KAPTAY GYÖRGY

Határfelületi jelenségek a fémesanyaggyártásban. 6. rész A határfelületi kapilláris erő

A cikksorozat 6. részében a Szerző levezeti a határfelületi kapilláris erő képletét. A képletet először folyadékok porózus szilárd testekbe való penetrációjának/infiltrációjának leírására használja, ami az öntészetben, illetve a fémmátrixú kompozitok és szintaktikus fémhabok gyártásában fontos. Ezután a képletet a gáz/folyadék határfelületen elhelyezkedő, illetve azon áthatoló szilárd szemcse esetére alkalmazza, ami a lézersugaras kompozit gyártásban, illetve a fémhabok és fémemulziók stabilizációjában játszik döntő szerepet.

1. Bevezetés

A cikksorozat első részében [1] megadtuk a határfelületi erők fogalmát és összesen nyolc határfelületi erő típust definiáltunk, melyek mind a természetben, mind a kohászatban (azaz a fémesanyaggyártó technológiákban) fellépnek. A cikksorozat második részében a határfelületi összehúzó erőről és a fúvókákról leszakadó, illetve folyadékokban emelkedő buborékok méretéről volt szó [2]. A cikksorozat harmadik részében a görbület indukálta határfelületi erőt, és az innen származtatható Laplace-nyomást tárgyaltuk, különös tekintettel az innen származtatott Kelvin-egyenletre és annak furcsa kapcsolatára Gibbs termodinamikájával [3]. A cikksorozat negyedik részében a határfelületi gradiens erőt tárgyaltuk, ami képes diszpergált fázisokat (cseppeket, buborékokat) mozgatni a folyékony mátrixban lévő hőmérséklet- és/vagy koncentráció-gradiens hatására [4]. A cikksorozat ötödik részében a határfelületi szétterítő erőt (vagy más néven Marangoni-erőt) tárgyaltuk, ami történelmileg egymással nem elegyedő folyadékok (olaj-víz vagy salakolvadék-fémolvadék) egymáson való szétterülését jelentette, de újabban beleértjük a felületi hőmérséklet- vagy koncentráció-gradiens által indukált erőt is, ami a folyadék/gáz határfelülettel párhuzamos felületi áramlást indít el [5]. Az ötödik részben külön kitértünk a határfelületi gradiens erő és a határfelületi szétterítő erő ellentmondásos kapcsolatára.

A cikksorozat jelenlegi, hatodik részében átmenetileg visszalépünk az időben és újra *Young* [6] és *Laplace* [7] munkáiból eredeztetjük mondanivalónkat. Először levezetjük a határfelületi kapilláris erő általános egyenletét, majd konkrét egyenleteket vezetünk le a porózus szilárd testekbe hatoló folyadékok és a folyadékok felületén lévő szilárd szemcsék esetére. Mindkét esetben példákkal illusztráljuk a határfelületi kapilláris erő és a fémesanyaggyártás kapcsolatát, főleg magyar kutatóknak az elmúlt évtized során folyóiratokban publikált eredményeire koncentrálva.

2. A határfelületi kapilláris erő általános képletének levezetése [8-9]

Mint ahogy azt a cikksorozat első részében megmutattuk, az α fázisra x irányban ható határfelületi erő *($F_{\alpha,x}$,* N) általános képlete:

$$F_{\alpha,x} = -\sum_{i,j} A_{ij}(x)\cdot\frac{d\sigma_{ij}(x)}{dx} - \sum_{i,j}\sigma_{ij}(x)\cdot\frac{dA_{ij}(x)}{dx} \qquad (1a)$$

ahol *i* és *j* a különböző fázisok, melyek között különböző *ij* határfelületek lehetnek jelen a rendszerben, míg A_{ij} a határfelületek alapterületei (m^2), σ_{ij} pedig ezen határfelületek határfelületi energiái (J/m^2). A cikksorozat ezen részében az *1. ábrán* bemutatott háromfázisú rendszert vizsgáljuk. Az ábrán egy tetszőleges alakú α fázis helyezkedik el két másik fázis (β és γ) határfelületén, és mi az α fázisra, a β / γ határfelületre merőleges irányban, a β fázis belseje felé ható erőt fogjuk vizsgálni. Ezt az erőt nevezzük „határfelületi kapilláris erőnek". Jele $F^{kap}_{\alpha/\beta\gamma}$, mértékegysége N. Mint az 1. ábrán látszik, ebben az esetben három határfelület van jelen. Konstansnak véve a határfelületi energia értékeit, az (1a) egyenlet esetünkben a következő konkrét alakot ölti:

Kaptay György *(www.kaptay.hu) okleveles kohómérnök (1984), egyetemi tanár (1999), az MTA doktora (2005), a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. miskolci székhelyű BAY-LOGI intézetében lévő Nanoanyagok osztály vezetője és a Miskolci Egyetem egyetemi tanára, a Kihelyezett Nanotechnológiai Tanszék vezetője.*

$$F_{\alpha/\beta\gamma}^{kap} = -\sigma_{\alpha\beta} \cdot \frac{dA_{\alpha\beta}(x)}{dx} - \sigma_{\alpha\gamma} \cdot \frac{dA_{\alpha\gamma}(x)}{dx} - \sigma_{\beta\gamma} \cdot \frac{dA_{\beta\gamma}(x)}{dx} \quad (1b)$$

Az α fázist tekintsük merev testnek, ami nem változtatja meg se a méretét, se az alakját, miközben az x vektor mentén a γ fázisból fokozatosan a β fázisba hatol. Ezért az α fázis teljes felületét (A_{α}, m^2) konstansnak tekintjük. A határfelületen való áthatolás során ez a felület kétfajta, x-függő határfelület között oszlik meg (lásd 1. ábra):

$$A_{\alpha} = A_{\alpha\gamma}(x) + A_{\alpha\beta}(x) \quad (1c)$$

Most írjuk fel a β / γ határfelület nagyságát az α fázis által meg nem zavart kiindulási határfelület ($A^0_{\beta\gamma}$, m^2) és az α fázis által kitakart, x-függő határfelület ($\Delta A_{\beta\gamma}(x)$, m^2) különbségeként (lásd 1. ábra).

$$A_{\beta\gamma}(x) = A^{o}_{\beta\gamma} - \Delta A_{\beta\gamma}(x) \quad (1d)$$

Helyettesítsük az (1c-d) egyenleteket az (1b) egyenletbe, végezzük el a deriválásokat és összevonásokat, aminek következtében a következő egyenlethez jutunk:

$$F_{\alpha/\beta\gamma}^{kap} = \left(\sigma_{\alpha\gamma} - \sigma_{\alpha\beta}\right) \cdot \frac{dA_{\alpha\beta}(x)}{dx} + \sigma_{\beta\gamma} \cdot \frac{d\Delta A_{\beta\gamma}(x)}{dx} \quad (1e)$$

Az (1e) egyenlet az α fázisra x irányban (lásd 1. ábra) ható határfelületi kapilláris erő legáltalánosabb képlete. A határfelületi kapilláris erő definíció szerint merőlegesen hat a β / γ határfelületre. Ha az erő értéke pozitív, akkor az erő az α fázist a β fázis felé húzza, az 1. ábrán látható x vektor mentén. Ha az erő értéke negatív, akkor az erő az α fázist a γ fázis felé tolja, az 1. ábrán látható x vektorral szemben.

A határfelületi erőt a leggyakrabban az α = szilárd (s), β = folyadék (f) és γ = gőz/gáz (g) fáziskombinációkra használjuk. Ebben az esetben az (1e) egyenlet a következőképpen módosul:

$$F_{s/fg}^{kap} = \sigma_{fg} \cdot \left[\frac{d\Delta A_{fg}(x)}{dx} + \frac{dA_{sf}(x)}{dx} \cdot \cos\Theta \right] \quad (1f)$$

ahol Θ a folyadék peremszöge a szilárd szemcsén gáz/gőz közegben. Az (1f) egyenlet levezetésénél figyelembe vettük a Young-egyenletet (lásd [6] és (7) egyenlet [2]).

Mielőtt továbbmegyünk, le kell szögeznünk, hogy a határfelületi kapilláris erő a háromfázisú vonalra (lásd 1. ábra) merőlegesen hat, x irányban. Az, hogy ez az erő melyik fázist mozdítja meg, attól függ, hogy melyik van mechanikailag stabilabb állapotban, illetve, hogy melyiknek nagyobb a tehetetlensége. Ha az 1. ábrának megfelelően egy kis szilárd szemcse lebeg szabadon egy nagy folyadék/gáz határfelületen, akkor a határfelületi kapilláris erő a szilárd szemcsét fogja le-fel mozgatni. Ha azonban a szemcsét (kapillárist) mechanikailag fixáljuk (lásd *2. ábra*), akkor a határfelületi kapilláris erő a körülötte lévő folyadékot fogja le-fel mozgatni.

3. Folyadékok viselkedése kapillárisban

Először alkalmazzuk az (1f) egyenletet arra a legegyszerűbb esetre, ahonnan a határfelületi kapilláris erő a nevét kapta. Vizsgáljunk egy hengeres, *R* belső sugarú, mechanikailag stabil függőleges kapillárist merőlegesen egy folyadékba merítve, aminek belsejében x magasságba emelkedett a folyadék a makroszkopikus folyadékszinthez képest (2. ábra). Használjuk az (1f) egyenletet a határfelületi kapilláris erő képletének levezetéséhez. A 2. ábra geometriájával összhangban a következő képletek írhatóak fel:

$$A_{sf}(x) = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot x \quad (2a)$$

$$\Delta A_{fg}(x) = konst \neq f(x) \quad (2b)$$

Végezzük el a (2a-b) képletek x szerinti deriválását, és az eredményeket helyettesítsük be az (1f) egyenletbe. Átrendezés után kapjuk a hengeres kapillárisban lévő folyadékra ható határfelületi kapilláris erő képletét:

$$F_{s/fg}^{kap} = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot \sigma_{fg} \cdot \cos\Theta \quad (2c)$$

A (2c) egyenlet analóg az ún. Young–Laplace-egyenlettel, ami több mint 200 éve ismert [7]. Itt azért mutattuk be részletes levezetését, hogy ezzel is igazoljuk a határfelületi erők (1a) általános egyenletének érvényességét, hiszen a (2c) egyenlet is innen lett levezetve.

A határfelületi kapilláris erő a kapillárisba húzza a folyadékot, ha az erő értéke pozitív, tehát ha a folyadék nedvesíti a kapilláris belső falát (Θ < 90°). Ugyanez az erő a folyadékot kitolja a kapillárisból, ha értéke negatív, azaz ha a folyadék nem nedvesíti a kapilláris belső falát (Θ > 90°). Innen következik a „spontán penetrációhoz (infiltrációhoz / behatoláshoz) tartozó küszöb peremszög” értéke, ami esetünkben: $\Theta_{küszöb}$ = 90°.

Ugyan a (2c) egyenlettel leírt erő nem a felületre merőlegesen, hanem a háromfázisú vonalra merőlegesen hat, az erő ennek ellenére formálisan átosztható a kapilláris belső keresztmetszetének alapterületével, és így a határfelületi kapilláris nyomás képletét kapjuk:

$$p_{s/fg}^{kap} = \frac{2}{R} \cdot \sigma_{fg} \cos\Theta \quad (2d)$$

Mint a (2d) egyenletből következik, a folyadékot a kapillárisba húzó (vagy azt onnan kilökő) nyomás fordítottan arányos a kapilláris sugarával. Fémolvadékok esetében a következő jellemző nagyságrendeket kapjuk a kapilláris nyomásra (adott *R* érték mellett): 1 Pa (*R* = 1 m), 1 kPa (*R* = 1 mm), 10 bar (*R* = 1 μm), 10 kbar (R = 1 nm). Utóbbi érték feltehetőleg távol van a valóságtól, hiszen a (2d) egyenlet levezetésekor nem vettük figyelembe a kapilláris fala szembenéző oldalainak kölcsönhatását, ami 2 nm távolságban már nem hanyagolható el.

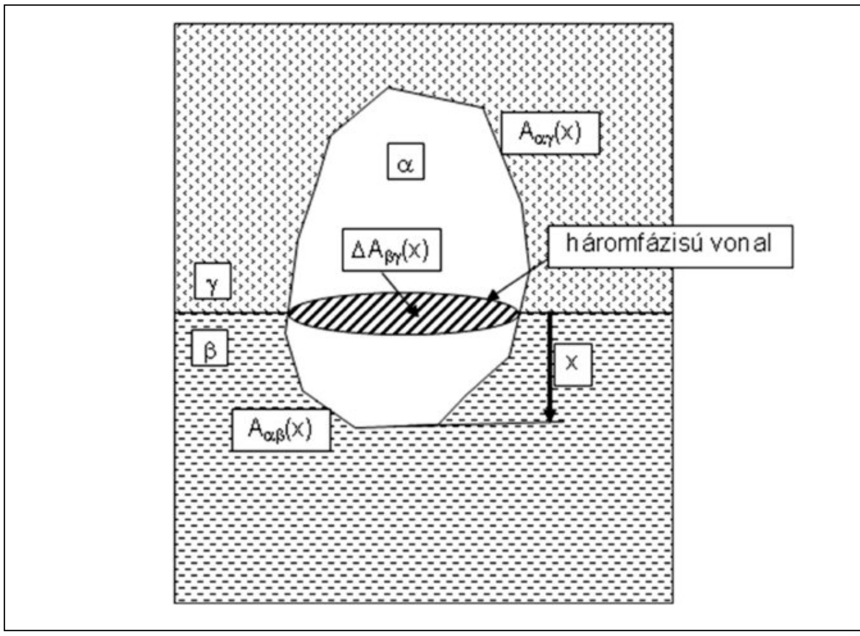
A (2d) egyenlet előnye az, hogy segítségével a határfelületi kapilláris nyomás könnyen összehasonlíthatóvá, illetve vektoriálisan összegezhetővé válik egyéb eredetű, a fémesanyaggyártás körülményei között fellépő nyomásokkal. Ezért a (2d) egyenlet a fémöntészetben gyakran fellépő penetráció elméleti vizsgálatának egyik alapegyenlete [10-11]. Ha a penetrációt nem elkerülni, hanem elősegíteni akarjuk, azt jellemzően infiltrációnak nevezzük, ami a fémmátrixú kompozitok és szintaktikus fémhabok egyik hatékony gyártástechnológiája [12–15].

A (2d) egyenlet csak hengeres kapillárisra igaz, ahol a *2/R* kifejezés a kapillárisok belső falfelületének *(A)* és a kapillárisok belső térfogatának *(V)* hányadosa. Ha a kapillárisok egyenes falúak ugyan, de nem hengeresek, akkor a (2d) egyenlet helyett a következő, általános egyenlet lesz érvényes [16]:

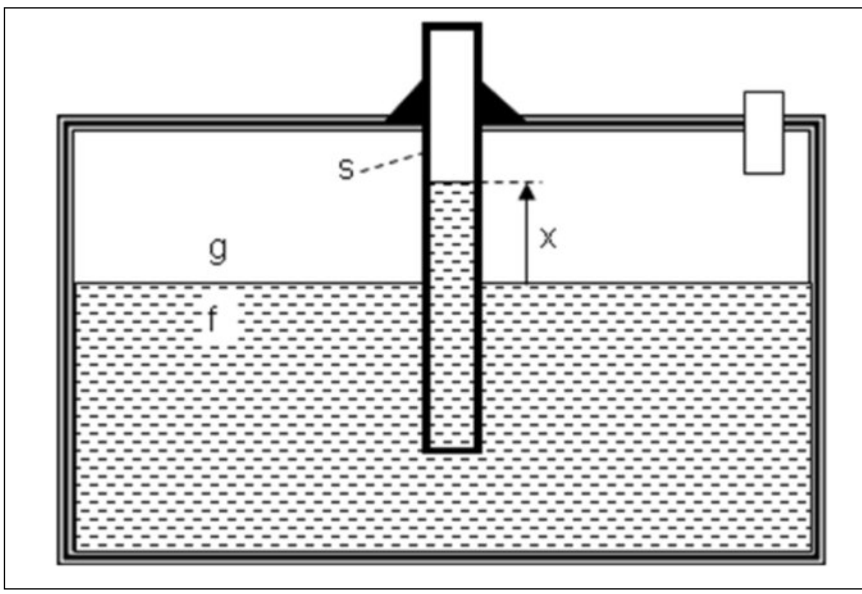
$$p_{s/fg}^{kap} = \frac{A}{V} \cdot \sigma_{fg} \cos\Theta \qquad \text{(2e)}$$

A (2e) egyenlet visszaegyszerűsödik a (2d) egyenletre, ha *A* és *V* helyett az *R* belső sugarú és *L* hosszúságú hengerek belső falfelületének és belső térfogatának képleteit írjuk be. A (2e) egyenletet lehet használni pl. akkor, amikor a fémolvadékot egymással párhuzamos szálak közé infiltráljuk, azokkal párhuzamosan [17]. Mint látjuk, a küszöb peremszög értéke a (2e) egyenlet szerint is 90°.

A helyzet tovább bonyolódik, ha a kapillárisok nem egyenes falúak. A feladat általános megoldása szerint [18] ilyen esetekben a küszöb peremszög értéke jellemzően 90°-nál kisebb, ami nehezíti a kompozitanyag-gyártók, de könnyíti az öntészek életét. Amennyiben egyforma, szorosan pakolt és gömb alakú szemcsékből álló porózus anyagba infiltrálódó folyadékot vizsgálunk, a küszöb peremszög elméleti értéke 50,7° [10, 19], amit kísérletileg is bizonyítottunk [20]. A küszöb peremszög értéke elérheti akár a 0°-ot is, ha a szálakra merőlegesen infiltráljuk a folyadékot a szálak közé [17]. Ez a körülmény erősen megnehezíti a szálak közé oldalról való folyamatos fémolvadék infiltrációt, azaz a kerámia- vagy karbonszálakkal erősített fémmátrixú kompozitok gyártását [21-26]. Ezért volt szükség egy olyan speciális sóolvadék-család kifejlesztésére, ami tökéletes nedvesítést biztosít az alumíniumolvadék és a karbon felület között [27], ami lehetővé teszi a karbonszálakkal erősített alumínium mátrixú kompozitok nyomásmentes előállítását [28–29].



1. ábra. A határfelületi kapilláris erő levezetéséhez



2. ábra. Függőleges, mechanikailag stabil kapilláris, részben folyadék fázisba merülve, benne a makroszkopikus folyadékszinthez képest x magasságba emelkedett folyadékkal

4. Szilárd szemcsék viselkedése folyadékok felületén

Most alkalmazzuk az (1f) egyenletet arra az egyszerűsített esetre, amikor az 1. ábrán bemutatott szilárd szemcse gömb alakú, *R* sugarú és x mélyen van elsüllyedve a folyadékban ($0 < x < 2 \cdot R$). Mivel a gömb helyzete mechanikailag nem stabil, és a folyadéknak sokkal nagyobb a térfogata / tömege / tehetetlensége a szemcsénél, ekkor a határfelületi kapilláris erő a gömböt fogja vagy kitolni a folyadékból, vagy behúzni abba. A gömb geometriájából:

$$A_{sf}(x) = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot x \qquad \text{(3a)}$$

$$\Delta A_{fg}(x) = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot x - \pi \cdot x^2 \qquad \text{(3b)}$$

Végezzük el a (3a-b) képletek x szerinti deriválását, és az eredményeket helyettesítsük be az (1f) egyenletbe. Átrendezés után kapjuk a folyadékba x mélyen bemerülő, *R* sugarú, gömb alakú szemcsére ható határfelületi kapilláris erő képletét:

$$F_{s/fg}^{kap} = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot \sigma_{fg} \cdot \left(1 + \cos\Theta - \frac{x}{R}\right) \qquad \text{(3c)}$$

A (3c) egyenlettel leírt határfelületi kapilláris erő a folyadék belseje felé húzza a szemcsét, ha az erő pozitív előjelű, és a folyadékból kifelé tolja a szemcsét, ha az erő negatív előjelű. Az elmerülési mélység értéktartományában ($0 \le x \le 2 \cdot R$) az erő egy bizonyos x értéknél előjelet vált. Kis szemcsék esetén (adott esetben a 0,1 mm-nél kisebb szemcse már kicsinek számít), azaz ha a gravitáció elhanyagolható, a szemcse egyensúlyba kerül a folyadék felületén, ha a rá ható határfelületi kapilláris erő nullává válik. Behelyettesítve ezt a feltételt a (3c) egyenletbe, a szemcse egyensúlyi bemerülési mélysége:

$$x_{egy} = R \cdot \left(1 + \cos\Theta\right) \quad (3d)$$

A (3d) egyenletből azt látjuk, hogy az egyensúlyi bemerülési mélység az egyik (gyakorlatilag az egyetlen) olyan mérhető határfelületi mennyiség, ami csak a peremszög függvénye, és ezen túl nem függvénye egyik határfelületi energiának sem. Ezért a (3d) egyenleten alapul a kisméretű szemcsék nedvesíthetőségének mérése [30].

A (3d) egyenletből az következik, hogy egy gömb alakú, kisméretű szemcse csak akkor merül el egy olvadékban (azaz akkor képes lassú haladás mellett áttörni a folyadék/gáz határfelületet), ha a folyadék vagy olvadék tökéletesen nedvesíti a szemcsét, ugyanis $x_{egy} = 2 \cdot R$, ha $\Theta = 0°$. A kovalens és ionos kötésű kerámiákat azonban a fémolvadékok nem nedvesítik, ezért az ilyen típusú kisméretű szemcsék spontán nem fognak elmerülni a fémolvadékokban. Ha szemcsés kompozitok gyártása céljából erre törekszünk, akkor több lehetséges megoldás van. Az egyik, ha a szemcsék felületét fémes bevonattal látjuk el [31], amit jellemzően minden fémolvadék tökéletesen nedvesít. Ezért fontos például titán [32], réz [33] vagy nikkel [34] bevonattal ellátni az alumínium mátrixú kompozitokba szánt kovalens vagy ionos kerámiaszemcséket. Ha a szemcsék nedvesíthetősége nem tehető tökéletessé, az elmerülés megoldható a gravitáció segítségével is (feltéve, hogy a szemcse sűrűsége nagyobb az olvadékénál), azonban ehhez milliméternél nagyobb szemcseméretre van szükség. Kisebb szemcsék gázáram segítségével vihetők be a fémolvadékba. Ehhez a (3c) egyenleten túl figyelembe kell venni a szemcse kinetikus energiáját és a súrlódási viszonyokat is (részletesen lásd [35]). A szemcsék sebessége általában felülről korlátos, hiszen egy kritikus érték felett a vivőgáz cseppeket szakítana ki a fémolvadékból [36]. Ezért a szemcsék fémolvadékba hatolásának dinamikai feltételét a szemcsék méretének növelésével lehet elérni. Ha ez a feltétel teljesül, akkor például a lézeresen megolvasztott fémolvadékba lőtt szemcsék abban valóban elmerülnek, és ott kialakul a tervezett kompozit [37-44]. Amennyiben ez a megoldás a kompozitban tervezett kis szemcseméret miatt nem kivitelezhető, a probléma megkerülhető az ún. in situ módszerrel, amikor a beadagolt nagy porszemcsék behatolnak a fémolvadékba és ott feloldódnak, majd a megkívánt kisméretű szemcsék a hűtés során precipitálódnak a fokozatosan túltelítetté váló fémolvadékból. Erre egy példa a (Ti + WC) szemcsék acélolvadékba fújásával gyártott, in situ precipitálódó TiC szemcsékkel erősített felületi acélmátrixú kompozit [36], ami forgácsoló szerszámok alapanyagául is szolgálhat [45].

Most helyettesítsük a (3d) egyenletet a (3c) egyenletbe:

$$F_{s/fg}^{kap} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma_{fg} \cdot \left(x_{egy} - x\right) \quad (3e)$$

A (3e) egyenlet analóg a rugóerőt leíró egyenlettel: bármely irányban tér el a szemcse behatolási mélysége az egyensúlyi értéktől, a határfelületi kapilláris erő mindig visszatéríti a szemcsét az egyensúlyi állapotába. Más szóval a határfelületi kapilláris erő a fémesanyaggyártás beépített mikro-nano-rugójaként működik. Ha sok kis szemcsét helyezünk el az egymással találkozó nagyméretű buborékok vagy cseppek felületén, akkor a buborékok (cseppek) felületén lévő szilárd szemcsék rugalmas ütközőkként meggátolják azt, hogy a buborékok szétpukkadjanak, összeolvadjanak. Ezen a jelenségen alapul a szemcsékkel stabilizált habok [46] és az emulziók [47] stabilitása.

A szemcsékkel stabilizált fémhabok relatíve régóta ismertek, azok fejlesztésével több külföldi, nemzetközi és miskolci kutatócsoport is foglalkozik [48-56]. A szemcsékkel stabilizált fémemulziókat a fémhabok analógiájára Miskolcon fejlesztettük ki [57]. Ezt az új anyagcsoportot nemcsak előállítani sikerült különböző összetételekkel [57-58], de sikerült azokban felcserélni a mátrixot a diszpergált fázist is (azaz sikerült „megfordítani" a fémemulziót) [59], sőt, szemcsék helyett sikerült a fémemulziókat többkomponensű fémolvadékból in situ a diszpergált cseppek felületén kiváló szilárd vékony bevonattal is stabilizálni [60].

5. Összefoglalás

Folyadékok porózus testekbe való behatolását / penetrációját / infiltrációját és szilárd szemcsék folyadék/gáz és folyadék/folyadék felületeken való viselkedését egyaránt a határfelületi kapilláris erő határozza meg. A cikkben az elméleti képletek levezetésén túl bemutattuk a határfelületi kapilláris erő jelentőségét a fémöntészetben, a fémmátrixú kompozitok és szintaktikus fémhabok gyártásában, illetve a fémhabok és fémemulziók stabilitásában. A hivatkozási listában helyhiány miatt főleg magyar kutatók olyan folyóiratcikkeire koncentráltunk, melyek az elmúlt évtizedben jelentek meg.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a TAMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt támogatta, az Európai Szociális Alap segítségével. Szerző köszönetét fejezi ki a BKL Kohászat Szerkesztőségének, hogy lehetővé tették e cikksorozat publikálását. Ezt a cikksorozatot Édesapám, *id. Kaptay György* kohómérnök (1933–2008) emlékének ajánlom.

Irodalom

[1] *Kaptay Gy.:* BKL Kohászat 142/3. (2009) 39-46.
[2] *Kaptay Gy.:* BKL Kohászat, 142/6. (2009) 37-46.
[3] *Kaptay Gy.:* BKL Kohászat, 143/3. (2010) 33-38.
[4] *Kaptay Gy.:* BKL Kohászat, 143/5. (2010) 45-54.
[5] *Kaptay Gy.:* BKL Kohászat,

144/5. (2011) 9-13.
[6] *Young, T.:* Phil Trans (1805) 65-87.
[7] *de Laplace, P.S.:* Mechanique Celeste, Supplement to Book 10, 1806.
[8] *Kaptay, G.:* J Mater Sci 40 (2005) 2125-2131.
[9] *Kaptay, G.:* J Disp Sci Technol 33 (2012) 130-140.
[10] *Kaptay, G. – Stefanescu, D. M.:* AFS Trans 100 (1992) 707-712.
[11] *Jónás P. – Détári A. – Svidró J.:* BKL Kohászat, 140/2. (2007), 17-26.
[12] *Orbulov I. – Kientzl I. – Németh Á.:* BKL Kohászat, 140/5. (2007) 41-46.
[13] *Kun P. – Orbulov I. N.:* BKL Kohászat, 144/3. (2011) 51-55.
[14] *Orbulov, I. N. – Ginsztler J.:* Composites A 43 (2012) 553-561.
[15] *Orbulov, I. N.:* Mater Sci Eng A 555 (2012) 52-56.
[16] *Kaptay, G. – Matsushita, T. – Mukai, K. – Ohuchi, T.:* Metall Mater Trans 35B (2004) 471-486.
[17] *Kaptay G.:* Composites Sci Technol, 68 (2008) 228-237.
[18] *Kaptay, G. – Bárczy, T.:* J Mater Sci 40 (2005) 2531-2535.
[19] *Bárczy, T. – Kaptay, G.:* Mater Sci Forum 473 (2005) 297-302.
[20] *Baumli, P. – Kaptay, G.:* Mater Sci Eng A 495 (2008) 192-196.
[21] *Blücher J. – Dobránszky, J.:* BKL Kohászat, 136/5. (2003) 213-217.
[22] *Blucher, J. T. – Dobránszky, J. – Narusawa, U.:* Mater Sci Eng A 387 (2004) 867-872.
[23] *Kientzl, I. – Dobránszky, J.:* Mater Sci Forum 537 (2007) 191-197.
[24] *Kientzl, I. – Dobránszky, J.:* Mater Sci Forum 589 (2008) 105-110.
[25] *Kientzl, I. – Dobránszky, J. – Németh, Á.:* Mater Sci Forum 659 (2010) 177-182.
[26] *Orbulov, I. N. – Németh, Á.:* Mater Sci Forum 659 (2010) 229-234.
[27] *Baumli, P. – Sytchev, J. – Kaptay, G.:* J Mater Sci 45 (2010) 5177-5190.
[28] *Juhász, K.L. – Baumli, P. – Kaptay, G.:* Mater-wiss Werkstofftech 43 (2012) 310-314.
[29] *Baumli, P. – Stychev, J. – Budai, I. – Szabó, J. T. – Kaptay, G.:* Composites A 44 (2013) 47-50.
[30] *Budai, I. – Kaptay, G.:* J Mater Sci 45 (2010) 2090-2098.
[31] *Csepeli Zs. – Sólyom B. – Gácsi Z. – Buza G. – Teleszky I. – Kovács Á.:* BKL Kohászat 131 (1998) 41-47.
[32] *Baumli P. – Sytchev J. – Kaptay Gy.:* BKL Kohászat 139/3 (2006) 47-50.
[33] *Tomolya K.:* BKL Kohászat 140/6. (2007) 39-42.
[34] *Pázmán J. – Ferenczi T. – Kovács Á. – Gácsi Z.:* BKL Kohászat 141/2. (2008) 37-42.
[35] *Verezub, O. – Kaptay, G. – Matsushita, T. – Mukai, K.:* Mater Sci Forum 473 (2005) 429-434.
[36] *Verezub, O. – Kálazi, Z. – Buza, G. – Verezub, N. V. – Kaptay, G.:* Surface Coatings Technol 203 (2009) 3049-3057.
[37] *Boross P. – Kálazi Z.:* BKL Kohászat 135/6-7 (2002) 219-223.
[38] *Králik, G. – Fülöp, P. – Verő, B. – Zsámbok, D.:* Mater Sci Forum 414 (2003) 21-30.
[39] *Sólyom, J. – Roósz, A. – Teleszky, I. – Sólyom, B.:* Mater Sci Forum 414 (2003) 37-42.
[40] *Fábián, R. – Boross, P. – Verő, B. – Fülöp, P.:* Mater Sci Forum 414 (2003) 201-206.
[41] *Janó V. – Buza G. – Kálazi Z.:* BKL Kohászat, 138/3. (2005) 39-44.
[42] *Bitay, E. – Roósz, A.:* Mater Sci Forum 508 (2006) 301-306.
[43] *Janó, V.:* Mater. Sci. Forum 537-538 (2007) 177-182.
[44] *Buza, G. – Janó, V. – Svéda, M. – Verezub, O. – Kálazi, Z. – Kaptay, G. – Roósz, A.:* Mater Sci Forum, 589 (2008) 79-84.
[45] *Verezub, O. – Kálazi, Z. – Sytcheva, A. – Kuzsella, L. – Buza, G. – Verezub, N. V. – Fedorov, A. – Kaptay, G.:* J Mater Process Technol 211 (2011) 750-758.
[46] *Kaptay, G.:* Colloids Surfaces A 230 (2004) 67-80.
[47] *Kaptay, G.:* Colloids Surfaces A 282 (2006) 387-401.
[48] *Babcsán, N. – Leitlmeier, D. – Degischer, H. P.:* Mat-wiss Werkstofftech 34 (2003) 1-8.
[49] *Babcsán, N. – Leitlmeier, D. – Degischer, H. P. – Banhart, J.:* Adv Eng Mater 6 (2004) 421-428.
[50] *Babcsán, N. – Leitlmeier, D. – Banhart, J.:* Colloids Surfaces A 261 (2005) 123-130.
[51] *Babcsán, N. – Garcia-Moreno, F. – Leitlmeier, D. – Banhart, J.:* Mater Sci Forum 508 (2006) 275-280.
[52] *Babcsán, N. – Vinod Kumar, G. S. – Murty, B. S. – Banhart, J.:* Trans Indian Inst Met 60 (2007) 127-132.
[53] *Somosvári, B. M. – Babcsán, N. – Bárczy, P. – Berthold, A.:* Colloids Surfaces A 309 (2007) 240-245.
[54] *Somosvári, B. M – Bárczy, P. – Szőke, J. – Szirovicza, P. – Bárczy, T.:* Colloids Surfaces A 382 (2011) 58-63.
[55] Bárczy P. – Szőke J. – *Somosvári B. – Szirovicza P. – Bárczy T.:* BKL Kohászat, 144/1. (2011) 39-43.
[56] *Babcsánné Kiss J. – Sóki P. – Blaskovics F. – Számel Gy. – Tóth L. – Beke S. – Babcsán N.:* BKL Kohászat 145/1. (2012) 61-64.
[57] *Budai, I. – Kaptay, G.:* Metall Mater Trans 40A (2009) 1524-1528.
[58] *Budai, I. – Kaptay, G.:* Intermetallics 19 (2011) 423-425.
[59] *Budai, I. – Nagy, O. Z. – Kaptay, G.:* Coll Surf A 377 (2011) 325-329.
[60] *Nagy, O. Z. – Szabó, J. T. – Kaptay, G.:* Intermetallics 26 (2012) 26-30.