 konstansok értékét itt is kísérleti úton határozzák meg.

Mivel a habra jellemző cellaélhosszúságot valamint cellaél- és cellafalvastagságot nehéz meghatározni, ezért a (2.10) és a (2.12) egyenleteket a relatív sűrűség segítségével szokták kifejezni. Felhasználva a nyitott cellás habok relatív sűrűségére kapott

$$\rho_{rel} = 3 \left(\frac{t_e}{l} \right)^2, \quad (2.13)$$

illetve a zárt cellásakéra adódott

$$\rho_{rel} = 3 \left(\frac{t_e}{l} \right)^2 + 3 \frac{t_w}{l}, \quad (2.14)$$

összefüggéseket, a platófeszültségre kapott eredmények a következők:
nyitott cellás habokra

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{y,s}} = B \rho_{rel}^{3/2}, \quad (2.15)$$

míg zárt cellás habokra

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{y,s}} = C (\Phi \rho_{rel})^{3/2} + C' (1 - \Phi) \rho_{rel}, \quad (2.16)$$

ahol Φ a szilárd anyag cellaélben tárolt térfogati hányada, azaz

$$\Phi = \frac{t_e^2 l}{t_e^2 l + t_w l^2}. \quad (2.17)$$

Bár a (2.15) és a (2.16) egyenletek a rendkívül egyszerű kocka-váz modellre adódtak, a gyakorlatban mégis gyakran használják fémhabok platófeszültségének meghatározásához. Ilyen esetekben a B , C és C' paramétereket kísérletek segítségével határozzák meg.

Az eddigiek alapján látható, hogy csak a nagyon leegyszerűsített szerkezetű modellekre épülő számítások vezetnek analitikus megoldásra, a több szerkezeti paramétert is tartalmazó modellek a legtöbbször csak végeelem módszerrel oldhatók

meg. Ezek szimulációja viszont időigényes, különösen ha nem csak a lineáris rugalmasságtan határain belül vizsgálódunk. Éppen ezért nagyon fontosak az olyan szerkezeti paramétert is tartalmazó modellek, amelyek a képlékeny tartományban is analitikusak.

3. Új modellek a platófeszültség emelkedésének leírására [S1]-[S3]

A 2.5.1 fejezetben láttuk, hogy a Gibson-Ashby modell alapján konstans érték adódik a fémhabok platófeszültségére, hiszen a modellben mind a cellák alakja, mind a cellák nagysága és a cellafalak, cellaélek vastagsága azonos, és a cellák periodikusan helyezkednek el. A valósághoz közelebb álló modellt kaphatunk, ha nem minden cellát tekintünk azonos méretűnek, azaz figyelembe vesszük a cellák méretének eloszlását.

Ebben a fejezetben olyan modellt konstruálunk, melynek segítségével megadható egy adott cellaméret-eloszlású hab platófeszültsége a deformáció függvényében. A platófeszültséget kiszámítottuk kis és nagy relatív sűrűségű, nyitott és zárt cellás habokra is. A különböző relatív sűrűségű és cellaszerkezetű habokra kapott eredményeinket kísérletileg is ellenőriztük.

3.1. Kis relatív sűrűségű, nyitott cellás modell

Az egyszerűség kedvéért vizsgáljunk először egy nyitott cellás habot, amely azonos („kockaváz”) szerkezetű, de különböző méretű cellákból áll, ahol a cellák mérete az $f(l)$ eloszlást követi, azaz a hab egy elegendően nagy (reprezentatív) térfogatában $f(l)dl$ darab cella átmérője esik l és $l+dl$ közé. Tegyük fel, hogy minden cellaél t_e vastagságú, és azonos méretű cellák találhatóak egy deformációs sávban. Mivel a fémhab mindig az éppen leggyengébb cella összeroppanásával deformálódik, ezért feltehetjük azt is, hogy először a legnagyobb, majd az egyre kisebb cellák roppannak össze. Ha az összenyomás során nem változik a minta keresztmetszete – ami kis relatív sűrűségű habok esetén jó közelítés –, akkor a deformációra (ε) és annak a cellának a méretére, amely az adott ε deformációnál éppen összeroppan (l) a következő összefüggés teljesül:

$$\varepsilon(l) = \frac{\int_l^{l_2} l'^3 f(l') dl' - \int_l^{l_2} 3Dt_e^2 l' f(l') dl'}{\int_{l_1}^{l_2} l'^3 f(l') dl'}, \quad (3.1)$$

ahol l_1 illetve l_2 a legkisebb illetve legnagyobb cellák mérete, és D a tömörödés mértékét jellemző faktor. A fenti összefüggésben a már összeroppant hab térfogatát osztjuk el a hab eredeti térfogatával, figyelembe véve, hogy az összetömörödés után porózus anyagi térfogat marad vissza.

A (3.1) képletből tehát ismert cellaméret-eloszlás esetén meghatározható az l , az összeroppantó cella mérete és az ε , az ehhez szükséges deformáció közötti összefüggés.

A legegyszerűbb esetben a cellák méretének eloszlása egyenletes, azaz a cellák mérete folytonosan változik a legkisebb és a legnagyobb cellaméret között, és minden cellaméretből azonos számú van, ekkor az eloszlás az

$$f(l) = \frac{1}{l_2 - l_1} \quad (3.2)$$

kifejezéssel adható meg, ahol $l_2 > l_1$. A fenti eloszlás-függvényt behelyettesítve a (3.1) egyenletbe, a deformáció l negyedfokú függvénye lesz, amelyből analitikusan kifejezhető, hogy adott deformáció esetén mekkora méretű cellák roppannak össze:

$$l(\varepsilon) = \sqrt[3]{3Dt_e^2 + \sqrt{l_2^4 - 6Dl_2^2t_e^2 + 9D^2t_e^4 + (l_1^4 - l_2^4)\varepsilon}}. \quad (3.3)$$

A platófeszültség meghatározásához tételezzük fel, hogy az egyes cellák – csakúgy, mint a Gibson-Ashby modellben – plasztikus csuklók keletkezésével deformálódnak, a feszültséget adott pillanatban (a (2.10) képlet alapján) a

$$\sigma_{pl}^* = A\sigma_{y,s} \left(\frac{t_e}{l} \right)^3 \quad (3.4)$$

kifejezés segítségével számíthatjuk ki, ahol A , l és t_e rendre az éppen összeroppantó cella alaki tényezője, cellaátmérője és cellaél-vastagsága, $\sigma_{y,s}$ pedig a cellaél alkotó anyag folyásfeszültsége. Így a platófeszültség a következő alakot ölti:

$$\sigma_{pl}^* = A\sigma_{y,s} \left(\frac{t_e}{\sqrt[3]{3Dt_e^2 + \sqrt{l_2^4 - 6Dl_2^2t_e^2 + 9D^2t_e^4 + (l_1^4 - l_2^4)\varepsilon}}} \right)^3. \quad (3.5)$$

Az összefüggésből látható, hogy a platófeszültség csupa mérhető vagy kiszámítható paraméter függvénye: a legkisebb és legnagyobb cellaátmérőé, az $A\sigma_{y,s}$ szorzaté és a cellaél vastagságáé. E két utóbbi paraméter meghatározása azonban különösen nehéz, hiszen mindkét esetben effektív értékkel kell számolni. A cellaél vastagságának effektív értéke azonban az alábbi képlet alapján egyszerűen

meghatározható egy mérhető paraméter, a relatív sűrűség segítségével:

$$\rho_{rel} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} 3t_e^2 f(l) dl}{\int_{l_1}^{l_2} l^3 f(l) dl}, \quad (3.6)$$

amelyből a cellaél vastagságára egyenletes cellaméret-eloszlás esetén a következő kifejezést kapjuk:

$$t_e = \sqrt{\frac{(l_1^2 + l_2^2) \rho_{rel}}{6}}. \quad (3.7)$$

A platófeszültségre pedig egyenletes cellaeloszlás esetén az előzőek felhasználásával az alábbi összefüggés adható:

$$\sigma_{pl}^*(\varepsilon) = \frac{A \sigma_{y,s}}{3\sqrt{3}} \frac{1}{\left(D + \frac{1}{\rho_{rel}(1+k^2)} \sqrt{4(1-k^4)\varepsilon + (D\rho_{rel} + k^2(-2 + D\rho_{rel}))^2} \right)^{3/2}}, \quad (3.8)$$

ahol $k = l_2/l_1$.

Látható, hogy a platófeszültség ebben az esetben a k legkisebb és legnagyobb cella átmérőjének hányadosától, a ρ_{rel} relatív sűrűségtől, a $\sigma_{y,s}$ cellaél anyagának folyáshatárától, az A alaki tényezőtől, a D tömörödést jellemző faktortól és természetesen az ε deformációtól függ. Mivel az alaki tényező legtöbbször csak numerikus eljárással számítható, ezért A -t illesztési paraméternek vesszük. A mérhető paramétereken kívül tehát mindössze egyetlen illesztési paraméter van, amit kényelmességi okokból $A\sigma_{y,s}$ -ként kezeltünk. Érdemes megemlíteni, hogy a (3.8)-ból $k = 1$ esetben visszkapjuk a Gibson-Ashby modellt, azaz a platófeszültség konstans, és $\sigma_{pl}^* \propto \sigma_{y,s} \rho_{rel}^{3/2}$.

Az $\varepsilon = 0$ esetén a platófeszültség a következő összefüggéssé egyszerűsödik:

$$\sigma_{pl}^*(\varepsilon = 0) = \frac{A \sigma_{y,s}}{3\sqrt{3}} \frac{1}{\left(\frac{2k^2}{\rho_{rel}(1+k^2)} \right)^{3/2}} = A \sigma_{y,s} \left(\frac{t_e}{l_2} \right)^3. \quad (3.9)$$

(Kihasználtuk, hogy $D\rho_{rel} < 1$ és $k > 1$ miatt $|D\rho_{rel} + k^2(-2 + D\rho_{rel})| = -D\rho_{rel} + k^2(2 - D\rho_{rel})$.) A platófeszültség kezdeti értékét tehát a legnagyobb cella mérete határozza meg a (3.4) egyenlet szerint. Így a (3.9)

összefüggés azt fejezi ki, hogy a deformáció során először a legnagyobb cella roppan össze.

Az általunk konstruált modell helyességét mutatja, hogy mind a $k=1$ határesetben mind az $\varepsilon=0$ esetben visszakapjuk Gibson és Ashby által számolt platófeszültség-értékeket.

3.1.1. Kis relatív sűrűségű habok energiaelnyelő-képessége

Sok alkalmazásnál játszik szerepet a habok energiaelnyelő-képessége. Ezt a paramétert az egységnyi térfogatú hab ε deformációjához szükséges energiával ($W_{\text{térf}}(\varepsilon)$) jellemezhetjük, ezért a $W_{\text{térf}}(\varepsilon)$ lényegében a feszültség-deformáció görbe alatti területtel egyenlő:

$$W_{\text{térf}}(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon') d\varepsilon' . \quad (3.10)$$

A térfogati energiaelnyelő-képesség egyenletes cellaméret-eloszlás esetén analitikusan megadható a (3.8) képlet segítségével az alábbi formában:

$$W_{\text{térf}}(\varepsilon) = \frac{A\sigma_{y,s}(\rho_{\text{rel}}(1+k^2))^{3/2}}{3\sqrt{3}(1-k^4)} \left(\frac{2D\rho_{\text{rel}}(1+k^2) + \zeta(\varepsilon)}{\sqrt{D\rho_{\text{rel}}(1+k^2) + \zeta(\varepsilon)}} - \frac{D\rho_{\text{rel}}(1+k^2) + 2k^2}{\sqrt{2k}} \right), \quad (3.11)$$

ahol

$$\zeta(\varepsilon) = \sqrt{4(1-k^4)\varepsilon + (D\rho_{\text{rel}} + k^2(-2 + D\rho_{\text{rel}}))^2}$$

kifejezéssel egyenlő.

Az energiaelnyelő-képesség is – a (3.8) képletéhez hasonlóan – csak egy illesztési paramétert tartalmaz, és a $k=1$ határesetben visszaadja a Gibson-Ashby modellből származtatható térfogati energiaelnyelő-képességet:

$$k \rightarrow 1 \text{ esetén ugyanis } W_{\text{térf}}(\varepsilon) \rightarrow \frac{A\sigma_{y,s}}{3\sqrt{3}} \rho_{\text{rel}}^{3/2} \varepsilon ,$$

azaz a térfogati energiaelnyelő-képesség a deformáció lineáris függvénye.

3.2. Kis relatív sűrűségű, zárt cellás modell

Az ipari alkalmazásokban, mint már említettük, leggyakrabban zárt cellás fémhabokat használnak, mivel előállítási költségük a legalacsonyabb [4]. A zárt cellás haboknál mind a sűrűség számításánál, mind az éppen összeroppanó cella nagyságának

meghatározásánál a cellaélek mellett a cellafalak hatását is figyelembe kell venni. Emiatt az előző alfejezetben használt egyenletek a következő alakot öltik:

$$\varepsilon(l) = \frac{\int_{l_1}^{l_2} l'^3 f(l') dl' - \int_{l_1}^{l_2} 3(t_e^2 l' + t_w (l')^2) f(l') dl'}{\int_{l_1}^{l_2} l'^3 f(l') dl'}, \quad (3.12)$$

ahol l az éppen összeroppanó cellák mérete ε deformációnál, t_e és t_w pedig a cellaél illetve a cellafal vastagsága. Ha ebben az esetben is egyenletes cellaméret-eloszlást feltételezünk, akkor ε az l negyedfokú függvénye, ezért l a deformáció függvényeként ismét analitikusan fejezhető ki.

A platófeszültséget zárt cellás esetben nemcsak a cellaélek, hanem a cellafalak képlékeny deformációja is befolyásolja (2.5.1. fejezet):

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{y,s}} = B_1 \left(\frac{t_e}{l} \right)^3 + B_2 \left(\frac{t_w}{l} \right), \quad (3.13)$$

ahol B_1 és B_2 konstansok.

A nyitott cellás modellhez hasonlóan az effektív cellafal-vastagság is kifejezhető a cellaél-vastagság és a relatív sűrűség segítségével az alábbi összefüggésből:

$$\rho_{rel} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} 3(t_e^2 l + t_w l^2) f(l) dl}{\int_{l_1}^{l_2} l^3 f(l) dl}. \quad (3.14)$$

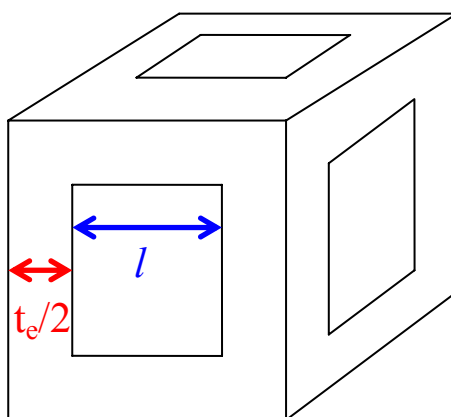
Bár a (3.12), a (3.13) és a (3.14) egyenletekből a platófeszültség a deformáció függvényében egyenletes eloszlás esetén analitikusan meghatározható, a platófeszültség – és ennek következtében a térfogati energiaelnyelési kapacitás – zárt cellás esetben a nyitott cellás esetnél sokkal bonyolultabb.

A nyitott cellás modellhez hasonlóan a platófeszültség ebben az esetben is a D , ρ_{rel} , $\sigma_{y,s}$, t_e/l_1 (mérhető) paramétereken kívül csak a legnagyobb és a legkisebb cella méretének hányadosától függ és két illesztési paramétert (B_1 és B_2) tartalmaz.

3.3. Nagy relatív sűrűségű, nyitott cellás modell

Ütközésienergia-elnyelési rendszerekben gyakran előnyös nagy relatív sűrűségű (30%-60%) fémhabokat alkalmazni, mivel ezeknek mind a térfogatra, mind a tömegre vonatkoztatott energiaelnyelése az optimális érték közelében van [27]. Nagy relatív sűrűségű habokat legolcsóbban a sóra öntéses technikával állíthatunk elő, mely módszer nyitott cellás habot eredményez.

A nyitott cellás, nagy relatív sűrűségű habok platófeszültségének meghatározásához a 3.1 fejezetben alkalmazott összefüggéseket módosítjuk annak figyelembevételével, hogy nagy relatív sűrűség esetén a cellák mérete jóval nagyobb, mint a pórusok (üregek) mérete (28. ábra), a cellák méretét ugyanis a pórusméreten kívül a cellaél vastagsága is befolyásolja. Ennek megfelelően, ha l a pórus mérete, akkor a cella átmérője t_e vastagságú cellaél esetén $l + t_e$.



28. ábra. Nagy relatív sűrűségű, nyitott cellás hab modellje

Nagy relatív sűrűségű haboknál tehát az effektív cellaél-vastagság az alábbi összefüggésből számítható:

$$\rho_{rel} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} (3t_e^2 l + t_e^3) f(l) dl}{\int_{l_1}^{l_2} (t_e + l)^3 f(l) dl}, \quad (3.15)$$

míg a deformáció és az éppen összeroppanó cella mérete közti összefüggés a következőképpen alakul:

$$\varepsilon(l) = \frac{\int_l^{l_2} (l' + t_e)^3 f(l') dl' - \int_l^{l_2} D(3t_e^2 l' + t_e^3) f(l') dl'}{\int_{l_1}^{l_2} (l' + t_e)^3 f(l') dl'}. \quad (3.16)$$

A platófeszültség nagy relatív sűrűségű nyitott cellás habok esetén is a 2.5.1 fejezetben leírtakhoz hasonlóan származtatható, azzal a már említett különbséggel, hogy most a cella teljes mérete $l + t_e$, ezért a habban ébredő feszültség is $F / (l + t_e)^2$ -tel arányos. A platófeszültség tehát nagy relatív sűrűségű nyitott cellás habok esetén

$$\sigma_{pl}^* = A \sigma_{y,s} \frac{t_e^3}{l(l + t_e)^2} = A \sigma_{y,s} \frac{\left(\frac{t_e}{l}\right)^3}{\left(1 + \frac{t_e}{l}\right)^2} \quad (3.17)$$

alakban írható.

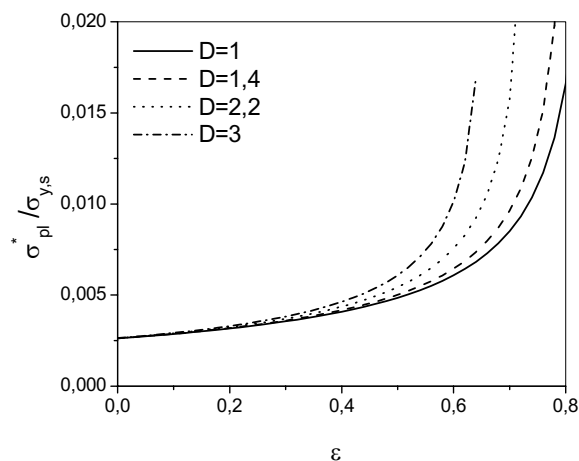
Egyenletes cellaeloszlást feltételezve a fenti képletek is a $\sigma - \varepsilon$ függvénykapcsolat analitikus megoldására vezetnek, amely illesztési paraméterként – a kis relatív sűrűségű modellhez hasonlóan – csak az A alaki tényezőt tartalmazza.

3.4. A nyitott cellás fémhab platófeszültségét befolyásoló paraméterek

Vizsgáljuk meg először a deformációs folyamatot jellemző D paraméter, a fémhab szerkezetét jellemző k paraméter, valamint a ρ_{rel} relatív sűrűség hatását a nyitott cellás, kis relatív sűrűségű, egyenletes cellaméret-eloszlású modellből számított $\sigma_{pl}^* / \sigma_{y,s}$ normált platófeszültségre, ha az $A = 1$ feltételezéssel élünk.

A (3.1) egyenletből látszik, hogy a legkisebb cella összeroppanásakor a deformációt a D paraméter és a ρ_{rel} relatív sűrűség határozza meg, hiszen $l = l_1$ helyettesítéssel az $\varepsilon(l_1) = \varepsilon_D = 1 - D\rho_{rel}$ összefüggéshez jutunk. Tehát a tömörödés mértékét jellemző D paraméter a platószakasz végét befolyásolja: minél nagyobb D , annál rövidebb a platószakasz, és emiatt egyre kisebb deformációknál kezdődik a tömörödési szakasz (29. ábra). Az is megfigyelhető, hogy a D paraméter nem befolyásolja a normált platófeszültség kezdeti értékét, hiszen a (3.9) egyenlet alapján a

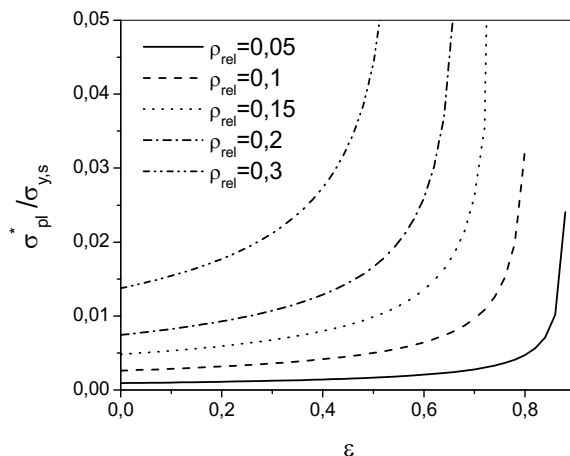
platófeszültség kezdeti értéke csak a legnagyobb és legkisebb cellaátmérők k arányától és a ρ_{rel} relatív sűrűségtől függ. A D paraméter azonban befolyásolja a $\sigma_{pl}^*(\varepsilon)/\sigma_{y,s}$ függvény meredekségét: a (3.8) kifejezésből látható, hogy D növekedtével nő a normált platófeszültség-görbe meredeksége.



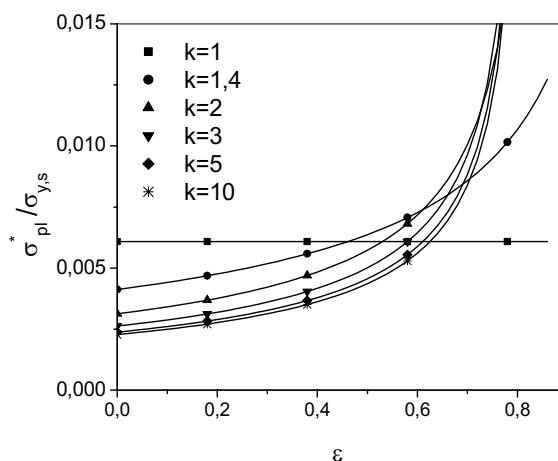
29. ábra. A D paraméter hatása a feszültség-deformáció görbére $k=5$ és $\rho_{rel}=0,1$ mellett, nyitott cellás, kis relatív sűrűségű, egyenletes cellaeloszlású szerkezetet feltételezve

A (3.7) egyenletből az is kiolvasható, hogy a relatív sűrűség növekedtével nő az effektív cellaél-vastagság, így a (3.9) egyenletnek megfelelően nő a platófeszültség kezdeti értéke és meredeksége is (30. ábra). Az $\varepsilon_D = 1 - D\rho_{rel}$ következtében a platószakasz a relatív sűrűség növekedtével is rövidül.

A feszültség-deformáció görbe alakját a cellaméret eloszlásának szélessége is befolyásolja. A k , a legnagyobb és legkisebb cellaátmérők hányadosának növekedtével nő a normált platófeszültség meredeksége, de csökken a platófeszültség kezdeti értéke (31. ábra), hiszen minél szélesebb a cellaméret-eloszlás, annál hangsúlyosabb a nagy és a kis cellák összeroppanásakor számított feszültségek közötti különbség ((3.4) egyenlet). Látható, hogy $k > 5$ esetén a kapott görbék már lényegében megegyeznek. A $k = 1$ esetben - amikor a habban csak egyetlen cellaméret van jelen - a feszültség konstans. Ez éppen a Gibson-Ashby modellnek felel meg.



30. ábra. A relatív sűrűség hatása a feszültség-deformáció görbére $k=5$ és $D=1,4$ mellett, nyitott cellás, kis relatív sűrűségű, egyenletes cellaeloszlású szerkezetet feltételezve



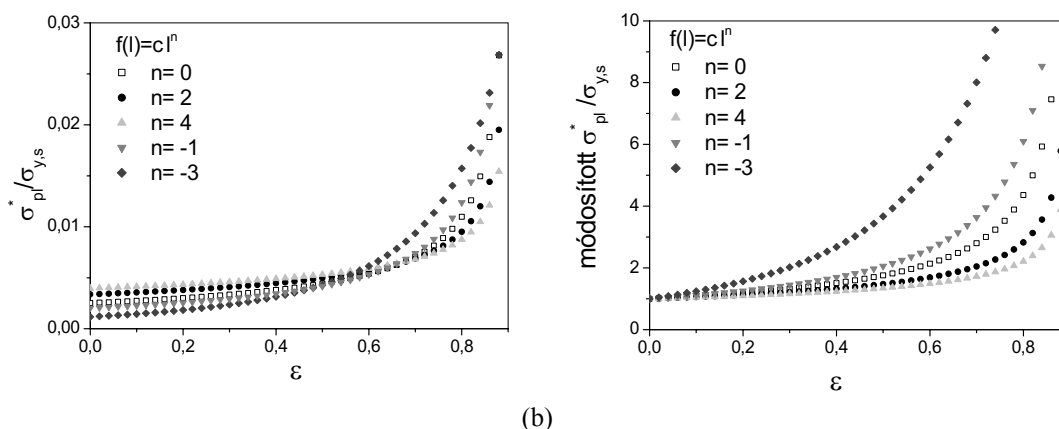
31. ábra. A k paraméter hatása a feszültség-deformáció görbére $\rho_{rel}=0,1$ és $D=1,4$ mellett, nyitott cellás, kis relatív sűrűségű, egyenletes cellaeloszlású szerkezetet feltételezve

3.4.1. Cellaméret-eloszlás hatása a normált platófeszültségre

Megvizsgáltuk a cellaméret-eloszlás hatását is a kis relatív sűrűségű nyitott cellás modellből számolt normált platófeszültségre. Az egyszerűség kedvéért csak olyan eloszlásokat vizsgáltunk, amelyekből az éppen összeroppanó cella mérete a (3.1) összefüggésből analitikusan kifejezhető a deformáció függvényeként. Azt találtuk, hogy a cellaméret-eloszlásra az $f(l) = cl^n$ függvényalakot feltételezve az $n = -3, -1, 0, 2$ és 4 esetén kapunk analitikus megoldást. Az $n = 0$ eset éppen az egyenletes cellaeloszlásnak

felel meg, míg az $n = -3$ egyenletes térfogateloszlást jelent, azaz minden l cellaméretre az l élhosszúságú cellák térfogata egyenlő. Az $n = -3, -1, 2$ és 4 esetekben a számított platófeszültség az egyenletes cellaeloszláshoz hasonlóan az A , D , ρ_{rel} és k paraméterek függvénye, azaz a platófeszültségre kapott analitikus megoldások nem függenek a legnagyobb és a legkisebb cellák átmérőjétől, csak ezek hányadosától.

A 32. ábra a különböző eloszlásokra kapott normált platófeszültséget mutatja $k = 5$ és $\rho_{rel} = 0,1$ esetén. Az áttekinthetőség kedvéért ábrázoltuk a különböző eloszlásokból számított egyre normált platófeszültséget, az úgynevezett módosított platófeszültséget is a deformáció függvényében (32. (b) ábra). A számított görbék csökkenő n esetén egyre kisebb kezdeti értékről indulnak és meredekebben emelkednek; $n = 4$ esetén a platófeszültség majdnem a teljes tartományon konstans, míg $n = -3$ esetén nő a platófeszültség a deformációval a legmeredekebben. A 32. ábrán mindazonáltal az is látható, hogy a cellaeloszlás kis mértékű változása lényegében nem változtatja meg a platófeszültség jellegét.



32. ábra. A cellaméret-eloszlás hatása a $\sigma_{y,s}$ -sel normált platófeszültségre. (a) $n = -3, -1, 0, 2$ és 4 –re a $c \cdot l^n$ alakú eloszlásokból számított normált platófeszültség $A=1$ feltételezéssel, (b) ugyanezen eloszlásokból számított egyre normált (módosított) platófeszültség

3.5. Kísérleti körülmények

A platófeszültség emelkedését leíró modelljeink helyességét kísérleti úton vizsgáltuk. A 3.1, 3.2 alfejezetekben ismertetett kis relatív sűrűségű modellek igazolásához három különböző sűrűségű Alporas habot, míg a 3.3 alfejezetben leírt nagy relatív sűrűségű modellhez egy Al-1%Mg-0.5%Si ötvözetből készült

alumíniumhabot használtunk (3. táblázat). Az Alporas habokat alumínium olvadék habosításával (2.2.1.2 alfejezet), a nagy relatív sűrűségű habot sóra öntéssel technikával (2.2.1.3 alfejezet) állították elő.

Minta neve	Ap06	Ap09	Ap17	AlMgSi
	Alporas	Alporas	Alporas	Sóra öntött
Cellaszerkezet	Zárt	Zárt	Zárt	Nyitott
Relatív sűrűség	6%	9%	17%	38%
Legkisebb cellaméret, l_1	0,28 mm	0,36 mm	0,72 mm	0,14 mm
Legnagyobb cellaméret, l_2	4,12 mm	3,83 mm	3,08 mm	0,78 mm
$k = l_2/l_1$	14,7	10,6	4,3	5,6

3. táblázat. Vizsgált fémhabok szerkezeti adatai

A modellekben szereplő szerkezeti paramétereket (3. táblázat), a legkisebb és legnagyobb cellaméretet, illetve cellaméret-eloszlást röntgentomográfia segítségével határoztuk meg. A röntgentomográfiánál a 21. ábrán látható kúp nyálábterű elrendezést alkalmaztuk. A röntgensöveget 60 kV feszültségen 0,1 mA áram mellett használtuk. Alporas minták esetén $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$, míg a sóra öntött minta esetén $12 \times 12 \times 24 \text{ mm}^3$ térfogatról készítettünk háromdimenziós felvételt. A képek felbontása mindegyik esetben $50 \mu\text{m}$ volt. A zárt cellás Alporas habok szerkezeti paramétereit a tomográf képekből az *Aphelion* szoftver segítségével nyertük, a nyitott cellás, sóra öntött hab pórusméret-eloszlását pedig granulometriával határoztuk meg. A fémhabok relatív sűrűségét minden egyes mintára külön-külön számítottuk ki a minta tömegének és térfogatának mérésével.

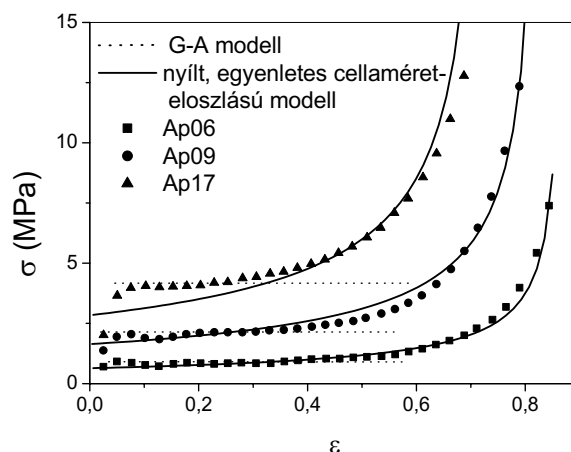
A fémhabok feszültség-deformáció görbéit MTS anyagvizsgáló géppel vettük fel, az összenyomást állandó, $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ deformációs sebesség mellett végeztük. A próbatestek az Alporas habokból $30 \times 30 \times 25 \text{ mm}^3$, a sóra öntött habokból $12 \times 12 \times 24 \text{ mm}^3$ méretű téglatestek voltak. A próbatestek mérete mindkét típusú hab

esetében meghaladta az átlagos cellaméret hétszeresét. A $\sigma - \varepsilon$ görbéken a mérnöki feszültséget és deformációt tüntettük fel.

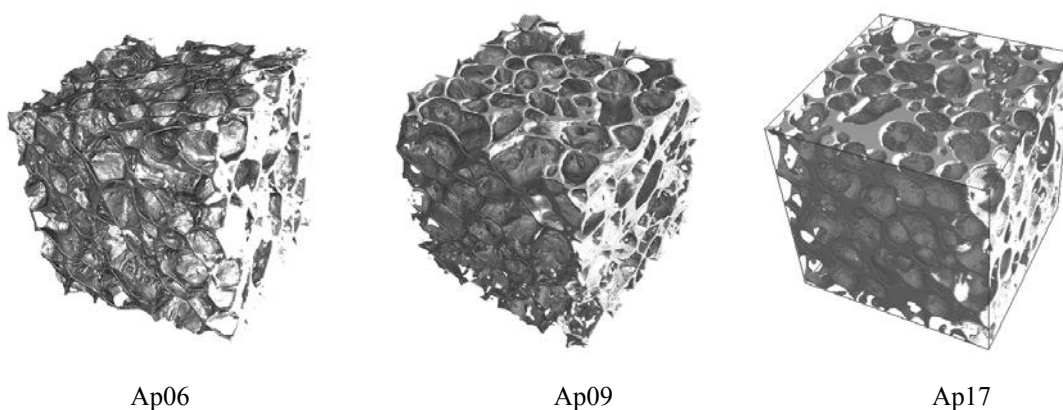
A mért feszültség-deformáció görbékre a modellünkből számított $\sigma - \varepsilon$ görbéket a legkisebb négyzetek módszerével illesztettük.

3.6. Kis relatív sűrűségű fémhabok modelljének összevetése a mért deformációs görbékkel

Ahhoz, hogy a kis relatív sűrűségű fémhabok 3.1 és 3.2 alfejezetekben ismertetett modellje által jósolt feszültség-deformációs görbéket a mért deformációs görbékkel összevethessük, csak a k paramétert, a legnagyobb és a legkisebb cellaátmérők hányadosát kell meghatároznunk, ha egyenletes cellaméret-eloszlást feltételezünk ((3.8) egyenlet). A k paraméter egyszerűen meghatározható akár kétdimenziós csiszolatokból is. A 33. ábra a mért és a (3.8) egyenlet alapján az $\varepsilon = 0,05 - 0,7$ tartományra illesztett feszültség-deformáció görbéket mutatja. A számításokhoz a 3. táblázat adatait használtuk. Az ábrán feltüntettük összehasonlításképpen a Gibson-Ashby modell alapján várt (konstans) platófeszültségeket is. A görbékkel látható, hogy az illesztés a legkisebb sűrűségű fémhab esetén a legjobb. Ennek egyik oka valószínűleg az, hogy az Ap06-os mintára teljesül leginkább az egyenletes cellaeloszlás feltételezése. A jó illeszkedés másik oka az előállítási technológia lehet. Olvadékból előállított habok szerkezetét ugyanis, ha elegendően sok idő áll rendelkezésre a megszilárdulásig a folyadékhabban lejátszódó (vékonyodási) mechanizmusok szabják meg. A vékony cellafalak kialakulásáért a gravitáció mellett a cellafal-találkozás helyein, a cellaélekben lejátszódó úgynevezett csatornaszívás is felelős. A csatornaszívás az olvadt fémet, folyadékot a buborékokat határoló hártálykból, a későbbi a cellafalakból a negatív görbületű Plateau-határba, a leendő cellaélekbe szívja. A csatornaszívás következtében a cellafalak a cellaélekhez képest lényegesen vékonyabbak, így az olvadékból előállított kis relatív sűrűségű habok platófeszültségének számításakor a cellafalak szerepe lényegében elhanyagolható. Jól illusztrálják ezt a tényt a háromdimenziós tomográf felvételekből rekonstruált képek is (34. ábra).



33. ábra. Feszültség-deformáció görbe a különböző sűrűségű Alporas habokra. A folytonos görbék a (3.8) egyenlet alapján illesztett feszültség-deformáció görbék, míg a szaggatott vonalak a Gibson-Ashby modell által jósolt értékeket mutatják. Az illesztéshez $D=1,4$ -et és a 3. táblázatban feltüntetett adatokat használtuk.

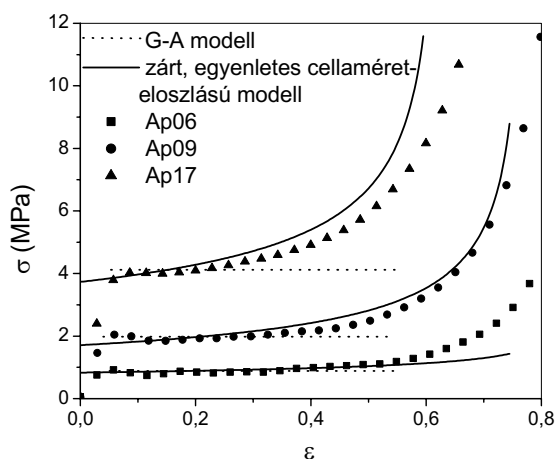


34. ábra. A három különböző relatív sűrűségű Alporas hab háromdimenziós röntgentomográfiából nyert képe. A minták 25 mm élhosszúságú kockák.

Bár a nyitott cellás, egyenletes cellaméret-eloszlású modell főleg a platószakasz végét írja le jól, a platófeszültség emelkedését még a legjobban illeszkedő Ap06-os minta esetén is túlbecsüli. Az egyszerűsítő közelítések ellenére (a valódi habot nyitott cellás egyenletes cellaméret-eloszlású szerkezettel közelítettük) már ezek az illesztések is mutatnak néhány jellegzetességet: például a platófeszültség a platószakasz vége felé nagyobb meredekségű, mint az elején.

Ahhoz, hogy a kis relatív sűrűségű, nyitott cellás modellünk (3.1 alfejezet) a mérési eredményekhez jobban illeszkedjen, *két mód* is kínálkozik. Figyelembe vehetjük a *cellafalak hatását*, illetve használhatunk a valósághoz közelebb álló *cellaméret-eloszlást*. Vizsgáljuk meg először a **cellafalak szerepét**.

A 35. ábra az illesztett platófeszültséget mutatja zárt cellás habra, egyenletes cellaméret-eloszlás esetén. Látható, hogy a zárt cellás modell általában jobb közelítést ad a mért alakítási keményedésre, mint a nyitott cellás modell. Az egyetlen kivétel talán az Ap06-os minta, ahol a platószakasz végén várt feszültségemelkedést a nyitott cellás modellel ellentétben a zárt cellás modell nem jelzi. A platószakasz elejét viszont a zárt cellás modell írja le jobban.

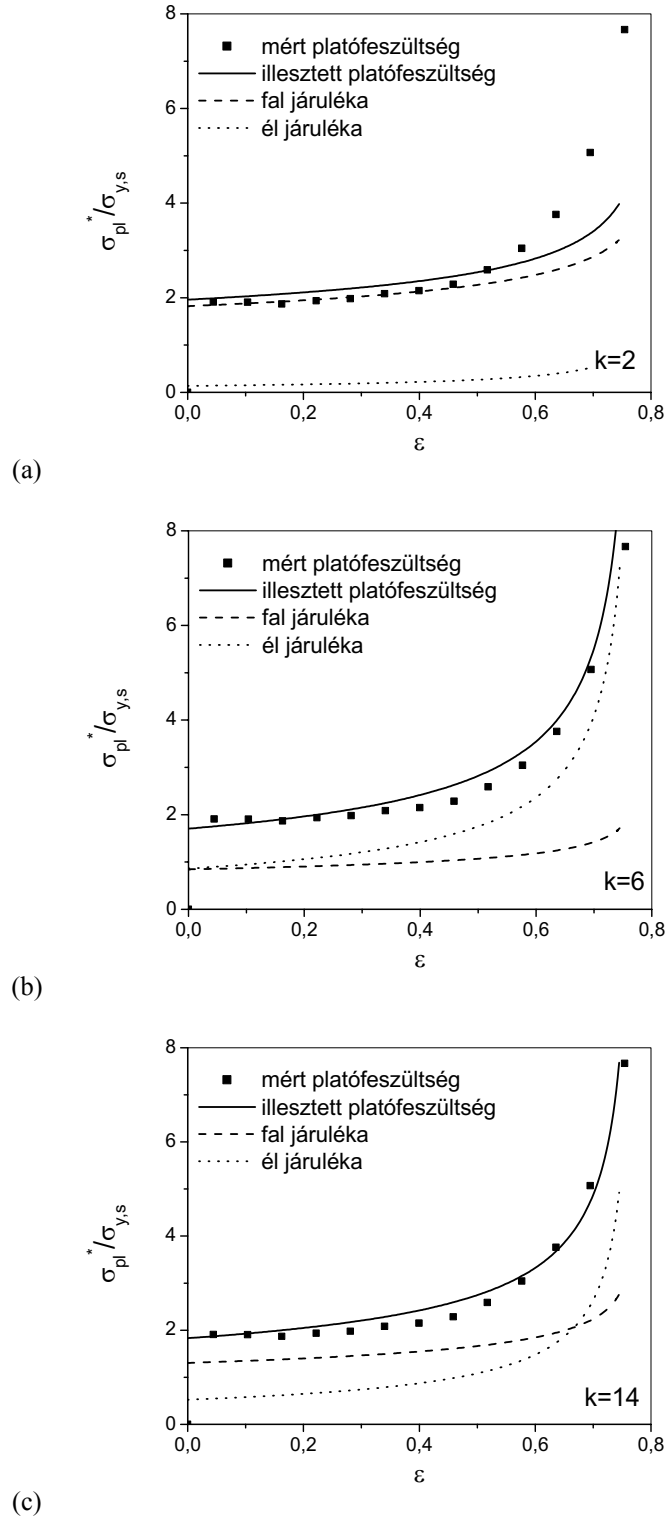


35. ábra. Feszültség-deformáció görbe a különböző sűrűségű Alporas habokra. A folytonos görbék a zárt, egyenletes cellaméret-eloszlású modell által jóslott feszültség-deformáció görbéket mutatják, míg a szaggatott vonalak a Gibson-Ashby modellnek felelnek meg. Az illesztéshez $D=1,4$ -et és a 3. táblázatban feltüntetett adatokat használtuk.

Zárt cellás modellnél három illesztési paraméter van, ha nem ismerjük az átlagos cellaél-, vagy cellafal-vastagságot: B_1 , B_2 , és t_e vagy t_w . A három paraméteres illesztések azt mutatták, hogy bár az egyes illesztett paraméterek értékei függenek a numerikus illesztésnél megadott kiindulási értékektől, a feszültség-deformáció görbe lényegében tetszőleges kiindulási érték esetén ugyanaz marad. Ezért a cellaél vastagságát lerögzítettük az Ap06-os, Ap08-as és Ap17-es mintáknál rendre 0,1 mm-re, 0,2 mm-re és 0,3 mm-re, és csak B_1 -et és B_2 -t, a cellaél és a cellafal hatását jellemző paramétereket illesztettük.

Az Ap08-as minta esetén azt is megvizsgáltuk, hogy különböző k értékek esetén mekkora a fal és az él járuléka a platófeszültséghez. A 36. ábra három jellemző k esetén mutatja az egyes járulékokat. Kis k esetén a platófeszültséget főleg a falak deformációja határozza meg. Növekvő k esetén nő a cellaél szerepe, de nagy k -ra már ismét a cellafal adja a nagyobb járulékot. Az illesztésekből kitűnik, hogy a (3.13)

egyenletben a platófeszültség kifejezésében az első tag inkább a platószakasz végének illesztésében játszik szerepet, míg a képlet második tagja közel konstans feszültségjárulékot ad (36. ábra).

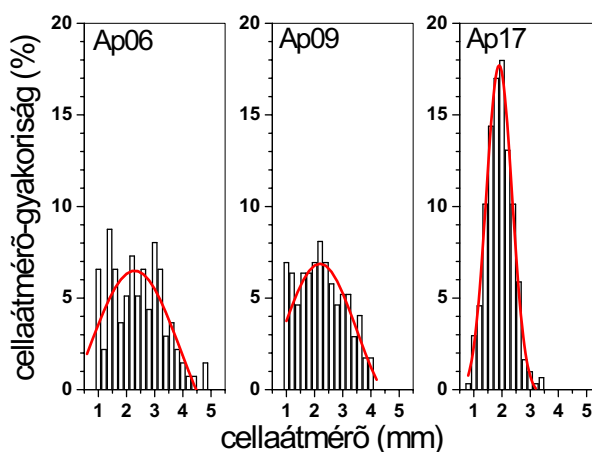


36. ábra. A cellael és a cellafal járuléka a platófeszültséghez különböző k értékek esetén, zárt cellás, egyenletes cellaeloszlású modellt alkalmazva. Az illesztett platófeszültséget folytonos görbével jelöltük, a falak és az élek járulékat szaggatott vonallal.

Az eddig elemzett esetekben egyenletes cellaméret-eloszlást feltételeztünk. Ennek következtében a modellt leíró egyenletek annyira leegyszerűsödtek, hogy a platófeszültség a deformáció analitikus függvényeként állt elő. Zárt cellás haboknál azonban, ha a cellaeloszlás az egyenletesnél bonyolultabb, a (3.12)–(3.14) egyenletek már csak numerikusan oldhatók meg, a platófeszültség és a deformáció közötti összefüggés nem analitikus. Az alábbiakban a **mért cellaméret-eloszlás** szerepét vizsgáljuk a platófeszültség alakításában.

Az egyes mintákra jellemző cellaméret-eloszlást röntgentomográfia segítségével határoztuk meg (37. ábra). A 37. ábrán látható, hogy az Alporas habok cellaméret-eloszlása közelebb áll a Gauss-eloszláshoz, mint az egyenletes eloszláshoz, amely különösen a nagyobb sűrűségű minták esetén valósul meg.

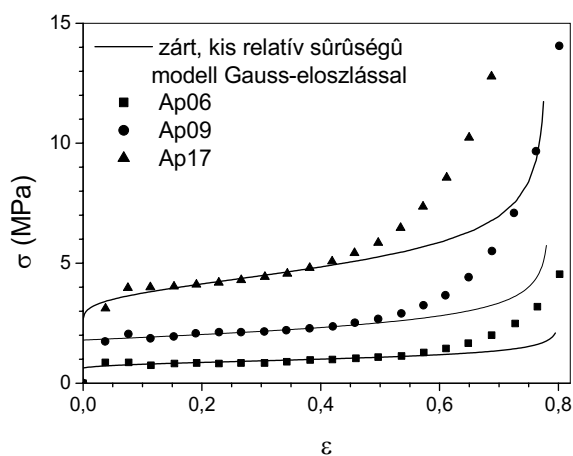
Ha a (3.12) és (3.14) egyenletekbe $f(l)$ helyébe az illesztett Gauss-függvényeket helyettesítjük, akkor mind a platófeszültség, mind a térfogati energiaelnyelő-képesség numerikusan kiszámítható. Az egyenletes cellaméret-eloszláshoz hasonlóan itt is három illesztési paramétert kapunk. A zárt cellás, egyenletes cellaméret-eloszláshoz hasonlóan, jelen esetben is az egyik paramétert, a cellaél vastagságát lerögzítettük és csak két paramétert, B_1 -et és B_2 -t illesztettük.



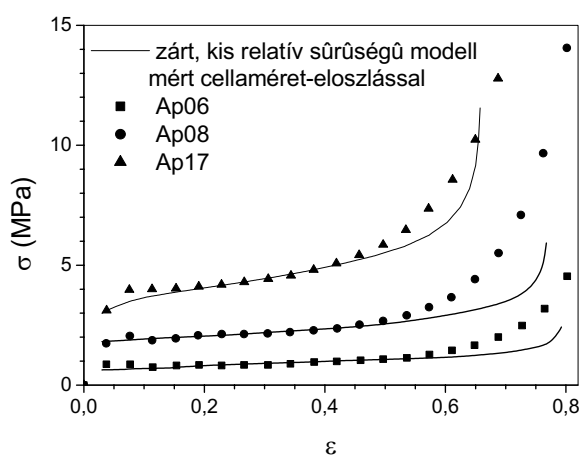
37. ábra. Alporas habok röntgentomográfiával mért cellaméret-eloszlása és az ezekre illesztett Gauss-görbék (folytonos vonal).

A 38. (a) ábra az illesztett deformációs görbéket mutatja. Összehasonlításként a 38. (b) ábrán a mért cellaméret-eloszlás felhasználásával illesztett platófeszültséget is feltüntettük. Ebben az esetben $f(l)$ -eket a mért eloszlásgörbék lineáris interpolációjával kapott folytonos görbékkel helyettesítettük. Látható, hogy mindkét esetben a

$0,1 \leq \varepsilon \leq 0,5$ tartományban, azaz a platószakasz elején, az illesztett platófeszültség jól írja le a mért görbéket. Ebben a tartományban az illesztett feszültségértékek lényegében megegyeznek a mért feszültségértékekkel. A mért $\sigma - \varepsilon$ görbektől a kis relatív sűrűségű zárt cellás modell által jósolt $\sigma - \varepsilon$ görbék csak a platószakasz vége felé térnek el. A platószakasznak ezt a részét a mért cellaméret-eloszlással számított deformációs görbék jobban írják le, mintha a cellaméret-eloszlást Gauss-eloszlással közelítjük, mivel a platófeszültség kisebb deformációknál kezd el meredeken emelkedni, jobban követve ezáltal a mért feszültségértékeket. Az eltérés oka az lehet, hogy a Gauss cellaméret-eloszlás esetén kis méretű cellákból a valóságban a mértnél kevesebb van.



(a)



(b)

38. ábra. Feszültség-deformáció görbe a különböző sűrűségű Alporas habokra. A folytonos görbék (a) a zárt cellás, Gauss cellaméret-eloszlású és (b) a zárt cellás, mért cellaméret-eloszlású modell által számított feszültség-deformáció görbéket mutatják.

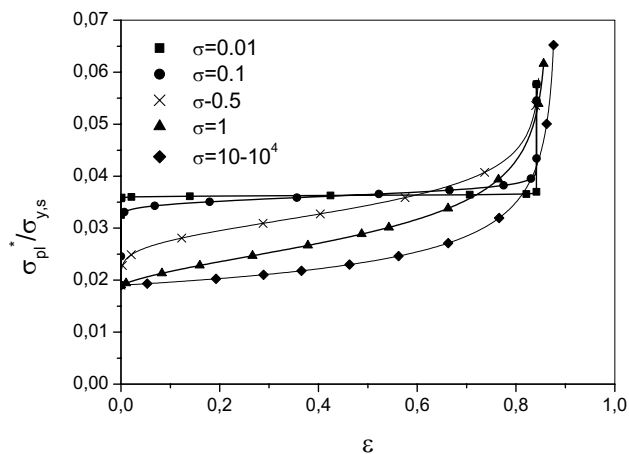
A különböző illesztéseket összevetve megállapítható, hogy a feszültség-deformáció görbéket legjobban a mért cellaméret-eloszlást figyelembe vevő zárt cellás modell írja le. A zárt cellás, Gauss-eloszlású modell ugyanakkor jól illeszkedik körülbelül 50 %-os deformációig a plató szakasz elejéhez.

3.6.1. A zárt cellás fémhab platófeszültségét befolyásoló paraméterek

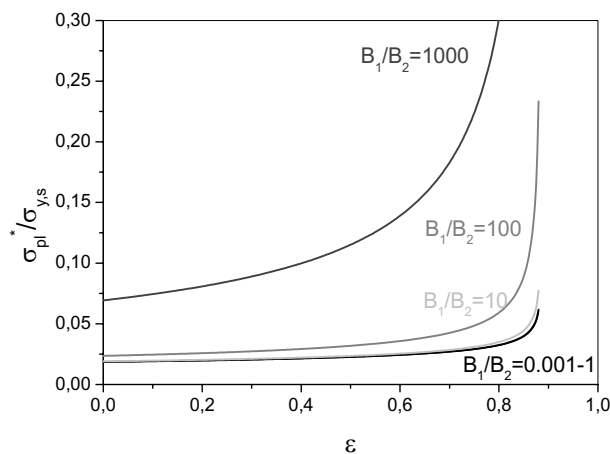
Míg a mért cellaméret-eloszlással nehéz vizsgálni különböző paraméterek hatását a modell által jósolt platófeszültségre, addig Gauss-eloszlást feltételező cellaméret-eloszlás esetén a platófeszültséget befolyásoló B_1 és B_2 illesztési paraméterek, valamint a cellaméret-eloszlás szerepe egyszerűen vizsgálható. Nézzük meg ezek hatását.

Tekintsünk olyan különböző Gauss-eloszlást követő cellaméret-eloszlásokat, amelyeknél a szórás (σ) változik, de a várható érték ($m = 2,6$ mm) és a legkisebb és legnagyobb cellák mérete ($l_1 = 0,6$ mm, $l_2 = 5,4$ mm) rögzített (39. (a) ábra). Ekkor a $\sigma \rightarrow 0$ határesetben a cellaméret-eloszlásra visszakapjuk a Gibson-Ashby elrendeződést, amikor a habban csak egyetlen cellaméret van jelen. A $\sigma \rightarrow \infty$ esetén pedig az egyenletes cellaméret-eloszláshoz jutunk. A 39. (a) ábrán jól látható, hogy $\sigma \rightarrow 0$ esetén a számított platófeszültség a Gibson-Ashby-féle hab platófeszültségéhez, a konstans platófeszültséghez közelít, míg $\sigma \rightarrow \infty$ esetén a plató szakasz elején a platófeszültség meredeksége csökken. $\sigma \geq 10$ esetén a feszültség-deformáció görbék teljesen fedik egymást.

A 39. (b) ábra a cellaélek szerepét mutatja a platófeszültség alakulásában a cellafalakhoz képest (a B_1 értékét változtatjuk konstans B_2 érték mellett). Megállapítható, hogy $B_1/B_2 \leq 1$ esetén, azaz zárt cellás haboknál a platófeszültség független a hányados értékétől, és a plató szakasz elején a feszültség közel konstans. Növekvő B_1/B_2 esetén (egyre inkább nyitott cellás habnak tekinthető a hab) a platófeszültség meredeksége növekszik, az egyenletes eloszlásnál tapasztalt él- és faljárulékokhoz hasonlóan (36. ábra).



(a)



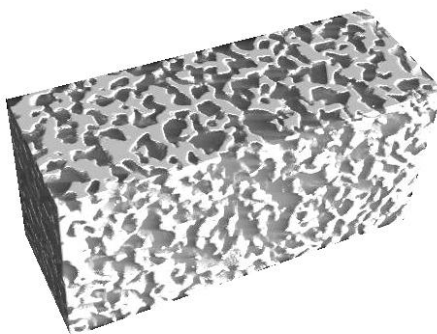
(b)

39. ábra. A cellaméret-eloszlás és B_1/B_2 hatása a feszültség-deformáció görbére. A platófeszültség kiszámításához a (3.12) és a (3.14) képletekben $f(l)$ helyébe Gauss-eloszlásfüggvényt helyettesítettünk. Az (a) ábránál a Gauss-eloszlás szórását változtattuk, míg a várható értéket, a legkisebb és legnagyobb cella méretét rögzítettük. A (b) ábrán B_1/B_2 hatását vizsgáltuk konstans B_2 mellett.

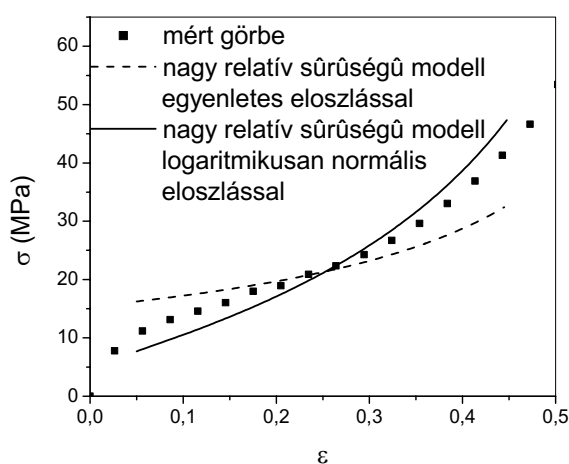
3.7. Nagy relatív sűrűségű, nyitott cellás fémhabok modelljének összevetése a mért deformációs görbékkel

Nyitott cellás habok cellaméret- vagy pórusméret-eloszlásának meghatározása – különösen nagy relatív sűrűségű habok esetén – a cellaélek és a cellaüregek szabálytalan alakja miatt nehéz feladat (40. ábra). Ezért a kis relatív sűrűségű fémhabok modelljéhez hasonlóan első közelítésben egyenletes cellaméret-eloszlást feltételezhetünk, amelyhez csak a legnagyobb és a legkisebb cellaátmérőket kell

meghatározni, például kétdimenziós csiszolatokból. Az egyenletes cellaméret-eloszlásból számított platófeszültség azonban sajnos lényegesen eltér a mért feszültség-deformáció görbétől (41. ábra). Ennél jobb közelítést kapunk, ha a valósághoz közelebb álló pórusméret-eloszlással számolunk. Feltételezve, hogy a sóra öntés során használt sószemcsék mérete logaritmikusan normális eloszlású, feltehetjük, hogy a pórusok átmérője is közel logaritmikusan normális eloszlást követnek. A 41. ábrán látható, hogy míg az egyenletes cellaeloszlással számított platófeszültség az alakítási keményedést alulbecsli, addig a logaritmikusan normális eloszlás esetén a nagy relatív sűrűségű, nyitott cellás modell (3.3 alfejezet) által jósolt feszültségértékek jobban közelítik a mért értékeket, de az alakítási keményedést ekkor kissé felülbecslik.



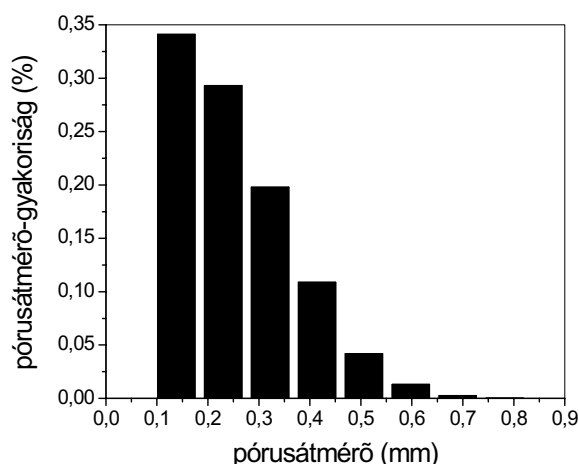
40. ábra. A nagy relatív sűrűségű AlMgSi hab háromdimenziós röntgentomográfiából nyert képe. A cellaéleket világos szürke, a pórusokat sötét szürke szín jelöli. A minta $12 \times 12 \times 24 \text{ mm}^3$ élhosszúságú téglatest



41. ábra. A nagy relatív sűrűségű AlMgSi feszültség-deformáció görbéje és a nagy relatív sűrűségű, nyitott cellás modellel számított platófeszültség egyenletes pórusméret-eloszlás (szaggatott görbe) és logaritmikusan normális pórusméret-eloszlás (folytonos görbe) esetén

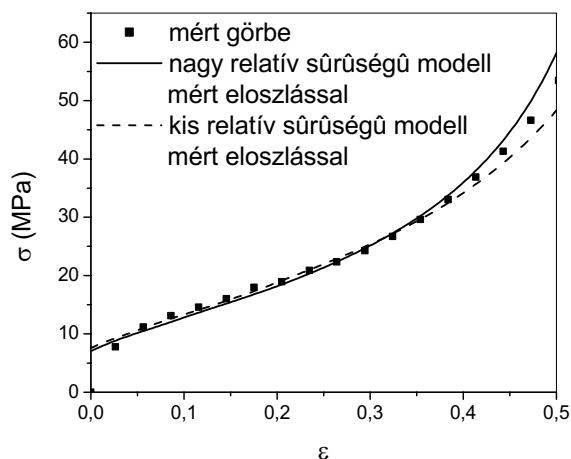
Érdemes megjegyezni, hogy a modell egyenleteinek felállításakor feltételeztük, hogy a minta keresztmetszete a deformáció során nem, vagy csak nagyon kicsit változik. Míg kis relatív sűrűségű habok esetén az a közelítés helytálló volt, addig nagyobb relatív sűrűségű haboknál már megfigyelhető a deformáció során a hordósodás jelensége, és ezzel együtt a keresztmetszet változása is. Az irodalomból vett mérések mindazonáltal azt mutatják, hogy körülbelül 40%-os deformációig a keresztmetszet változása még elhanyagolható [27].

Nyitott cellás habok esetén is van lehetőség a pórusméret-eloszlás meghatározására röntgentomográfiával készült háromdimenziós képből, granulometriával. A granulometriával kapott térfogateloszlás azonban csak akkor ad pontos képet a pórusméret-eloszlásról, ha az üregek alakját gömbbel közelítjük.



42. ábra. Az AlMgSi hab háromdimenziós granulometriával meghatározott pórusméret-eloszlása

A 42. ábra az általunk vizsgált nagy relatív sűrűségű hab granulometriával meghatározott pórusméret-eloszlását mutatja, gömb alakú pórusokat feltételezve. Az eloszlás lineáris interpolációjával kapott folytonos görbét behelyettesítve a (3.1), a (3.6), valamint a (3.15) és a (3.16) egyenletekbe, kiszámíthatjuk a mért pórusméret-eloszlás alapján várható platófeszültséget nyitott cellás habokra mind a kis, mind a nagy relatív sűrűségű esetben. A 43. ábrán látható, hogy mind a kis, mind a nagy relatív sűrűségű közelítés jól írja le a mért feszültség-deformáció görbét; eltérés csak 35%-nál nagyobb deformációknál tapasztalható.



43. ábra. A nagy relatív sűrűségű AlMgSi feszültség-deformáció görbéje valamint nyitott cellás kis és nagy relatív sűrűségű modellekből, mért pórusméret-eloszlással számított platófeszültség

Az illesztések tehát azt mutatják, hogy míg a vastag élek hatását figyelembe vevő korrekció alig változtatja meg a platófeszültség meredekségét, addig a fémhab feltételezett pórusméret-eloszlása az illesztés pontosságát jelentősen befolyásolja. A vastag éleket számításba vevő korrekció csekély hatásának egyik oka az lehet, hogy a kis relatív sűrűségű modell esetén az A illesztési paraméter is tartalmazza a korrekciókat. Lehetséges azonban az is, hogy a vastag éleket figyelembe vevő korrekció csak 40%-nál nagyobb deformációkra ad a platófeszültséghez jelentős járulékot.

3.8. A 3. fejezet eredményei

Különböző relatív sűrűségű fémhabok platófeszültségének változását vizsgáltuk az általunk alkotott egyszerű, „kockaváz” cellaszerkezetű modell segítségével. A platófeszültség emelkedése ezen modell alapján a cellák méretbeli eloszlásával magyarázható. A modell segítségével egyenletes, vagy más egyszerű, folytonos cellaméret-eloszlást feltételezve a platófeszültség a deformáció analitikus függvényeként fejezhető ki mind zárt, mind nyitott cellás szerkezet esetén. A valósághoz közelebb álló cellaméret-eloszlások alkalmazásakor a feszültség-deformáció görbe csak numerikusan számítható ki. A kapott $\sigma - \varepsilon$ összefüggések (tetszőleges cellaméret-eloszlás mellett) nyitott cellás esetben csak egy (A), zárt cellás esetben lényegében két (B_1 , B_2) illesztési paramétert tartalmaznak.

Az analitikus feszültség-deformáció görbék elemzéséből kitűnnek a platófeszültséget befolyásoló különböző paraméterek hatásai. Megállapítottuk, hogy:

- egyenletes cellaméret-eloszlás esetén a platófeszültség csak a legnagyobb (l_2) és a legkisebb (l_1) cellaátmérők hányadosától függ, a hányados növekedtével a platófeszültség egyre meredekebben emelkedik,
- a relatív sűrűség növekedésével nő a feszültség-deformáció görbe meredeksége, valamint a platófeszültség kezdeti értéke,
- zárt cellás hab esetén a falak közel konstans feszültséggel emelik a platófeszültség értékét.

Bár a modell nagyon leegyszerűsíti a fémhabokban lejátszódó deformációs folyamatokat (például nem veszi figyelembe, hogy egy deformációs sávban különböző méretű cellák roppannak össze, ahol ráadásul a cellák erősen hatnak egymásra), és számos egyéb hatást is figyelmen kívül hagy (például a cellaélek anyagának alakítási keményedését), ennek ellenére – a mért cellaeloszlást alkalmazva – jó közelítést kaphatunk a platófeszültségre akár 50%-os deformációig is.

4. Deformációs mechanizmusok vizsgálata akusztikus emisszióval [S4]

Az akusztikus emisszió (AE) ígéretes módszer a fémhabok deformációs mechanizmusainak vizsgálatakor. Összenyomás során ugyanis a habokban a feszültség lokalizálódik, így a fémhabban az AE forrása lokalizálható, nagy energiájú jelet bocsát ki. Mivel a cellaélek és cellafalak jól vezetnek a rezgéseket, ezért a műanyaghabokkal ellentétben a fémhabokban a jelek nagy százaléka eljut az érzékelőig. Továbbá az AE olyan roncsolásmentes eljárás, amellyel a terhelés hatására keletkező hibákról, szerkezetváltozásokról gyorsan és olcsón szerezhetünk információt (ellentétben a röntgentomográfiával). Hátránya más roncsolásmentes eljárásokkal szemben viszont az, hogy a kapott adatok értelmezése korántsem egyszerű.

A következőkben a feszültség-deformáció görbe és a hozzá tartozó AE görbe közötti összefüggésekről lesz szó. Megmutatjuk, hogy benyomódási kísérletek alkalmasak arra, hogy a terhelés hatására a mintában megjelenő deformációs mechanizmusoknak, mint forrásoknak megfeleltessük az általuk kibocsátott AE jelet.

4.1. Kísérleti körülmények

Két különböző típusú alumíniumhabot használtunk vizsgálatainkhoz (4. táblázat): a pormetallurgiával előállított Mepura fémhabot, amely az alumíniumon kívül 10% szilíciumot tartalmaz (a továbbiakban ezt a fémhabot AlSi10-zel jelöljük), és különböző sűrűségű Alporas habokat.

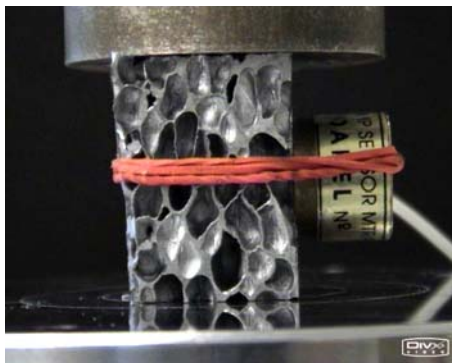
Jelölés	Relatív sűrűség (%)	Név
Ap06	6	Alporas
Ap09	9	Alporas
Ap13	13	Alporas
Ap17	17	Alporas
AlSi10	15	Mepura

4. táblázat. Akusztikus emisszióval vizsgált fémhabok adatai

Kétféle mechanikai vizsgálat során figyeltük a fémhabok AE aktivitását: összenyomás és benyomódás közben. A kvázisztatikus összenyomásokat MTS anyagvizsgáló géppel végeztük különböző keresztfej-sebességek mellett ($5 \cdot 10^{-3} - 1,25 \cdot 10^{-1}$ mm/s). Az Alporas minták 40 mm oldalú kockák voltak, így a minta mérete minden esetben legalább tízszerese volt az átlagos cellaméretnek. Mivel az AlSi10 hab esetén legfeljebb 3-4 cellaméretű mintát tudunk volna készíteni (ezt a habot 2 cm vastag lemezekben állítják elő), ezért ezeken a habokon nem végeztünk összenyomási kísérleteket.

A benyomódási kísérleteket fémhab tömbökön, sík végű hengeres benyomófejjel végeztük. A benyomófej átmérőjét úgy választottuk meg, hogy még mérhető AE jelet kapjunk, ugyanakkor a deformáció minél kisebb térfogatra korlátozódjon. Így a benyomófej átmérője 1,5 mm volt a rideg AlSi10 habra, és 5 mm a kevésbé rideg, képlékenyen is deformálódó Alporas habok esetén. Minden benyomódást a minta szélétől és az előző benyomás helyétől legalább 1-2 benyomófejnyi távolságra végeztünk, ezzel is csökkentve a szabad élek hatását [37]. A benyomódási vizsgálatokhoz szintén MTS anyagvizsgáló gépet használtunk, $5 \cdot 10^{-3}$ mm/s állandó keresztfej-sebesség mellett. A továbbiakban összenyomásnál és benyomódásnál a feszültség és a deformáció mérnöki feszültséget, illetve a keresztfej elmozdulásából számított mérnöki deformációt jelent.

Az akusztikus emissziós mérésekhez egy számítógép által vezérelt DAKEL-XEDO-3 rendszert használtunk [48], [62]. Érzékelőnek 100 és 600 kHz között érzékeny LB10A piezokristályos jelátalakítót alkalmaztunk, amelyet gumigyűrű és szilikonos gitt segítségével erősítettünk a minta felületéhez (44. ábra). A teljes erősítés 94 dB volt. A méréseket $c1=730$ mV és $c2=1450$ mV küszöbértékek mellett végeztük, így \dot{N}_{c2} (egységnyi idő alatt a $c2$ küszöbértéket meghaladó rezgések száma) a kitöréses emisszióról, míg \dot{N}_{c1} és \dot{N}_{c2} különbsége (azaz azok a jelek, amelyek meghaladták a $c1$ -es küszöbértéket, de nem lépték túl a magasabb, $c2$ -es küszöbértéket) a folyamatos emisszióról ad információt. Az esemény kezdetéhez és végéhez tartozó feszültségértékeket 1695 mV-nak illetve 1212 mV-nak állítottuk be, a holtidő 1000 μ s volt.



44. ábra. Kísérleti elrendezés fémhabok akusztikus emissziós méréséhez

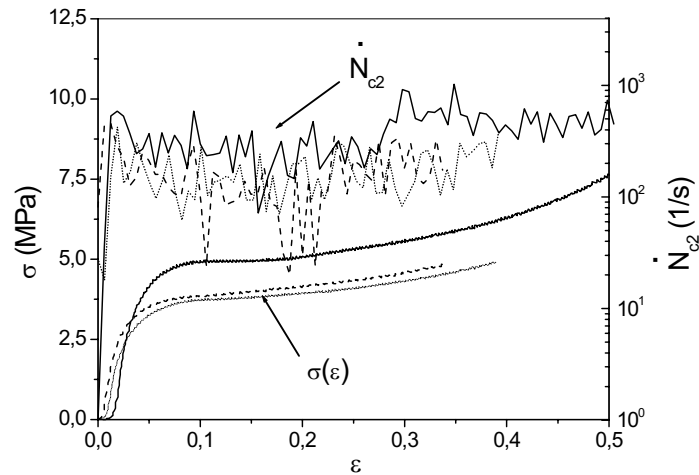
A mérések során rögzítettük a erő-elmozdulás görbéket, a két küszöbértékhez tartozó rezgésszám-gyakoriságot (\dot{N}_{c1} , \dot{N}_{c2}), az eseményszám-gyakoriságot, az események időtartamát, amplitúdóját, az *RMS* értéket és a nagy energiájú, 1695 mV-ot meghaladó jelek alakját.

Az összenyomási és akusztikus emissziós mérésekkel egyidejűleg a fémhab felületének deformálódását videóra rögzítettük.

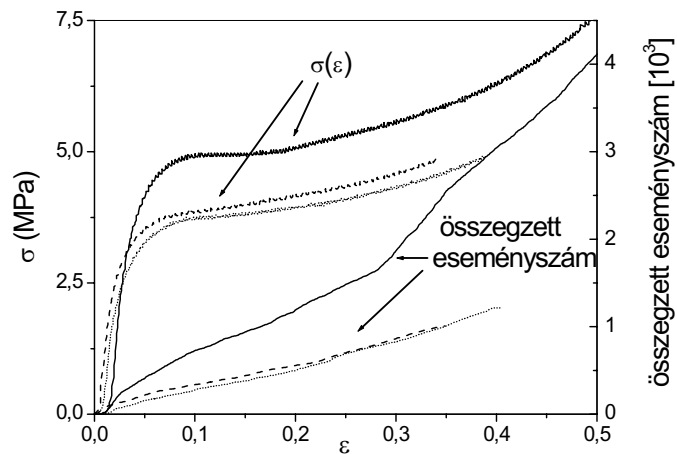
4.2. Egytengelyű összenyomás

Ahhoz, hogy az AE mért paraméterei és a deformációs mechanizmusok közötti összefüggéseket feltárhassuk, előbb meg kellett vizsgálni, hogy a mérések mennyire reprodukálhatóak és a mechanikai vizsgálatok egyes paraméterei (például az összenyomás sebessége) hogyan befolyásolják a különböző AE paramétereket. Ezért először az AE görbék *reprodukálhatóságát*, majd a *sebességtől való függést* vizsgáltuk meg.

Az Ap17-en 0,005 mm/s állandó keresztfej sebességgel végzett reprodukálhatósági vizsgálatok eredményét a 45. ábra mutatja. A jellemző rezgésszám-gyakoriság görbén – a feszültség-deformáció görbéhez hasonlóan (45. ábra) – három szakaszt különböztethetünk meg. A rezgésszám-gyakoriság a feszültség-deformáció görbe első szakasza alatt néhány százalékos deformációtól gyorsan, többnyire lineárisan nő, és még a platószakasz előtt egy konstans érték körül kezd ingadozik.



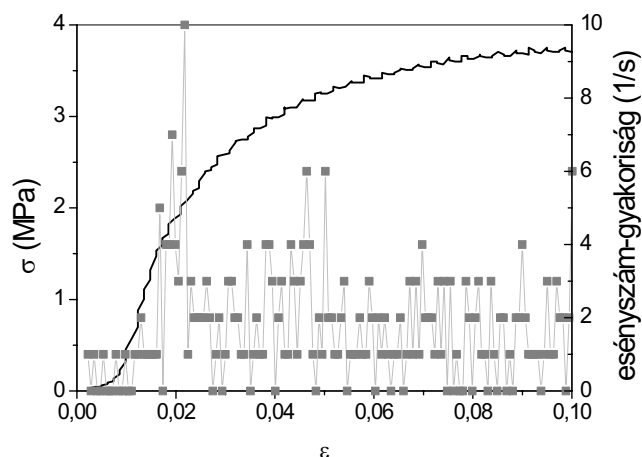
(a)



(b)

45. ábra. Reprodukálhatóság. Az ábra a $v=0,025$ mm/s sebességgel összenyomott Ap17-es minták feszültség-deformáció görbéit (sima görbék) és a mért AE görbéket mutatja: (a) a rezgésszám-gyakoriságot a $c2$ küszöbértékre (fogazott görbék) és (b) az összegzett eseményszámot.

Hasonló jellegzetességet mutat az eseményszám-gyakoriság görbe is. Nagyon kis deformációig a műszer nem jelzett eseményt, ezt követően másodpercenként csak maximum egy-két eseményt jelzett. A deformáció $\varepsilon \approx 2\%$ -nál hirtelen jelentősen megnő az eseményszám-gyakoriság, majd még a platószakasz kezdete előtt visszaesik a görbe másodpercenkénti néhány eseményre (46. ábra). A tömörödési szakaszban mind a rezgésszám-gyakoriság, mind az eseményszám-gyakoriság növekvő deformációval nő. Az \dot{N}_{c1} és \dot{N}_{c2} görbék egészen a második szakasz végéig közel párhuzamosak, de a harmadik szakaszban szétválnak; \dot{N}_{c1} erőteljesebben nő, mint \dot{N}_{c2} , ami megnövekedett súrlódási folyamatokra utal.



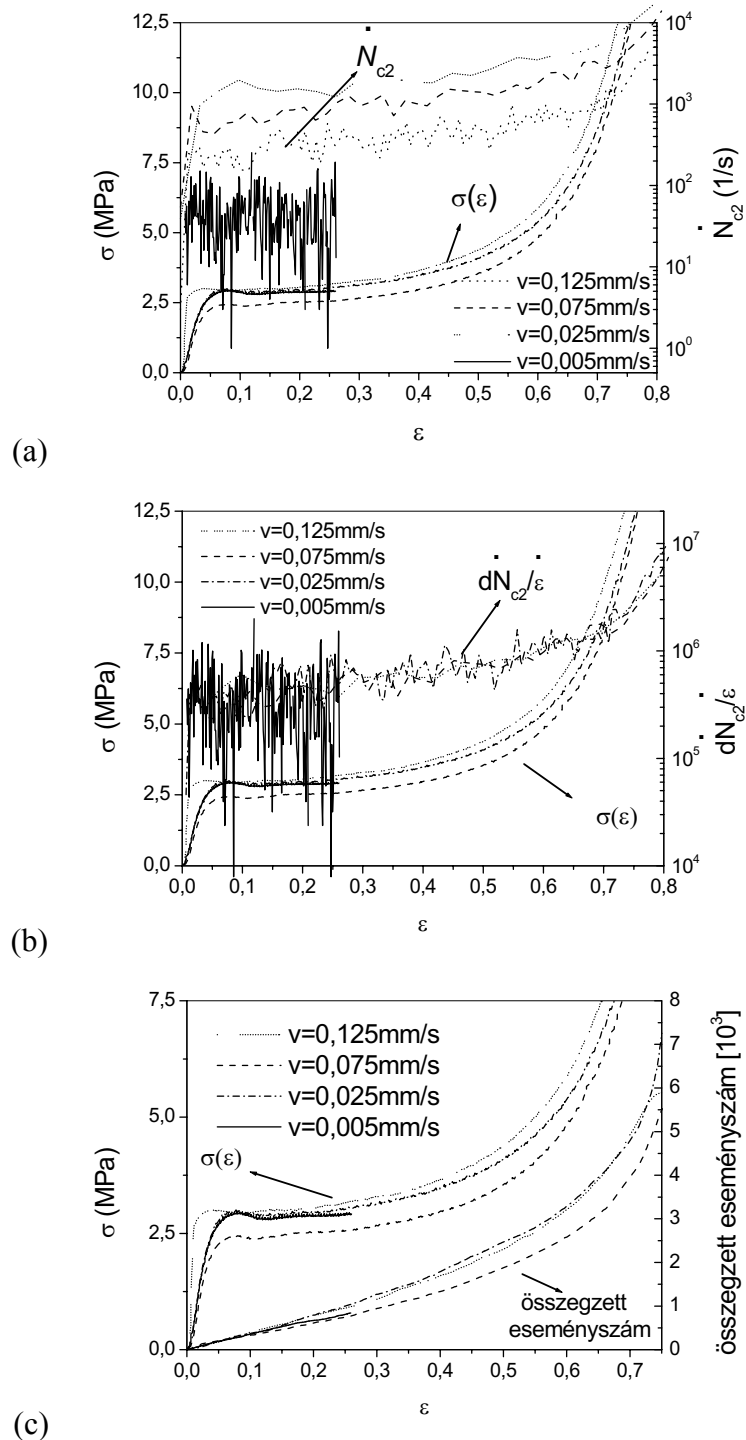
46. ábra. Az Ap17-es minta eseményszám-gyakoriság görbéje (szürke görbe) a feszültség-deformáció görbe (fekete vonal) első szakaszában

Az eseményszám-gyakoriságban az $\varepsilon \approx 2\%$ -nál bekövetkezett hirtelen növekedés azzal magyarázható, hogy a deformáció rugalmas szakasza itt ér véget; a feszültség-lokalizáció hatására cellaélek és/vagy falak kihajlanak, esetleg mikrorepedések keletkeznek. (A rugalmas szakaszban valószínűleg azért kaptunk AE jeleket, mert – mint az az alakítási görbéből is látható – a minta összenyomásra merőleges felületei nem voltak párhuzamosak, így a kezdeti alakítás sem volt teljesen rugalmas.)

Bár a próbatest mérete több mint tizenötszöröse volt az átlagos cellaméretnek, a mechanikai tulajdonságokban mégis nagy szórást tapasztaltunk; a három, azonos anyagból készített minta közül az egyik platófeszültsége lényegesen magasabb. Ennek ellenére a $c2$ küszöbértéket meghaladó rezgésszám-gyakoriság reprodukálhatónak mondható. Az egyik minta eltérő viselkedésének egyik lehetséges oka, hogy a minta relatív sűrűsége néhány százalékkal nagyobb volt. Mivel azonban 1-2%-os eltérés a relatív sűrűségben legfeljebb 20%-os változást okozhat a platófeszültségben, így valószínű, hogy a minta kissé anizotróp is volt. Ez megmagyarázná a magasabb összegzett eseményszámot is.

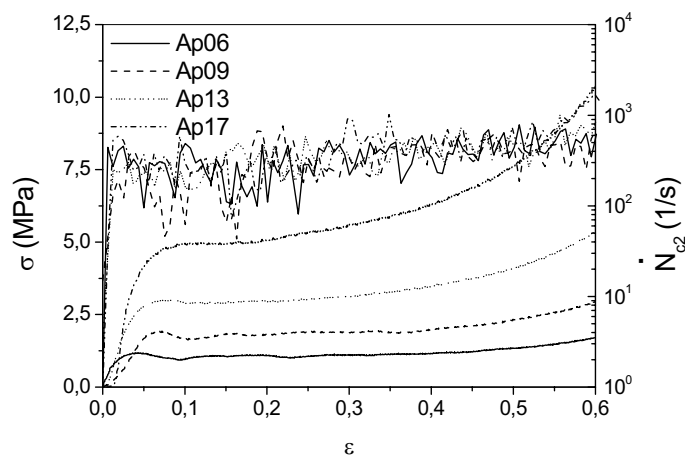
A rezgésszám-gyakoriság görbék összenyomási sebességtől való függése látható a 47. ábrán. Mivel a gyakoriság görbék egy paraméter időegység alatti értékét mutatják, ezért a gyakoriság görbék fogazottsága és értéke függ az összenyomás sebességétől (47. (a) ábra). Különböző keresztfej-sebességgel összenyomott fémhabok AE aktivitásának összehasonlításakor tehát nem az időegységre, hanem az egységnyi deformációra eső gyakoriság görbéket érdemes vizsgálni. A 47. (b) és (c) ábrákon látható, hogy a vizsgált sebességtartományban (0,005-0,125 mm/s) az összenyomási tulajdonságok, az irodalmi

eredményekkel összhangban [63], nem függenek az összenyomás sebességétől. Az AE paraméterek sebességtől való függetlensége ugyanakkor megerősíti azt a feltételezést is, hogy a vizsgált sebességtartományban a deformációs mechanizmus sem változik.



47. ábra. Az összenyomási sebesség hatása az Ap17 mintára. Az ábrákon különböző sebességgel ($v=0,005-0,125$ mm/s) összenyomott Ap17-es minták feszültség-deformáció (sima görbék) és az AE görbék láthatók a deformáció függvényében: (a) \dot{N}_{c2} , az időegységre eső rezgésszám-gyakoriság, (b) az egységnyi deformációra eső rezgésszám-gyakoriság, és (c) az összegzett eseményszám

Végül megvizsgáltuk a relatív sűrűség hatását a különböző AE paraméterekre összenyomás közben. Tömör minták esetén az AE aktivitás a minta térfogatával nő. Emiatt azt várnánk, hogy azonos méretű fémhabminták esetén a relatív sűrűséggel nő a fémhab AE aktivitása. A kísérletek ezzel szemben azt mutatják, hogy bár a platófeszültség nő a relatív sűrűséggel, a rezgésszám-gyakoriság és az eseményszám-gyakoriság lényegében független a fém térfogati hányadától (48. ábra). Ez az eredmény arra enged következtetni, hogy a relatív sűrűséggel változik a deformáció mechanizmusa: a sűrűség növekedtével a nagy \dot{N}_{e2} rezgésszám-gyakoriságot adó cellaél- és cellafaltörések egyre kevésbé dominálnak. Ez összhangban áll a videofelvételeken tapasztaltakkal; a nagyobb sűrűségű Ap17 inkább plasztikus csuklók keletkezésével, míg a kisebb sűrűségű Ap06 inkább a cellafalak hullámosodásával és törésével deformálódik.



48. ábra. A relatív sűrűség hatása a feszültség-deformáció és a rezgésszám-gyakoriság görbékre.

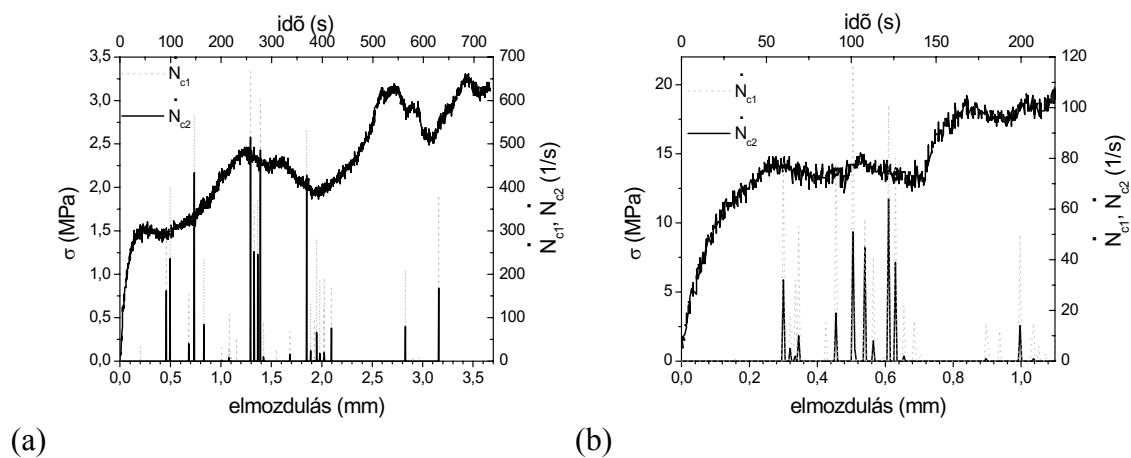
4.3. Benyomódás

A benyomódási vizsgálatok nagy előnye az összenyomási vizsgálatokkal szemben a kis mintaméret. Míg összenyomási vizsgálatoknál a minta mérete legalább az átlagos cellaméret hétszerese, addig benyomódási vizsgálatokhoz ennél jóval kisebb méretű minta is elegendő. Másik előnyük, hogy benyomódásnál a deformáció a benyomófej alatti térfogatra lokalizálódik, így kis térfogatról kaphatunk információt. Ennek persze az a következménye, hogy kis benyomófej-átmérő esetén a feszültség-

elmozdulás görbének nagy a szórása, mivel a feszültséget a hab (benyomófej alatti) lokális tulajdonságai határozzák meg. A lokális tulajdonságok nagy benyomófej esetén átlagolódnak és ideális közelítésben, (a cellamérethez viszonyítva) végtelen nagy benyomófej esetén a benyomódási és az összenyomási platófeszültségek csak kis mértékben térnek el egymástól [38], [39].

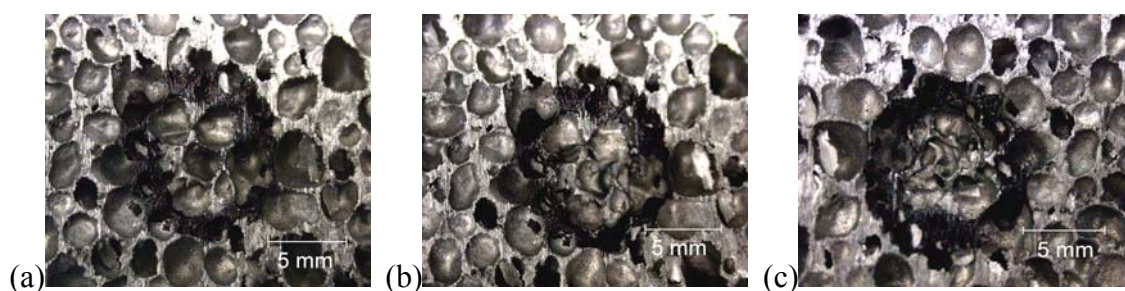
Az AE jelek és a deformációs mechanizmusok közötti kapcsolat feltárásánál fontos, hogy a deformáció jól definiált kis térfogatban menjen végbe. Ez a feltétel a benyomódási kísérleteknél kis benyomófej esetén teljesül.

Különböző relatív sűrűségű habokon végeztünk akusztikus emissziós és benyomódási kísérleteket. A 49. ábra jellemző feszültség-elmozdulás görbéket mutat a hozzá tartozó \dot{N}_{c1} és \dot{N}_{c2} rezgésszám-gyakoriság görbékkel. A kis deformációs zóna következtében a feszültség-elmozdulás görbék nem reprodukálhatók, viszont a hab deformációs mechanizmusait jellemző akusztikus aktivitás diszkrét értékekből álló görbe (ellentétben az összenyomási deformációval, ahol az AE aktivitás folytonos görbe).



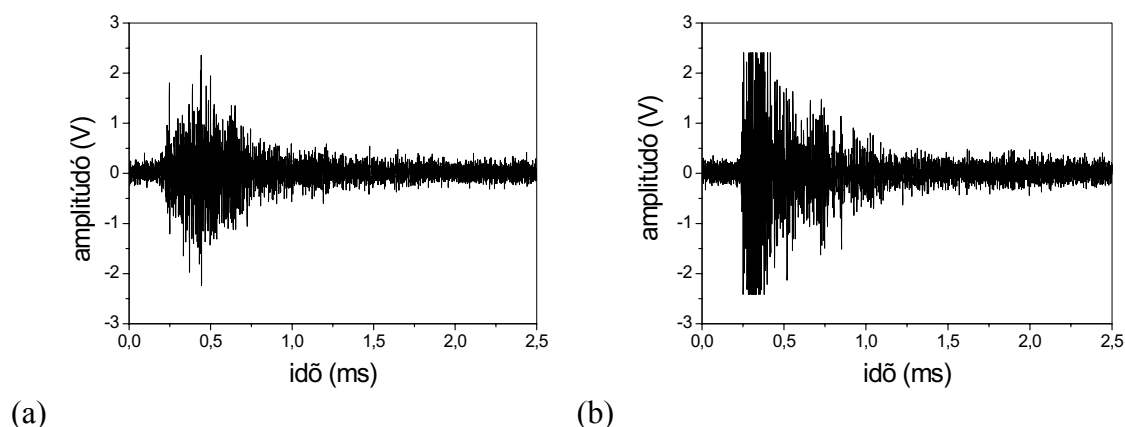
49. ábra. Tipikus benyomódási feszültség-elmozdulás görbék (vastag, folytonos vonal) a diszkrét rezgésszám-gyakoriság görbékkel (a) az Ap09-es mintára és (b) az AlSi10 mintára

Az Ap17-es mintánál az egyes diszkrét AE jelek után fényképeket készítettünk a minta felszínéről (50. ábra). A fényképsorozaton jól nyomon követhető az Alporas hab deformációs mechanizmusainak változása. Kis deformációknál a cellafalak meghajlanak (50. (a) ábra). További benyomódás hatására a cellafalak kihajlanak, megfolynak, és a benyomófej kerülete mentén a cellaélékkel együtt eltörnek (50. (b) ábra). Végül a már deformálódott rész a benyomófej alatt összetömörödik (50. (c) ábra).



50. ábra. Alporas hab deformációs mechanizmusainak változása benyomódás során. (a) A hab először cellafal meghajlásával, majd (b) töréssel, plasztikus csuklókkal és kihajlással deformálódik. Ezután (c) a legfelső réteg összetömörödik.

A lehetséges deformációs mechanizmusok azonosításához rögzítettük az AE jelalakokat is. Alapvetően két fajta jelalakot figyeltünk meg a felfutási időnek megfelelően (51. ábra). Az A típusú jelalaknál az amplitúdó fokozatosan emelkedik, míg a B típusú jelalaknál a felfutási idő elhanyagolható.

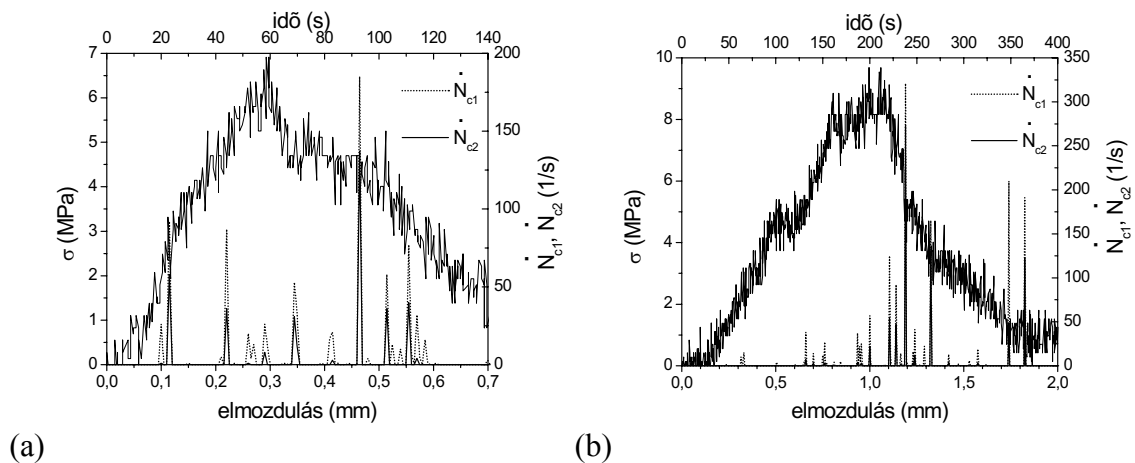


51. ábra. Két jellegzetes AE jelalak. (a) Az A típusú jelalaknál az amplitúdó folyamatosan növekszik, míg (b) a B típusú jelalakot elhanyagolható felfutási idő jellemzi.

A benyomódás első, kvázi-lineáris szakaszában csak ritkán mértünk AE aktivitást, akkor is inkább kis amplitúdójú A típusú jeleket kaptunk. Ez arra utal, hogy már a benyomódás korai szakaszában is deformálódhat a hab képlékeny alakváltozással. A második szakasz elejét kivétel nélkül nagy amplitúdójú (a $c_2 = 1695$ mV küszöb feszültséget meghaladó) kitöréssel jelző emisszió jelzi, amelynek alakja szinte mindig B típusú. A rövid felfutási idő és a nagy amplitúdó arra enged következtetni, hogy a cellafal, cellaél törése, vagy a bennük keletkező mikrorepedések okozzák az első törést a feszültség-elmozdulás görbében. Általában is megfigyelhető volt, hogy a feszültség-elmozdulás görbe töréspontjaihoz nagy amplitúdójú AE jelek tartoznak.

A deformációs mechanizmusok pontosabb jellemzése érdekében a benyomófej átmérőjét az átlagos cellaméret alá csökkentettük, és megvizsgáltuk, hogy egyes elemi mechanizmusokhoz (mint például a cellaélek meghajlása vagy a cellafalak kihajlása) milyen AE válasz kapcsolható. Ezeket a méréseket a rideg AlSi10 mintán végeztük, hogy az AE aktivitás jól mérhető legyen.

Először egy cellaél majd egy cellafal hajlítását vizsgáltuk meg. A hajlításhoz tartozó feszültség-elmozdulás görbe mindkét esetben két részből áll: egy közel lineárisan emelkedő és egy közel lineárisan csökkenő szakaszból (52. ábra). A hajlítás végén, a cellaél, illetve a cellafal eltörésekor a feszültség nullára esik vissza. Az AE mérések azt mutatták, hogy már nagyon kis (0,1-0,2 mm) elmozdulások esetén is van képlékeny deformáció. A nagyobb benyomófejjel végzett mérésekhez hasonlóan, a feszültség esésekor legtöbbször nagy amplitúdójú, kitöréses emissziót mértünk. Így arra következtethetünk, hogy az AE forrása ezekben az esetekben repedések kialakulása vagy terjedése volt. Összehasonlításként megmértük egy tömör terület AE aktivitását benyomódás során. Leszámítva a feszültség-elmozdulás görbe egy töréspontját 0,1 mm-nél, az anyag nem mutatott AE aktivitást. Ez megerősíti azt a feltételezést, hogy a fémhabban a cellaélek, cellafalak hajlításakor már kis elmozdulás esetén is repedések keletkezhetnek, illetve a már meglévő repedések továbbterjednek.



52. ábra. A feszültség-elmozdulás és a rezgésszám-gyakoriság görbék az AlSi10 minta (a) cellaélének meghajlításakor és (b) cellafalának deformálásakor

4.4. A 4. fejezet eredményei

Alumínium alapú fémhabok deformációs mechanizmusait vizsgáltuk akusztikus emisszióval összenyomás és benyomódás során. Megmutattuk, hogy a benyomódás során mért AE aktivitás alkalmas a fémhab deformációs mechanizmusainak azonosítására, mivel megfelelő benyomófej-átmérő esetén a benyomófej alatti kis térfogatú deformációs zónában keletkezett jel diszkrét. A mérés során két fajta AE jelalakot különböztettünk meg a felfutási idő szerint. Ez az eredmény alapvetően két különböző, a deformáció során lejátszódó folyamatra utal: törésre, illetve repedések terjedésére, és képlékeny folyásra.

Az összenyomás közben észlelt AE aktivitás a képlékeny deformáció megjelenését már a deformáció első, kvázi-lineáris szakaszában is kimutatta. Az akusztikus emisszió a különböző sebességgel összenyomott fémhabok deformációs mechanizmusában a szakirodalommal összhangban nem mutatott változást.

5. Benyomódás szimulálása végeelem módszerrel [S5]

Az utóbbi időben számos publikáció foglalkozott celluláris anyagok benyomódásának szimulálásával, ezen belül a feszültség-deformáció görbe meghatározásával és a mérethatások vizsgálatával [64], [65]. Ezekben a vizsgálatokban vagy egy egyszerűsített kétdimenziós szerkezetet használtak a benyomódás szimuláláshoz (például szabályos méhsejt szerkezet), vagy a habot kontinuumként kezelték, azaz olyan homogén (tömör) anyag benyomódási deformációját vizsgálták végeelem módszer segítségével, amely anyag tulajdonságai megegyeztek a hab átlagolt (effektív) tulajdonságaival.

Jelen fejezetben benyomódás során keletkezett deformációs zóna alakját és nagyságát vizsgáljuk különböző sűrűségű alumíniumhabok kvázi háromdimenziós végeelem szimulációival, figyelembe véve a röntgentomográfiával kapott kiindulási fémhab-szerkezetet. Mind a szimuláció, mind a röntgentomográfias felvételek azt mutatják, hogy a deformációs zóna alakja olyan gömbszelettel közelíthető, amelynek sugara függ a benyomódás mélységétől, a benyomófej sugarától és a fémhab relatív sűrűségétől.

5.1. Kísérleti körülmények

Vizsgálatainkhoz háromféle Alporas alumíniumhabot használtunk, relatív sűrűségük rendre 0,06, 0,09 és 0,17 volt. A benyomódási méréseket MTS anyagvizsgáló géppel, 25 mm oldalhosszúságú kocka alakú mintákon végeztük, $v = 10^{-3} \text{ mms}^{-1}$ állandó keresztfej-sebesség mellett. Méréseinkhez sík végű, 12 mm átmérőjű hengeres benyomófejet használtunk. A benyomódási mélység körülbelül 10 mm volt.

A fémhabok benyomódás előtti és utáni szerkezetét is megfigyeltük röntgentomográfiával. Ehhez kúp nyalábterű mikrofókuszos röntgenkészüléket használtunk, 50 μm -es felbontás mellett (21. ábra). Két felvétel-sorozatot készítettünk: egy sorozatot benyomódás előtt, és egy másikat benyomódás után. Benyomódás előtt mindhárom minta kezdeti szerkezetét feltérképeztük, míg benyomódás után csak a 9% és a 17%-os habokról készítettünk háromdimenziós képeket.

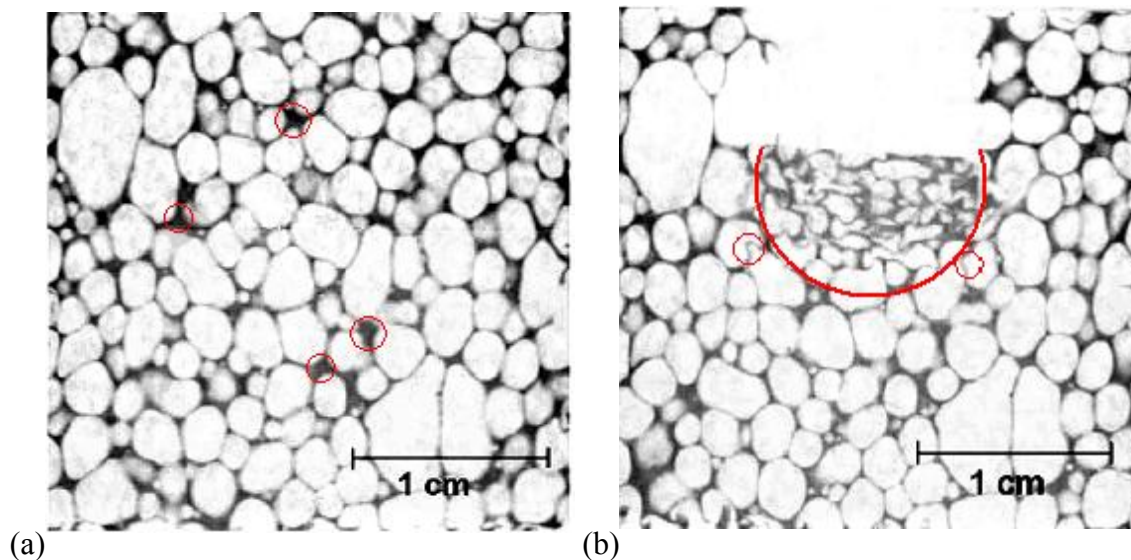
A különböző sűrűségű habok benyomódásának szimulálásához az MSC és MARC végeelem programokat használtuk [66]. A végeelem szimulációkhoz a fémhab szerkezetét a deformáció előtt készített tomográf-felvételből nyertük a következő módon. Először meghatároztuk a deformáció előtt készült háromdimenziós tomográf kép azon x-z síkját, amely tartalmazza a benyomófej tengelyét. Modellszerkezetnek ennek a síknak a benyomófej tengelyétől balra eső részét választottuk. A kvázi háromdimenziós, tengelyszimmetrikus modellt ezután a modellszerkezet tengely körüli forgatásával nyertük.

A benyomódás leírásához a végeelem számolások során a cellaél és cellafal anyagát elasztoplasztikus (ideálisan rugalmas és ideálisan képlékeny) anyagnak tekintettük, amelynek Young modulusza $E = 69GPa$, Poisson száma $\nu = 0,33$, folyásfeszültsége pedig $\sigma_{y,s} = 172MPa$ [20] volt. A végeelem szimulációkhoz hat csomópontú (126-os) háromszög-elemeket használtunk. A cellaélek és cellafalak kihajlásának modellezéséhez az élek és falak legalább négy végeelem szélesek voltak. A végső modellek körülbelül 50000-60000 elemet tartalmaztak.

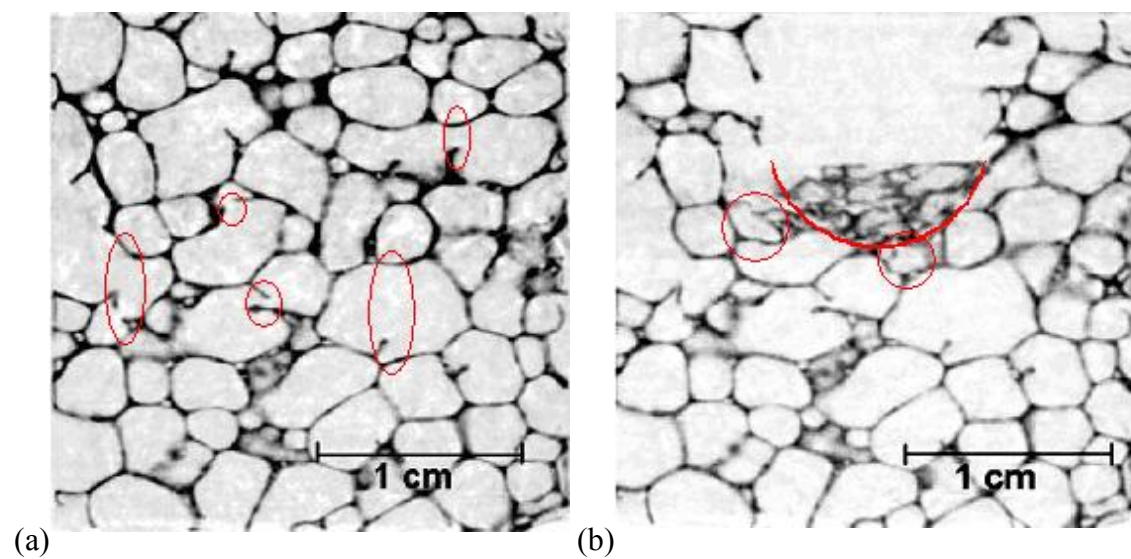
Az alátámasztás modellezéséhez a következő határfeltételt alkalmaztuk: a minta alsó (az alátámasztási felülettel érintkező) csomópontjai csak a terhelés irányára merőlegesen mozdulhattak el, a többi csomópont tetszőleges irányba elmozdulhatott. A benyomófejet merev felülettel modelleztük. A végeelem szimulációban nem vettük figyelembe a cellafalak repedését, törését, ellenben számoltunk a benyomódás során a cellafalak érintkezésekor keletkező erővel.

5.2. Deformációs zóna benyomódás során

A röntgentomográfiával készült háromdimenziós képek jól mutatják a különböző sűrűségű fémhabok közötti szerkezeti különbségeket (53. (a) és 54. (a) ábrák). Míg a kis relatív sűrűségű Alporas habra a nagyobb méretű cellák és a cellafalak hiánya jellemző, addig a nagyobb sűrűségű minták sajátossága a kisebb méretű cellák és a csomóponti tömörülések.



53. ábra. A 17% relatív sűrűségű Alporas hab háromdimenziós tomográf képeiből nyert kétdimenziós réteg (a) a benyomódás előtt és (b) a benyomódás után. A benyomódás előtti képen a bekarikázott területeken csomóponti tömörülések láthatók. A benyomódás utáni képen vastag vonal jelöli a deformációs zóna határát; a cellafalak kihajlását a zóna határához közel kis körök jelzik.



54. ábra. A 9% relatív sűrűségű Alporas hab háromdimenziós tomográf képeiből nyert kétdimenziós réteg (a) a benyomódás előtt és (b) a benyomódás után. A benyomódás előtti képen a bekarikázott területeken hiányzó és törött cellafalak láthatók. A benyomódás utáni képen vastag vonal jelöli a deformációs zóna határát; a cellafalak kihajlását a zóna határához közel kis körök jelzik.

A benyomódás után készült képeken jól látható (53. (b) és 54. (b) ábrák), hogy a deformációs zóna lényegében a benyomófej alatti területre korlátozódott; ettől egy cellaátmérőnél nagyobb távolságban a cellák nem szenvedtek maradó alakváltozást. Az ábrákból az is kitűnik, hogy míg a deformációs zónában a cellák már teljesen összeroppantak, és nagyrészt összetömörödtek, addig a zóna határához közel a cellafalak kihajlással deformálódtak.

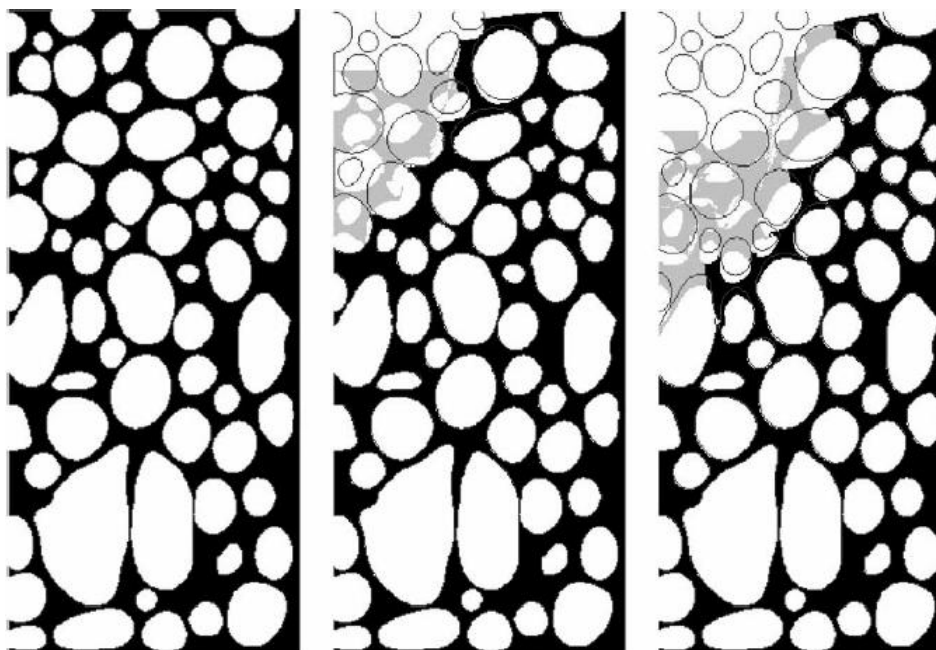
A röntgentomográf felvételek alapján a deformációs zóna a porózus közetekhez hasonlóan [67] gömbszelettel, azaz a gömb egy síkkal lemetszett részével közelíthető. A különböző sűrűségű habok deformációs zónái ezen belül más jellegzetességeket mutatnak: a 9 %-os Alporas hab esetén az összetömörödött cellák teljesen a benyomófej alatt vannak. Ekkor a gömbszelethez tartozó gömb középpontja a benyomófej előlapja fölött van. Ezzel ellentétben, a 17 %-os habnak van olyan, a benyomódás irányára merőlegesen vett síkja, amelyben a deformációs zóna átmérője nagyobb, mint a benyomófej átmérője. A deformációs zóna mintegy „kidudorodik” a benyomófej alatt. Ilyenkor a gömbszelethez tartozó gömb középpontja a benyomófej előlapja alatt van (53. (b) és 54. (b) ábrák).

A „kidudorodás” sűrűségtől való függése azzal magyarázható, hogy fémhaboknál a relatív sűrűséggel nő a képlékeny Poisson szám. A kis relatív sűrűségű fémhabok ν_{pl} képlékeny Poisson száma közel nulla, így összenyomódás, benyomódás során a harántirányú tágulásuk gyakorlatilag nulla. A relatív sűrűség növekedtével nő a képlékeny Poisson szám és ezzel együtt a habok harántirányú tágulása is, $\rho_{rel} \rightarrow 1$ esetén $\nu_{pl} \rightarrow 0,5$ teljesül [4].

Tehát a fémhab relatív sűrűségétől függően a gömbszelet két helyzetét különböztethetjük meg aszerint, hogy a gömbszelethez tartozó gömb középpontja a benyomófej előlapja alatt (53. (b) ábra), vagy fölött van (54. (b) ábra).

A fémhab szerkezetének hatását a deformációs zóna nagyságára és alakjára, valamint a benyomódás során fellépő deformációs mechanizmusokat végeelem módszer segítségével vizsgáltuk. Az 55. ábra a benyomódás három jellegzetes szakaszát mutatja: a kiindulási szerkezetet, a benyomódás utáni deformált szerkezetet és egy közbenső állapotot. A kiindulási állapot a 17 %-os Alporas hab képének (53. (a) ábra) bal fele alapján készült. Bár a cellafalak vastagabbak, mint a tomográfiával készült képen, az egyes cellák az alakjukról könnyen felismerhetők. A vastagabb cellafalak azzal magyarázhatók, hogy az üregeket határoló görbék pontjait az illesztőprogram [68]

sajátosságai miatt csak egy-két pixeles hibával sikerült meghatározni. A végállapotnak az 53. (b) ábra bal fele felel meg.



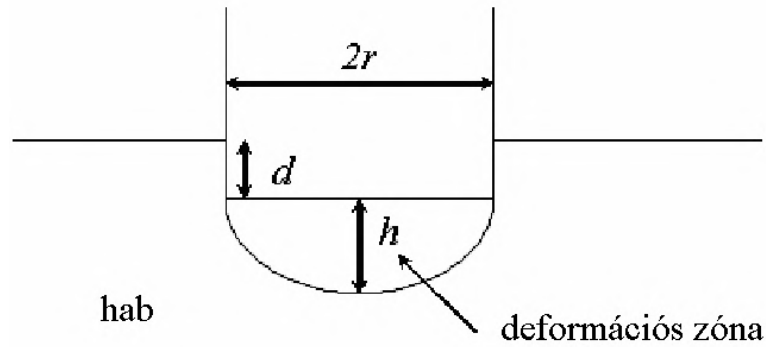
55. ábra. Alporas hab benyomódásának modellezése végeelem módszerrel. A kiindulási szerkezet az 53. (b) ábrán látható. Világos szürkével jelöltük az elmozdult tartományokat.

Érdeemes megjegyezni, hogy habár a végeelem modell tengelyszimmetrikus, és a cellafal anyagát elasztoplastikusnak tekinti, mégis mutatja a tomográf képeken látható jellegzetességeket. Így például a deformációs zóna itt is a benyomófej alatt helyezkedik el, és a deformációs zónával nem közvetlenül szomszédos cellák a végelem szimulációja során sem deformálódnak. Emellett a szimulációkból kapott deformációs zóna alakja – a Kumar és társai által végzett benyomódási kísérletekkel összhangban [69] – hasonlít a kontinuumként kezelt, összenyomhatatlan anyag deformációs zónájának alakjához [70].

Az általunk végzett szimuláció azt is kimutatta, hogy azok a közvetlenül a benyomófej alatt lévő cellák, amelyek a benyomófej közepe alatt találhatók, körülbelül fél cellaátmérő mélységig alig deformálódnak a benyomódás során. Hasonló eredményeket kaptak kétdimenziós Voronoi-típusú habok benyomásának modellezésekor [65] és benyomódási mérések során is [69]. A benyomódás szimulálásával kapott elmozdulás-térképeken még az is megfigyelhető, hogy a habok a platószakaszban benyomódás esetén is deformációs sávok kialakulásával

deformálódnak, itt azonban – az összenyomással ellentétben – a deformációs sávok nem síkok mentén, hanem közel gömbszelet-felületek mentén alakulnak ki (55. ábra).

A deformációs zóna alakját gömbszelettel közelítve, meg lehet becsülni a deformációs zóna nagyságát. Benyomódás során mind a benyomófej helyén lévő $dr^2\pi$ térfogatban, mind a deformációs zóna helyén lévő $\frac{1}{6}\pi h(3r^2 + h^2)$ térfogatban a hab összetömörül (56. ábra), ahol h a deformációs zóna magassága, míg d a benyomódás mélysége. Így a deformációs zóna térfogatában $\varepsilon_D \frac{1}{6}\pi h(3r^2 + h^2)$ térfogatnyi hely keletkezik.



56. ábra. Sík végű, hengeres benyomófejjel történő benyomódás sematikus rajza

Feltételezve, hogy a habban a benyomófej helyén lévő tömör anyag a deformációs zóna létrejöttkor keletkező üres térfogatba tömörül, a deformációs zóna h magassága, a benyomófej r sugara és a d benyomódási mélység között az alábbi összefüggés adható:

$$(1 - \varepsilon_D)\pi r^2 d = \varepsilon_D \frac{1}{6}\pi h(3r^2 + h^2), \quad (5.1)$$

ahol ε_D a denzifikációs deformáció. Innen a deformációs zóna h magasságára

$$h = \sqrt[3]{\frac{3(1 - \varepsilon_D)r^2 d}{\varepsilon_D} + \sqrt{\frac{9(1 - \varepsilon_D)^2 r^4 d^2}{\varepsilon_D^2} + r^6}} + \sqrt[3]{\frac{3(1 - \varepsilon_D)r^2 d}{\varepsilon_D} - \sqrt{\frac{9(1 - \varepsilon_D)^2 r^4 d^2}{\varepsilon_D^2} + r^6}} \quad (5.2)$$

adódik, amely normálás után az alábbi alakot ölti:

$$\frac{h}{r} = \sqrt[3]{\frac{3(1 - \varepsilon_D)}{\varepsilon_D} \frac{d}{r} + \sqrt{\left(\frac{3(1 - \varepsilon_D)}{\varepsilon_D} \frac{d}{r}\right)^2 + 1}} + \sqrt[3]{\frac{3(1 - \varepsilon_D)}{\varepsilon_D} \frac{d}{r} - \sqrt{\left(\frac{3(1 - \varepsilon_D)}{\varepsilon_D} \frac{d}{r}\right)^2 + 1}}. \quad (5.3)$$

Ez utóbbi egyenlet az $\varepsilon_D = 1 - D\rho_{rel}$ felhasználásával tovább alakítható:

$$\frac{h}{r} = \sqrt[3]{\frac{3D\rho_{rel}}{(1-D\rho_{rel})} \frac{d}{r} + \sqrt{\left(\frac{3D\rho_{rel}}{(1-D\rho_{rel})} \frac{d}{r}\right)^2 + 1}} + \sqrt[3]{\frac{3D\rho_{rel}}{(1-D\rho_{rel})} \frac{d}{r} - \sqrt{\left(\frac{3D\rho_{rel}}{(1-D\rho_{rel})} \frac{d}{r}\right)^2 + 1}}. \quad (5.4)$$

A deformációs zóna normált magasságára kapott összefüggés így a következő három mérhető paraméter függvényévé alakult: a ρ_{rel} relatív sűrűség, a D konstans továbbá a d benyomódási mélység és a benyomófej r sugarának hányadosa.

Mivel a kis relatív sűrűségű fémhabok képlékeny Poisson száma gyakorlatilag nulla [16], ezért benyomódás során a benyomófej alatti deformációs zóna szélessége kis relatív sűrűségű fémhaboknál nem lehet nagyobb, mint a benyomófej átmérője. Emiatt az (5.3) egyenlet kis relatív sűrűségű fémhabokra csak

$$h \leq r, \quad (5.5)$$

azaz

$$\frac{d}{r} \leq \frac{2\varepsilon_D}{3(1-\varepsilon_D)} \quad (5.6)$$

esetén lehet érvényes. A relatív sűrűség növekedtével nő a képlékeny Poisson szám is, így nagyobb relatív sűrűségű habokra az (5.5) egyenlőtlenség a következőképpen módosítható:

$$h \leq Cr, \quad (5.7)$$

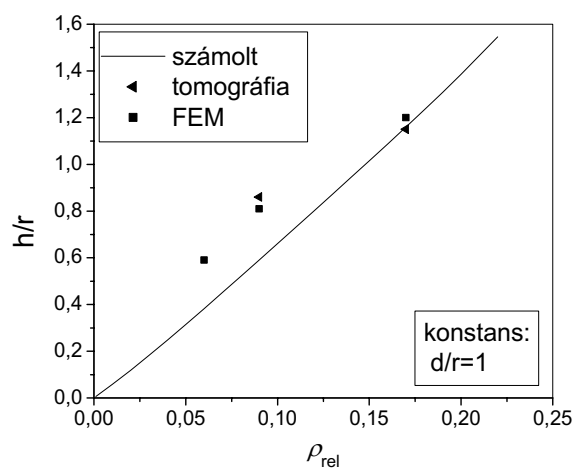
azaz

$$\frac{d}{r} \leq \frac{\varepsilon_D C(C^2 + 3)}{6(1-\varepsilon_D)}, \quad (5.8)$$

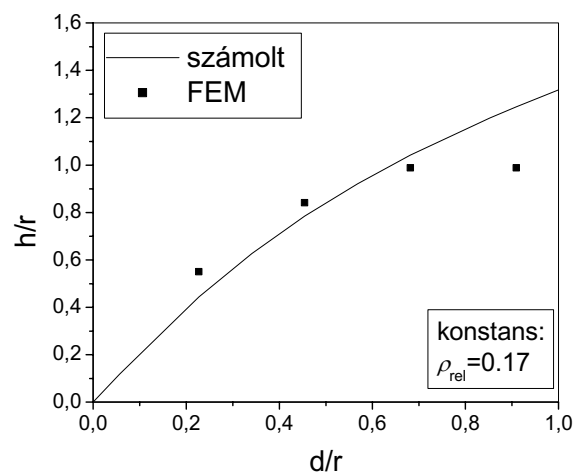
ahol C konstans ($C \geq 1$), amely függ a képlékeny Poisson számtól. Az általunk vizsgált fémhabokra $C = 1$ -et feltételezve a benyomófej sugarával normált benyomódási mélység 1,3-nél nem lehet nagyobb.

Az 57. ábra a végeelem szimulációkból és a tomográf felvételekből meghatározott normált zónaméretet, és az (5.4) egyenletnek megfelelő görbét mutatja (konstans d/r , valamint konstans ρ_{rel} mellett). Az egyenletből számított h/r értékek meghatározásához az $\varepsilon_D(\rho_{rel})$ függvényre illesztett egyenes meredekségéből kapott $D \approx 2$ értéket használtuk, míg a végeelem szimulációknál h meghatározásánál azt a területet vettük figyelembe, amelynek elmozdulása 1 mm-nél nagyobb volt. Mivel a minta 25 mm magas volt, így h meghatározásának bizonytalansága csak az átlagos cellaméret öt százaléka.

Az 57. (b) ábrán látható, hogy benyomófej sugarához képest kis benyomódási mélységek esetén az (5.4) összefüggésből számított h/r értékek közel megegyeznek a végelem szimulációkból meghatározott normált magasságértékekkel. Nagyobb benyomódási mélység esetén a végelem szimuláció által számított deformációs zónák mérete kisebb, mint az (5.4) egyenlet által jósolt értékek. Az eltérés annak tudható be, hogy a szimulációkban a benyomófej élénél végbemenő cellaél- és cellafal-töréseket nem vettük figyelembe.



(a)



(b)

57. ábra. A deformációs zóna normált mérete (a) a relatív sűrűség és (b) a normált benyomódási mélység függvényében

5.3. Az 5. fejezet eredményei

Különböző relatív sűrűségű Alporas habok benyomódási tulajdonságait vizsgáltuk röntgentomográfiával és végeelem szimulációval. Mindkét módszer azt mutatta, hogy a deformáció a benyomófej alatti térfogatban a cellák összeroppanással, a deformációs zóna határfelületén többnyire a cellafalak kihajlásával megy végbe, míg a deformációs zónától egy cellaátmérőnél távolabb lévő cellák nem szenvednek maradó alakváltozást.

A benyomódás során a keletkezett deformációs zóna alakja a tomográf képek alapján gömbszelettel közelíthető, amelynek mérete a végeelem szimulációk tanúsága szerint függ a benyomófej sugarától, a benyomódási mélységtől és a hab relatív sűrűségétől, mely kapcsolat egyszerű analitikus kifejezés segítségével jól leírható.

6. Összefoglalás

Régóta ismert, hogy a természetben fellelhető nagy fajlagos merevségű, nagy szilárdságú, jó energiaelnyelő-képességgel rendelkező anyagok, mint például a fa, a szivacs vagy az emberi csont, celluláris szerkezetűek. Az utóbbi néhány évben megnőtt az érdeklődés a hasonló tulajdonságokkal rendelkező mesterségesen előállítható anyagok iránt. Ilyen anyagok a fémhabok is, amelyek mellett, hogy jó energiaelnyelők és nagy a fajlagos szilárdságuk – a műanyaghabokkal ellentétben – több száz fokok hőmérsékleten is stabilak. A fémhabokat ennek következtében leggyakrabban ütközésienergia-elnyelőként valamint könnyű szerkezeti elemként alkalmazzák.

Az előbb említett alkalmazásoknál fontos a fémhab mechanikai tulajdonságainak és az igénybevétel során fellépő deformációs mechanizmusoknak az ismerete. Bár számos kísérleti munka foglalkozik ezek meghatározásával, sok alapvető kérdés (például a hab szerkezete és a mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolat) még mindig nem tisztázott.

A dolgozatban fémhabok mechanikai tulajdonságait vizsgáltuk összenyomás és benyomódás során. Először egy fontos szerkezeti paraméter, a cellaméret-eloszlás hatását vizsgáltuk a platófeszültségre összenyomás során. Kidolgoztunk egy olyan hab-modellt, amellyel a platófeszültség – és ezáltal az energiaelnyelő-képesség is – megadható a cellaméret-eloszlás ismeretében, nyitott cellás esetben egy, zárt cellás esetben két illesztési paraméter segítségével. Egyszerű cellaméret-eloszlást feltételezve az illesztendő feszültség-függvény analitikus, így a fémhab platófeszültségének más szerkezeti paramétereiktől való függése is egyszerűen vizsgálható.

Ezután a fémhabok összenyomás és benyomódás során fellépő deformációs mechanizmusait vizsgáltuk akusztikus emisszióval. Megmutattuk, hogy az akusztikus emisszió alkalmas a fémhabok deformációs mechanizmusainak azonosítására.

Végezetül a fémhab benyomódási deformációját követtük nyomon végeelem szimuláció segítségével. Megmutattuk, hogy az eredeti szerkezetet figyelembe vevő tengelyszimmetrikus, kvázi háromdimenziós végeelem modell már alkalmas bizonyos deformációs paraméterek, mint például a benyomódáskor keletkezett deformációs zóna méretének vizsgálatára. A végeelem modell segítségével igazoltuk a deformációs zóna méretére adott becslést.

A témához kapcsolódó saját publikációk

- [S1] CS. KÁDÁR, P. KENESEI, E. MAIRE, G. PEIX, ZS. RAJKOVITS, J. LENDVAI: The influence of cell-size distribution on the plateau stress in open-cell metal foams using X-ray tomography, *Cellular Metals: Manufacture, Properties, Applications, International Conference on cellular Metals and Metal Foaming Technology*, 23rd-25th June 2003, Berlin, Germany, Eds. J. Bahnhart, N. A. Fleck and A. Mortensen, *Verlag MIT Publ.*, Berlin, Germany (2003) 313-318
- [S2] P. KENESEI, CS. KÁDÁR, J. LENDVAI, ZS. RAJKOVITS: The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams, *Scripta Mater.*, **50** (2004) 295-300
- [S3] CS. KÁDÁR, P. KENESEI, J. LENDVAI AND ZS. RAJKOVITS: Energy absorption properties of metal foams, *Materials World* (2005)
- [S4] CS. KÁDÁR, F. CHMELÍK, J. LENDVAI, ZS. RAJKOVITS: Acoustic emission measurements on metal foams, *J. Alloy Compd.*, **378/1-2** (2004) 145-150
- [S5] CS. KÁDÁR, E. MAIRE, A. BORBÉLY, G. PEIX, J. LENDVAI, ZS. RAJKOVITS: X-ray tomography and finite element simulation investigations of the indentation behavior of metal foams, *Mat. Sci. Eng.* **A387-389** (2004) 321-325

Irodalomjegyzék

- [1] H. P. DEGISCHER, B. KRISZT (Eds.): "Handbook of Cellular Metals: Production, Processing Applications", *Wiley-VCH*, Weinheim, Germany (2002)
- [2] J. BANHART, *JOM*, **52** (2000) 22-27
- [3] J. DAVIES, SHU ZHEN, *J. Mat. Sci.*, **18** (1983) 1899-1911
- [4] M. F. ASHBY, A. G. EVANS, J. W. HUTCHINSON, N. A. FLECK: "Metal Foams: A Design Guide", *Butterworth-Heinemann*, Boston (2000)
- [5] Y. Y. ZHAO, D. X. SUN, *Scripta mater.*, **44** (2001) 105-110
- [6] J. BANHART (Ed.): "Metal Foams and Porous Structures – International Conference on Metal Foam and Porous Structures, 14th - 16th June 1999, Bremen", *Verlag MIT Publ.*, Bremen (1999)
- [7] J. BANHART (Ed.): "Cellular Metals and Metal Foaming Technology – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 18th - 20th June 2001, Bremen", *Verlag MIT Publ.*, Bremen (2001)
- [8] L. J. CLARK, K. M. HURYSZ, K. J. LEE, J. K. COCHRAN, T. H. SANDERS, In: "Metal Foams and Porous Structures – International Conference on Metal Foam and Porous Structures, 14th - 16th June 1999, Bremen" Ed.: J. Banhart, *Verlag MIT Publ.*, Bremen (1999) 171-178
- [9] F. W. BACH, H. HAFERKAMP, N. NIEMEYER, D. BORMANN, In: "Cellular Metals and Metal Foaming Technology – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 18th - 20th June 2001, Bremen" Ed.: J. Banhart, *Verlag MIT Publ.*, Bremen (2001) 175-180
- [10] S. K. HYUN, H. NAKAJIMA, In: "Cellular Metals and Metal Foaming Technology – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 18th - 20th June 2001, Bremen" Ed.: J. Banhart, *Verlag MIT Publ.*, Bremen (2001) 181-186

-
- [11] M. BRAM, C. STILLER, H. BUCHKREMER, D. STÖVER, H. BAUER, In: "Metal Foams and Porous Structures – International Conference on Metal Foam and Porous Structures, 14th - 16th June 1999, Bremen" Ed.: J. Banhart, *Verlag MIT Publ.*, Bremen (1999) 197-202
- [12] K. E. GEYER, In: "Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23th - 25th June 2003, Berlin" Eds.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen, *Verlag MIT Publ.*, Berlin (2003) 25-30
- [13] H. W. SEELIGER, In: "Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23th - 25th June 2003, Berlin" Eds.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen, *Verlag MIT Publ.*, Berlin (2003) 5-12
- [14] J. JERY, F. SIMANČIK, M. BORTEL, S. KUBO, J. KOVAČIK, In: "Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23th - 25th June 2003, Berlin" Eds.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen, *Verlag MIT Publ.*, Berlin (2003) 43-46
- [15] T. MIYOSHI, M. ITOH, S. AKIYAMA, A. KITAHARA, *Advanced Engineering Materials*, **2** (2000) 179-183
- [16] L. J. GIBSON, M. F. ASHBY: "Cellular Solids: Structure & Properties", *Pergamon Press*, Oxford (1988)
- [17] L. J. GIBSON, *MRS Bulletin*, **4** (2003) 270-271
- [18] A. P. ROBERTS, E. J. GARBOCZI, *J. Mech. Phys. Solids*, **50** (2002) 33-55
- [19] A. P. ROBERTS, E. J. GARBOCZI, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **458** (2002) 1033-1054
- [20] A. E SIMONE, L. J. GIBSON, *Acta mater.*, **46** (1998) 3109-3123
- [21] A. E SIMONE, L. J. GIBSON, *Acta mater.*, **46** (1998) 3929-3935
- [22] A. E SIMONE, L. J. GIBSON, *Acta mater.*, **46** (1998) 2139-2150
- [23] T. G. NIEH, K. HIGASHI, J. WADSWORTH, *Mat. Sci. Eng.*, **A283** (2000) 105-110
- [24] A. FAZEKAS, R. DENDIEVEL, L. SALVO, Y. BRÉCHET, *Int. J. Mech. Sci.*, **44** (2002) 2047-2066
- [25] D. LEHMUS, J. BANHART, *Mat. Sci. Eng.*, **A349** (2003) 98-110

-
- [26] J. BANHART, *Progress in Material Science*, **46** (2001) 559-632
- [27] P. KENESEI, Diplomamunka, *Eötvös Loránd Tudományegyetem* (2000)
- [28] Y. SUGIMURA, J. MEYER, M. Y. HE, H. BART-SMITH, J. GRENSTEDT, A. G. EVANS, *Acta mater.*, **12** (1997) 5245-5259
- [29] E. MAIRE, A. ELMOUTAOUKKIL, A. FAZEKAS, L. SALVO, *MRS Bulletin*, **4** (2003) 284-289
- [30] U. RAMAMURTY, A. PAUL, *Acta mater.*, **52** (2004)
- [31] F. SIMANČIK, J. JERZ, J. KOVÁČIK, P. MINÁR, *Kovové mater.*, **35** (1997) 265-277
- [32] F. SIMANČIK, J. KOVÁČIK, F. SCHÖRGHUBER, In: "Proceedings of Symposium Metallschäume, Bremen, 6-7.03.1997" Ed.: J. Banhart, *MIT Verlag*, Bremen (1997) 171-176
- [33] K. Z. G. MCCULLOGH, N. A. FLECK, M. F. ASHBY, *Acta mater.*, **47** (1999) 2323-2330
- [34] D. WEAIRE, M. A. FORTES, *Advances in Physics*, **43** (1994) 685-738
- [35] A-F. BASTAWROS, H. BART-SMITH, A. G. EVANS, *J. Mech. Phys. Solids*, **48** (2000) 301-322
- [36] J. BANHART, J. BAUMEISTER, *J. Mat. Sci.*, **33** (1998) 1431-1440
- [37] O. B. OLURIN, N. A. FLECK, M. F. ASHBY, *Scripta mater.*, **43** (2000) 983-989
- [38] P. R. ONCK, E. W. ANDREWS, L. J. GIBSON, *Int. J. Mech. Sci.*, **43** (2001) 681-699
- [39] E. W. ANDREWS, G. GIOUX, P. R. ONCK, L. J. GIBSON, *Int. J. Mech. Sci.*, **43** (2001) 701-703
- [40] P. R. ONCK, *MRS Bulletin*, **4** (2003) 279-283
- [41] J. BARUCHEL, J.-Y. BUFFIÈRE, E. MAIRE, P. MERLE, G. PEIX (Eds.): "X-Ray Tomography in Material Science", *Hermes Science Publications*, Paris (2000)
- [42] L. SALVO, P. CLOETENS, E. MAIRE, S. ZABLER, J. J. BLANDIN, J.-Y. BUFFIÈRE, W. LUDWIG, E. BOLLER, D. BELLET, C. JOSSEROND, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*, **200** (2003) 273-286

-
- [43] T. DILLARD, F. N'GUYEN, S. FOREST, Y. BIENVENU, J.-D. BARTOUT, L. SALVO, R. DENDIEVEL, E. MAIRE, P. CLOETENS, C. LANTUÉJOUL, In: "Cellular Metals Manufacture, Properties, Applications – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 23th - 25th June 2003, Berlin" Eds.: J. Banhart, N. A. Fleck, A. Mortensen, *Verlag MIT Publ.*, Berlin (2003) 301-306
- [44] PELLIONISZ P. (szerk.): "Akusztikus emissziós anyag- és szerkezetvizsgálatok", *GTE*, Budapest (1992)
- [45] C. R. HEIPLE, S. H. CARPENTER, *J. Acoustic. Emission*, **6** (1987) 177-237
- [46] PELLIONISZ P., *Anyagvizsgálók lapja*, **2** (1991) 47-50
- [47] R. BAUMGÄRTNER, H. KRUSCHEK, H. J. SCHWALBE, K. NIJHOF, In: "Cellular Metals and Metal Foaming Technology – International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology, 18th - 20th June 2001, Bremen" Ed.: J. Banhart, *Verlag MIT Publ.*, Bremen (2001) 283-288
- [48] K. MÁTHIS, Doktori értekezés, *Eötvös Loránd Tudományegyetem* (2004)
- [49] Y. W. KWON, R. E. COOKE, C. PARK, *Mat. Sci Eng.*, **A343** (2003) 63-70
- [50] H. X. ZHU, J. F. KNOTT, N. J. MILLS, *J. Mech. Phys. Solids*, **45** (1997) 319-343
- [51] C. CHEN, T. J. LU, N. A. FLECK, *J. Mech. Phys. Solids*, **47** (1999) 2235-2272
- [52] C. CHEN, T. J. LU, N. A. FLECK, *Int. J. Mech. Sci.*, **43** (2001) 487-504
- [53] M. J. SILVA, L. J. GIBSON, *Int. J. Mech. Sci.*, **39** (1997) 549-563
- [54] H. X. YHU, J. R. HOBDELL, A. H. WINDLE, *Acta mater.*, **48** (2000) 4893-4900
- [55] A. P. ROBERTS, E. J. GARBOCZI, *Acta mater.*, **49** (2001) 189-197
- [56] T. DAXNER, H. J. BÖHM, F. G. RAMMERSTORFER, In: "Metal Foams and Porous Structures – International Conference on Metal Foam and Porous Structures, 14th - 16th June 1999, Bremen" Ed.: J. Banhart, *Verlag MIT Publ.*, Bremen (1999) 283-288
- [57] T. DILLARD, PhD. Thesis, *Ecole National Supérieure des Mines de Paris* (2004)
- [58] D. ULRICH, B. VAN RIETBERGER, H. WEINANS, P. RÜEGSEGGER, *J. Biomechanics*, **31** (1998) 1187-1192
- [59] S. YOUSSEF, E. MAIRE, R. GAERTNER, *Acta mater.*, **53** (2005) 719-730

-
- [60] E. MAIRE, A. FAZEKAS, L. SALVO, R. DENDIEVEL, S. YOUSEFF, P. CLOETENS, M. LETANG, *Composites Sci. Tech.*, **63** (2003) 2431-2443
- [61] L. J. GIBSON, M. F. ASHBY, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **382** (1982) 43-59
- [62] <http://web.telecom.cz/dakel>
- [63] V. DESHPANDE, N. A. FLECK, *Int. J. Impact Eng.*, **24** (2000) 277-298
- [64] R. E. MILLER, *Int. J. Mech. Sci.*, **42** (2000) 729-754
- [65] P. R. ONCK, *MRS Bulletin*, **4** (2003) 279-283
- [66] MSC.Marc User's Guide
- [67] M.H. LEITE, F. FERLAND, *Eng. Geology*, **59** (2001) 267-280
- [68] A. AXT, K. BUCHTA, Imageprocessor - Kétdimenziós szerkezetkiértékelő program
- [69] P. S. KUMAR, S. RAMACHANDRA, U. RAMAMURTY, *Mater. Sci. Eng* **A347** (2003) 330-337
- [70] G. CSEH, Doktori értekezés, *Eötvös Loránd Tudományegyetem* (2000)

Köszönetnyilvánítás

Elsőként szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Lendvai Jánosnak és Rajkovits Zsuzsannának segítségükért, tanácsaikért és azért, hogy a felmerülő ötleteimre, kérdéseimre, problémáimra mindig tudtak időt szakítani.

Köszönettel tartozom még együttműködő partnereinknek, a prágai Károly egyetem munkatársának, František Chmelíknek, az INSA de Lyon munkatársainak Eric Maire-nek és Gilles Peix-nek, és kollegáimnak Kenesei Péternek, Vörös Györgynek és Borbély Andrásnak a munkám során nyújtott diszkussziókért, segítségért.

Végül szeretném megköszönni az ELTE Anyagfizikai Tanszék munkatársainak és doktoranduszainak, hogy kérdéseimmel, kéréseimmel bármikor fordulhattam hozzájuk.

Magyar nyelvű összefoglaló – új tudományos eredmények

1. Fémhabok platófeszültség-változásának modellje

Kockaváz szerkezetű, különböző méretű cellákból álló habmodellt konstruáltam, melynek segítségével megadható adott cellaméret-eloszlású hab összenyomási platófeszültsége a deformáció függvényében. A modell segítségével egyenletes, vagy más egyszerű, folytonos cellaméret-eloszlást feltételezve a platófeszültség a deformáció analitikus függvényeként fejezhető ki; mért cellaméret-eloszlás esetén a feszültség-deformáció görbe numerikusan számítható. A kapott $\sigma - \varepsilon$ összefüggések nyitott cellás esetben egy, zárt cellás esetben lényegében két illesztési paramétert tartalmaznak.

Az eddigi modellekkel szemben, ahol a platófeszültséget konstans értékkel közelítették, ezzel a modellel a mért (röntgentomográfiával meghatározott) cellaeloszlást alkalmazva a platófeszültség akár 50%-os deformációig is leírható.

2. Fémhabok deformációs folyamatainak akusztikus emissziós vizsgálata

Alumínium alapú fémhabok összenyomás és benyomódás során fellépő deformációs folyamatait akusztikus emisszió mérésével vizsgáltam.

- Megmutattam, hogy a benyomódás során mért akusztikus emisszió aktivitás alkalmas a fémhab deformációs folyamatainak vizsgálatára.
- A mérés során a felfutási idő szerint két fajta AE jelalakot különböztettem meg, amely alapvetően két különböző deformációs mechanizmusra utal: egyfelől törésre, illetve repedések terjedésére, másfelől képlékeny folyásra.
- Kimutattam összenyomás és benyomódás közben a képlékeny deformáció megjelenését már az első, kvázi-lineáris szakaszban is.

3. Benyomódási tulajdonságok vizsgálata

Alporas habok benyomódási tulajdonságait röntgentomográfiával és végeselem szimulációval vizsgáltam.

- Megmutattam, hogy az eredeti szerkezetet figyelembe vevő, kvázi-háromdimenziós, tengelyszimmetrikus modell alkalmas a fémhabok benyomódási tulajdonságainak vizsgálatára.
- Megállapítottam, hogy a benyomódás során keletkezett deformációs zóna alakja gömbszelettel közelíthető, amelynek mérete függ a benyomófej sugarától, a benyomódási mélységtől és a hab relatív sűrűségétől.

Summary – new scientific results

1) Model for the changes in the plateau stress of metal foams

A foam model comprising cells of different size with a cubic array of members was developed. The compressive stress-strain curve of a metal foam with a given cell-size distribution can be calculated in the plateau regime by the help of this model. Supposing a uniform or some other simple cell-size distribution, by means of the model the plateau stress can be expressed as an analytical function of the strain. In more complicated cases, using the measured cell-size distribution the stress-strain curve can be calculated numerically. The stress-strain relations contain in case of open-cell foams only one, while for closed-cell foams practically two fitting parameters.

In contrast to earlier models, where the plateau stress was assumed to be constant, this model can predict the changes in the plateau stress up to 50% deformation using the measured cell-size distribution.

2) Investigation of the deformation processes with acoustic emission in metal foams

The deformation processes of aluminium foams were investigated during compression and indentation by detecting the acoustic emission (AE).

- It was shown that AE measurement is a suitable method to distinguish between the mechanisms of deformation.
- During the deformation of the metal foams two types of AE signals could be distinguished according to the rising time of the amplitude of the AE signal. It indicates basically two different modes of deformation: fracture and plastic yield.
- It was shown that plastic yield is present both during compression and indentation even in the first, quasi linear stage.

3) The investigation of the indentation properties

The deformation processes of Alporas foams during indentation were investigated with X-ray tomography and finite element simulations.

- It was shown that taking into account the real cell-structure of the foam, an axisymmetric, quasi three-dimensional finite element model is suitable to examine some indentation parameters.
- It was shown that the shape of the deformation zone can be approximated with a spherical cap. The size of this spherical cap depends on the radius of the indenter, the indentation depth, and the relative density of the foam.