

KAPTAY GYÖRGY

## Határfelületi jelenségek a fémesanyaggyártásban. 5. rész

### A határfelületi szétterítő erő

A cikksorozat 5. részében a Szerző levezeti a határfelületi szétterítő erő (= Marangoni-erő) képletét. Egymással nem elegyedő folyadékok esetén a Marangoni-erő a kisebb felületi feszültségű és a másikat tökéletesen nedvesítő folyadékot húzza rá a vele nem elegyedő, nagyobb felületi feszültségű folyadékra. A Marangoni-erő extrapolálható arra az esetre is, amikor felületi hőmérséklet- vagy koncentráció-gradiens fellépte miatt a felület mentén felületifeszültség-gradiens alakul ki – ekkor a felületen olyan áramlás indul el, ami a kisebb felületi energiájú réteggel cseréli le a nagyobb felületi energiájú részt. A gyakorlatban ez az erő lézeres átolvasztásnál, ívhegesztésnél, illetve szerkezeti kerámiák salak/gáz vagy salak/fémolvadék határfelületen fellépő korróziójában/eróziójában fontos.

#### 1. Bevezetés

A cikksorozat első részében [1] megadtuk a határfelületi erők fogalmát és összesen 8 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 [3]. A cikksorozat negyedik részében a határfelületi gradiens erőt tárgyaltuk, ami képes diszpergált fázisokat (cseppeket, buborékokat) mozgatni a folyékony mátrixban lévő hőmérséklet- és/vagy

A szerző életrajza a BKL Kohászat 2009/3. számában olvasható. Az azóta bekövetkezett változások megtalálhatók a [www.kaptay.hu](http://www.kaptay.hu) honlapon.

A cikk teljes terjedelmében az ombkenet.hu Kohászat 2011/5-ben olvasható.

koncentráció-gradiens hatására [4].

Hasonlóan az előző részhez, most is a hőmérséklet-, illetve az összetétel-gradiens által létrehozott felületifeszültség-gradiens által indukált határfelületi erővel foglalkozunk. Azonban az előző résztől eltérően nem egy folyadékfázisban diszpergált cseppekre/buborékokra ható erővel fogunk foglalkozni, hanem a folyadékfelszínnel párhuzamosan ható erővel, ami a felületi réteget képes mozgatni. Ezt a jelenséget először Thomson [5], majd tőle függetlenül Marangoni [6] írta le, a jelenség („Marangoni-áram-

lás”) és az azt előidéző „Marangoni-erő” az utóbbiról kapta a nevét. Ez a jelenség viszonylag jól dokumentált az irodalomban [7–11].

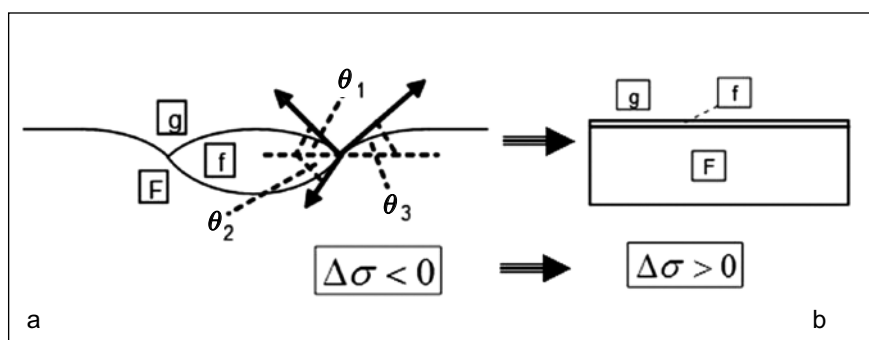
#### 2. A határfelületi szétterítő erő

Egy kis mennyiségű folyadék ( $f$ ) két lehetséges alakját vele nem elegyedő, relatíve nagy mennyiségű folyadék ( $F$ ) felületén az 1. ábrán mutatjuk be. Az 1a ábrán látható peremszögek közötti kapcsolatot a cikksorozat második részében, a (10–11) egyenletekkel írtuk le [2], amiből az következik, hogy a folyadékcsepp akkor alkot vékony, sík réteget a másik folyadék felületén (1b ábra), ha a következő egyenlettel definiált  $\Delta\sigma$  mennyiség értéke pozitív:

$$\Delta\sigma \equiv \sigma_{Fg} - \sigma_{Ff} - \sigma_{fg} \quad (1)$$

ahol  $\sigma_{Fg}$  és  $\sigma_{fg}$  az  $F$  és  $f$  folyadékok felületi feszültsége, míg  $\sigma_{Ff}$  a két folyadék közötti határfelületi energia (mindegyik mértékegysége  $J/m^2$ ).

A 2. ábrán mutatjuk be az  $F$  folyadékot részben fedő  $f$  folyadékhártyát,



■ 1. ábra. Kis mennyiségű folyadék ( $f$ ) nagy mennyiségű, vele nem elegyedő másik folyadék ( $F$ ) felületén csepp (1a ábra) és vékony réteg (1b ábra) formájában

amit  $x$  irányban a határfelületi szétterítő erő ( $F_{fg,x}^{ter}$ ) terít szét az  $F$  folyadék felületén [12–13]:

$$F_{f,x}^{ter} = w \cdot \Delta \sigma \quad (2)$$

ahol  $w$  a tégely belső szélessége (m) a 2. ábra síkjára merőlegesen mérve.

Most terjesszük ki a (2) egyenlettel leírt erőt olyan esetre, amikor ugyancsak egy folyadékfázisunk van, de annak folyadék/gáz felülete mentén felületifeszültség-gradiens alakul ki [12-13]:

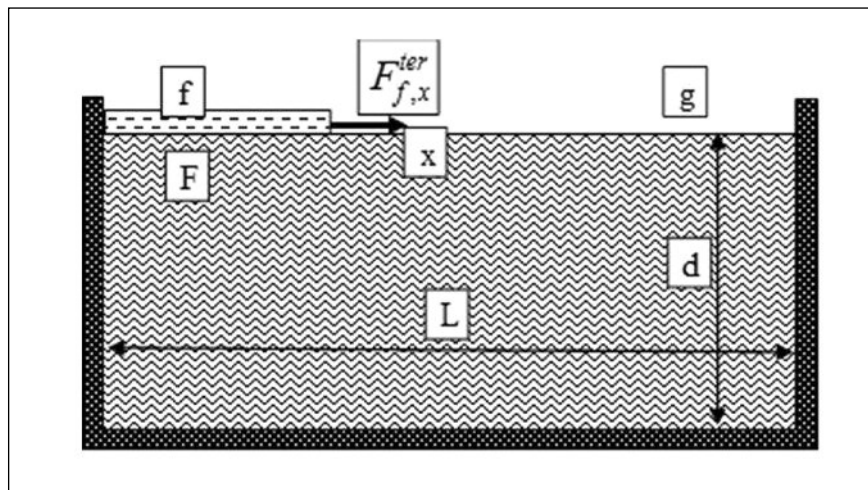
$$F_{Fg,x}^{ter} = A_{Fg} \cdot \frac{d\sigma_{Fg}}{dx} \quad (3)$$

Ilyen esetet mutatunk be a 3. ábrán, ahol a felületifeszültség-gradienst a felületi hőmérséklet-gradiens ( $dT/dx$ , K/m) hozza létre, amit oly módon tartunk állandósult állapotban, hogy egy tégely bal oldalát fűtjük, jobb oldalát pedig hűtjük. A természet most is energiaminimumra törekszik. Ezt úgy oldja meg, hogy a kisebb felületi feszültségű folyadék résszel lecseréli a nagyobb felületi feszültségű folyadék részt. Ha érvényes az Eötvös-szabály ( $d\sigma_{Fg}/dT < 0$ , 3a ábra), akkor a tégely bal oldalán kisebb a felületi feszültség és ezért a felületen balról jobbra indul áramlás. Azonban a kis felületi feszültségű folyadék legalább részben lehül, mire a tégely jobb oldalára ér, emiatt megnő a felületi feszültsége, és ezért a bal oldali friss, meleg folyadék azt is le akarja cserélni. Ezzel kialakul egy, a teljes belső tégelyfelület menti áramlás, ami a teljes folyadékot átkeveri. Amennyiben olyan különleges folyadékösszetételt használunk, amire nem érvényes az Eötvös-szabály ( $d\sigma_{Fg}/dT > 0$ , 3b ábra), az áramlás iránya ellentétes lesz a 3a ábrán bemutatotthoz képest.

A (3) egyenletet e cikksorozat előző részében a határfelületi gradiens erőre levezetett (2) egyenlettel összehasonlítva [4] úgy találjuk, hogy a két erő egymással abszolút értelemben azonos, de egymással ellentétes irányú:

$$F_{Fg,x}^{ter} = -F_{g,x}^{grad} \quad (4)$$

Ha tehát a felületi feszültség gradiense balról jobbra mutat (3a ábra), akkor a folyadék felületi áramlása

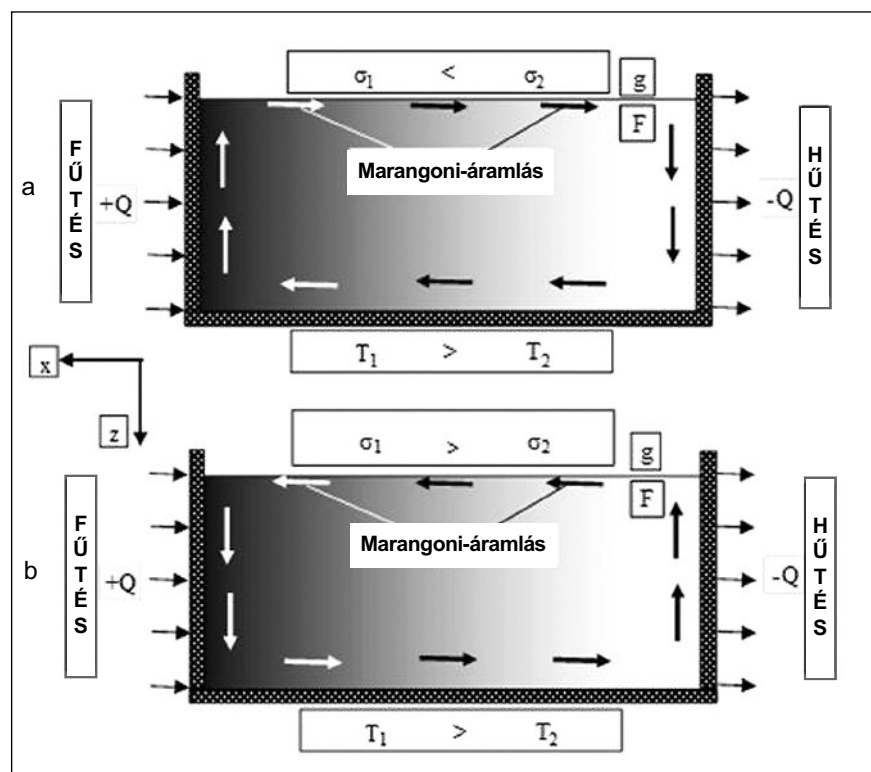


■ 2. ábra. A határfelületi szétterítő erő értelmezéséhez, az egymásban nem elegendő folyadékok (F és f) esetén

balról jobbra halad, míg a folyadék belsejében diszpergálódott buborék az ellenkező irányba, jobbról balra fog haladni (4. ábra). Mint a 4. ábráról látjuk, ez azért van így, mert a buborék mentén fellépő Marangoni-áramlás hatására a buborék jobb oldalán túlnyomás (túl sok folyadék), bal oldalán pedig vákuum (túl kevés folyadék) keletkezik, ami a nagynyomású helyről a kisnyomású hely felé (azaz jobbról balra) fogja lökni a buborékot. Ezért az előző részben

tárgyalt határfelületi gradiens erő [4] nevezhető „Marangoni-erő által indukált határfelületi gradiens erőnek” is, de Marangoni-erőnek (ahogy az irodalomban többször hibásan illetik) semmiképpen sem. Marangoni-erőnek csak az itt tárgyalt határfelületi szétterítő erő nevezhető.

Most ismételjük meg az előző rész (3) egyenletét [4], miszerint a felületifeszültség-gradienst vagy hőmérséklet-, vagy koncentráció-gradiens okozza:



■ 3. ábra. A hőmérséklet-gradiens indukálta határfelületi szétterítő erő értelmezéséhez, ha  $d\sigma/dT < 0$  (3a ábra) és ha  $d\sigma/dT > 0$  (3b ábra)

$$\frac{d\sigma_{Fg}}{dx} = \frac{d\sigma_{Fg}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} + \sum_c \frac{d\sigma_{Fg}}{dx_c} \cdot \frac{dx_c}{dx} \quad (5)$$

ahol  $d\sigma_{Fg} / dT$  (J/m<sup>2</sup>K) a felületi feszültség hőmérsékleti koeficiense,  $d\sigma_{Fg} / dx_c$  (J/m<sup>2</sup>) a felületi feszültség koncentráció szerinti koeficiense,  $x_c$  az  $F$  folyadékban oldott  $c$  komponens móltörtje (dimenziómentes),  $(dT/dx)$ , (K/m) a hőmérséklet-gradiens és  $(dx_c/dx)$ , (1/m) a  $c$  komponens koncentráció-gradiense. A határfelületi szétterítő erő legáltalánosabb képlete az (5) egyenletnek a (3) egyenletbe való behelyettesítésével:

$$F_{Fg,x}^{ter} = A_{Fg} \cdot \left( \frac{d\sigma_{Fg}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} + \sum_c \frac{d\sigma_{Fg}}{dx_c} \cdot \frac{dx_c}{dx} \right) \quad (6)$$

A (3, 6) egyenletekkel leírt határfelületi erő a felületi Marangoni-áramlás hajtóereje. Ha egy newtoni viszkozitású folyadékban áramlás indul el, akkor fellép az áramlást fékező súrlódási erő is, ami a 3. ábrán bemutatott elrendezés esetén közelítőleg a következő képlettel írható le [14]:

$$F_{Fg,x}^{sur} \cong -A_{Fg} \cdot \eta \cdot \frac{2 \cdot v_{Fg,x}}{d} \quad (7)$$

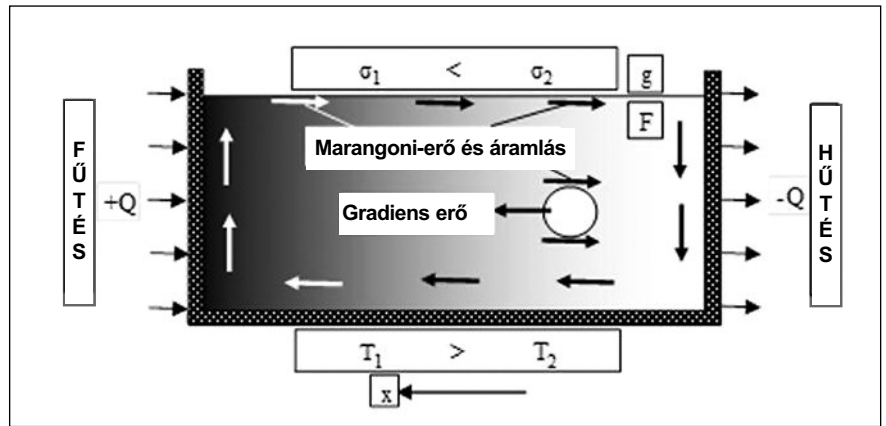
ahol  $\eta$  a folyadék dinamikai viszkozitása (Pas),  $v_{Fg,x}$  (m/s) a felület mentén  $x$  irányban, a Marangoni-erő hatására fellépő felületi áramlás sebessége,  $d$  (m) a folyadék mélysége (lásd 2. ábra). A folyadék áramlása akkor éri el az állandósult állapotot jellemző egyensúlyi sebességet ( $v_{Fg,x}^{egy}$ , m/s), ha a folyadékfelszínre ható két erő eredője zérussá válik:

$$F_{Fg,x}^{ter} + F_{Fg,x}^{sur} = 0 \quad (8)$$

Behelyettesítve a (3, 7) egyenleteket a (8) egyenletbe, a következő egyenletet kapjuk az egyensúlyi felületi áramlási sebességre:

$$v_{Fg,x}^{egy} \cong \frac{d}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{d\sigma_{Fg}}{dx} \quad (9)$$

Végezzünk próbaszámítást a (9) egyenlettel, feltételezve, hogy egy acél felületét nagy energiájú lézerral olvasztjuk meg, és a Marangoni-áramlást a hőmérséklet-gradiens okozza. Ekkor a (9) egyenletbe



■ 4. ábra. Ugyanaz, mint a 3a ábra, de középen egy buborékkal, amin a határfelületi szétterítő (Marangoni-) erő által indukált határfelületi gradiens erő felléptét szemléltetjük

(6) helyettesítve az (5) egyenlet első tagját, konkrétan a következő egyenlettel számolhatunk:

$$v_{Fg,x}^{egy} \cong \frac{d}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{d\sigma_{Fg}}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (10)$$

Tegyük fel, hogy a lézersugár által megvilágított folt alatt közvetlenül 2600 K az acéolvadék hőmérséklete, ami sugárirányban kifelé erőteljesen csökken, és mindössze 2 mm távolságon belül elérjük az acél likvidushőmérsékletét (kb. 1800 K). Mutasson az  $x$  vektor sugárirányban kifelé. Ekkor a felületi hőmérséklet-gradiens:  $dT/dx$   $(1800-2600)/0,002 = -4 \cdot 10^5$  K/m. Az alacsony oxigén- és kén-tartalmú acélok felületi feszültségének hőmérsékleti koeficiense [15]:  $d\sigma_{Fg} / dT \cong -0,49$  mJ/m<sup>2</sup>K. Az acél viszkozitása az átlagos 2200 K-en [15]:  $\eta \cong 4$  mPas. Amennyiben az átolvasztott acélréteg mélysége  $d = 2$  mm, a Marangoni-áramlás sebességére a (10) egyenletből:  $v_{Fg,x}^{egy} \cong 49$  m/s = 176 km/h érték adódik. Tehát az acéolvadék felületi rétege egy gyorsvonal sebességével száguld sugárirányban kifelé. Nyilvánvaló, hogy mind a lézersugaras átolvasztásnál [16–27], mind az ívhegesztésnél [28–34] ennek a jelenségnek nagy szerepe lesz mind az olvadéktócsa alakjára, mind annak homogenitására. Felületi acélmátrixú nanokompozitok lézeres in situ előállításánál azt tapasztaltuk, hogy a szintézishez szükséges kémiai cserereakciók gyakorlatilag teljes mértékben lejátszódnak, és homogén koncentrációmező alakul ki akár tizedmásodperc alatt is, a nagy

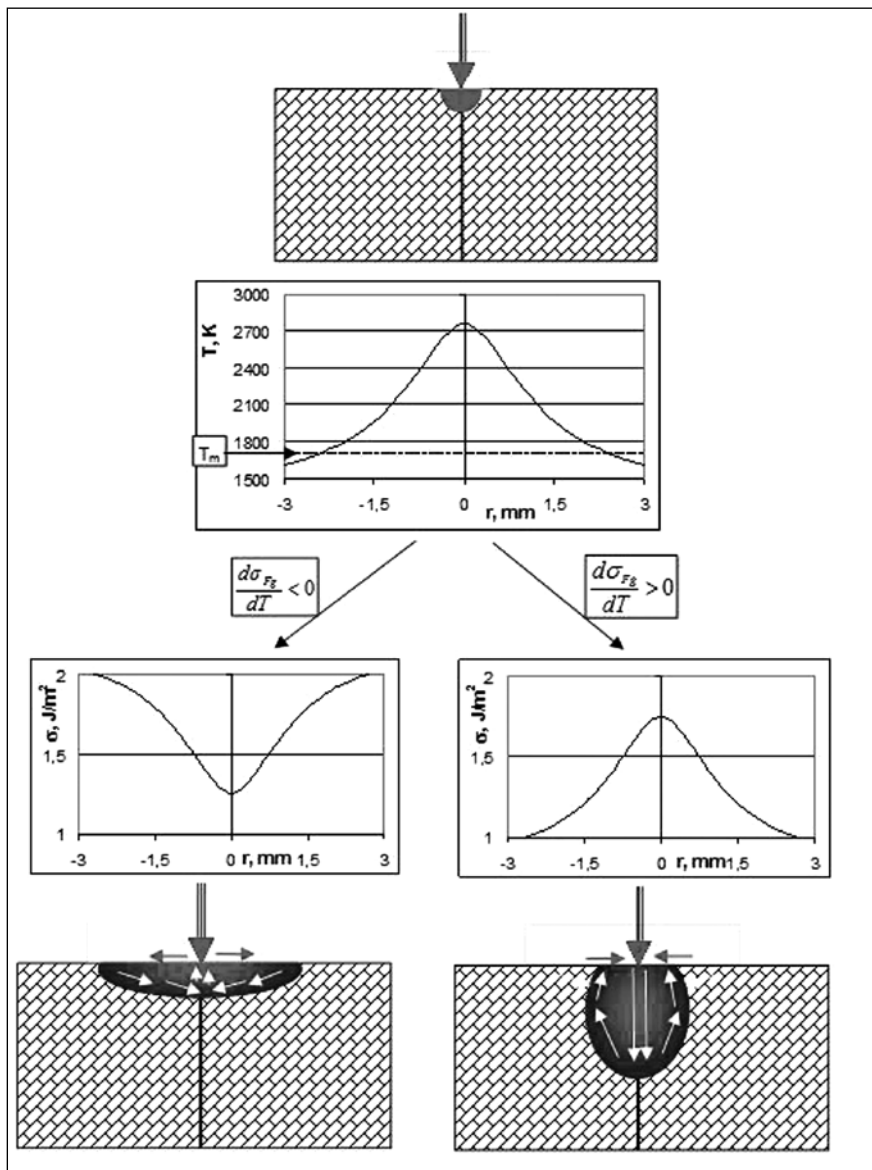
sebességű Marangoni-áramlásnak köszönhetően [25]. Ívhegesztésnél alapvető fontosságú olyan felületi összetétel kialakítása, ami megfordítja a Marangoni-áramlás „normál” irányát, az Eötvös-szabálynak ellentmondó módon [34]. Ezt a kérdést részletesebben a következő fejezetben tárgyaljuk.

### 3. A határfelületi szétterítő erő gyakorlati jelentősége két példán

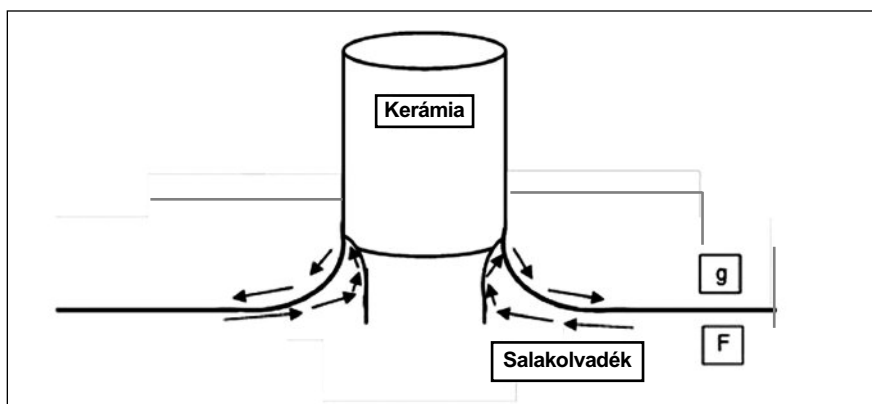
#### 3.1. A hőmérséklet-gradiens hatására: hegesztési varratok alakja

Az 5. ábrán sematikusan mutatom be, hogy milyen alakú hegesztési varrat jön létre attól függően, hogy milyen irányú a Marangoni-áramlás. Az elektronsugárral az összehegesztendő fémdarabokat középen olvasztjuk meg (a hegesztősugár az 5. ábra síkjára merőlegesen halad), ezért a hőforrás alatt lesz maximális a hőmérséklet, ami kifelé sugárirányban fokozatosan csökken. Ezért a fém összetételének függvényében két esetet különböztethetünk meg.

Az 5. ábra bal oldalán látjuk a „normál” alapesetet, ami megfelel az Eötvös-szabálynak, amennyiben a fém összetétele olyan, hogy  $d\sigma_{Fg} / dT < 0$ . Ekkor a nagy hőmérsékletű, középső résznek a legkisebb a felületi feszültsége, és emiatt a Marangoni-áramlás a felületen középről kifelé indul. Emiatt az elektronsugár által felmelegített fémlvadék oldalirányban olvasztja a fémet, és mire visszakanyarodik, elveszti a többlethőjét, ezért lefelé már nem tud olvasztani. Végeredményben a hegesztési varrat



■ 5. ábra. Hegesztési varrat sematikus alakja a felületi feszültség hőmérsékleti együtthatójának előjelétől, azaz a Marangoni-áramlás irányától függően



■ 6. ábra. Egy kerámia alkatrész eróziója / korróziója salak/gáz határfelületen

sekély és széles lesz, ami gyenge kötést hoz létre, ráadásul feleslegesen energiapazarló is.

Az 5. ábra jobb oldalán látjuk a „fordított” esetet, ami ellentmond az

Eötvös-szabálynak, amennyiben a fém összetétele olyan, hogy  $d\sigma_{Fg}/dT > 0$ . Ekkor a nagy hőmérsékletű, közepső résznek a legnagyobb a felületi feszültsége, és emiatt a Maran-

goni-áramlás a felületen kívülről befelé indul. A két oldalról érkező áramlás közepén találkozik, lefelé fordul, és lefelé olvasztja a fémet. Mire visszakanyarodik elveszti a többlethőjét, ezért oldalirányban már nem tud olvasztani. Végeredményben a kialakuló hegesztési varrat mély és keskeny lesz, ami nagyobb szilárdságú kötést hoz létre.

Mint látjuk, ezen utóbbi, „fordított” Marangoni-áramláshoz olyan speciális ötvözet-összetételre van szükség, ami az Eötvös-szabálynak ellentmondó, pozitív előjelű  $d\sigma_{Fg}/dT$  értéket biztosít. A megoldás kulcsa a felületi fázisátalakulás, amiről egy külön cikk fog szólni e cikksorozatban belül [34–36].

### 3.2. A koncentráció-gradiens hatása: erózió salak felületen

A 6. ábrán egy salakolvadékba nyúló kerámiaszerelvényt mutatunk be [37]. Ha a salakolvadék nedvesíti a kerámiát és abból felületaktív komponens oldódik a salakolvadékba, akkor a kerámiaszerelvény közelében a kerámia/salak/gáz háromfázisú vonal mentén megnő a felületaktív komponens koncentrációja (azaz lecsökken a felületi feszültség), ami a kerámiaszerelvénytől kifelé induló, koncentráció-gradiens által indukált Marangoni-áramlást hoz létre a salakolvadék/gáz határfelület mentén. Ezt a felületi áramlást kompenzálja egy ellentétes irányú, térfogati áramlás, ami intenzív sűrűdést hoz létre a kerámiaszerelvény felülete mentén közvetlenül a salak/gáz határfelület alatt, intenzív kerámia korróziót/eróziót okozva. Hasonló jelenségeket a salak/fémolvadék határfelületek közelében is gyakran megfigyelhetünk, amit szintén a koncentráció-gradiens által indukált Marangoni-áramlás okoz.

### 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 tette 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] Thomson, J.: Phil. Mag. Ser.4, 10 (1855) 330–333.
- [6] Marangoni, C.: Pel Dott, Nuovo Chim. Ser.3, 3 (1878) 97–115.
- [7] Mills, K. C. – Hondors, E. D. – Li, Z.: J. Mater. Sci. 40 (2005) 2403–2409.
- [8] Chatterjee, D. – Chakraborty, S.: Metal. Mater. Trans., 36B (2005) 743–754.
- [9] Shiratori, S. – Hibiya, T. – Kuhlmann, H. C.: Microgr. Sci. Techn., 18 (2006) 132–136.
- [10] Quéré, D. – Ajdari, A.: Nature Mater., 5 (2006) 429–430.
- [11] Udvardy, O. – Lovas, A.: Mater Sci Forum, 589 (2008) 173–178.
- [12] Kaptay, G.: J. Mater. Sci., 40 (2005) 2125–2131.
- [13] Kaptay, G.: J. Disp. Sci. Technol., 2011, doi: 10.1080/01932691.2010.548232.
- [14] Poirier, D. R. – Geiger, G. H.: Transport Phenomena in Materials Processing, TMS, Warrendale (1994)
- [15] Iida, T. – Guthrie, R. I. L.: The Physical Properties of Liquid Metals, Clarendon Press, Oxford (1993).
- [16] Roósz, A. – Sólyom, J. – Teleszky, I.: Prakt. Metallogr., 35 (1988) 448–445
- [17] Roósz A. et al.: Mater. Sci. Eng., A173 (1993) 351–355.
- [18] Buza G.: Természet Világa, 128 (1997) 517–520.
- [19] Gácsí, Z. et al.: Surf. Coat. Techn. 151–152 (2001) 320–324.
- [20] Králik, G. et al.: Mater. Sci. Forum, 414-415 (2003) 21–30.
- [21] Buza G. és társai.: BKL Kohászat, 137-2 (2004) 39–44.
- [22] Janó V. – Buza G. – Kálazi Z.: BKL Kohászat, 138-3 (2005) 39–44.
- [23] Bitay, E. – Roósz, A.: Mater. Sci. Forum, 508 (2006) 301–306.
- [24] Svéda, M. – Roósz, A. – Buza, G.: Mater. Sci. Forum, 508 (2006) 99–104.
- [25] Verezub, O. et al.: Surf. Coat. Technol, 203 (2009) 3049–3057.
- [26] Verezub, O. et al.: Surf. Engin. 27 (2011) 428–435.
- [27] Verezub, O. et al.: J. Mater. Process. Technol., 211 (2011) 750–758.
- [28] Heiple, C. R. – Roper, J. R.: Welding J., 61 (1982) 97–102.
- [29] Wang, Y. – Tsai, H. L.: Metall. Mater. Trans., 32B (2001) 501–514.
- [30] Lu, S. – Fujii, H. – Nogi, K: ISIJ Int., 45 (2005) 66–70.
- [31] Lowke, J. J. – Tanaka, M. – Ushio, M.: J. Phys. D38 (2005) 3438–3445.
- [32] Sándor T.: Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek, 2 (2007) 22–24.
- [33] Sándor, T. – Dobránszky, J.: Mater. Sci. Forum, 537-538 (2007) 63–70.
- [34] Sándor T. et al.: submitted to Science Technology Welding Joining.
- [35] Kaptay, G.: Calphad, 29 (2005) 56-67 (+ Erratum, 29 (2005) 262).
- [36] Mekler, C. — Kaptay, G.: Mater. Sci. Eng., A495 (2008) 65–69.
- [37] Mukai, K.: Phil. Trans. A356 (1998) 1015–1026.

PÁLMAI ZOLTÁN

# A szerszámanyagok kopási folyamatai forgácsolásnál

**A forgácsolószerszám kopásának vizsgálata alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a forgácsolási út hosszának figyelembevétele nem csak az abrázív, adhéziós, hanem a termikusan aktivált diffúziós, oxidációs folyamatoknál is szükséges. Ennek alapján a kopási sebesség olyan matematikai modelljének alkalmazását javasoljuk, amelynek konstansai és a folyamat aktiválási energiája forgácsolási kísérletekkel, de akár váltakozó technológiai paraméterekkel folytatott üzemi gyártás közben végzett kopásmérésekkel is meghatározhatók. A kopási egyenlet validációja során meghatároztuk a C45/P20 munkadarab/szerszámanyag párosításnál a kopás aktiválási energiáját.**

## 1. Előzmények

A szerszámok kopásállósága fontos gazdasági tényező, ezért mindig élénken foglalkoztatta a technológusokat. Schallbroch és Bethmann

könyve 60 évvel ezelőtt már 106 irodalmi forrást idézett [1]. A fejlődés ma is tart, a kopási folyamatok tanulmányozása révén a szerszám élének extrém igénybevételét mind jobban elviselni képes anyagkombinációk

jelennek meg. Ezért aztán a szerszám anyagának a használat közbeni degradációja a technológusok és anyagkutatók érdeklődésének jelenleg is egyik fontos fókuszpontja.

Már a múlt század közepén jelentős kutatási eredmények születtek. A szerszámok kopását meghatározó komplex folyamatok leírására Takeyama és Murata [2] az általános

$$W = W_b(n, \sigma_s) + W_a(L, \sigma_a) + W_p(\theta, t) + W_i \quad (1)$$

egyenletet vezette be, ahol

**Dr. Pálmai Zoltán** életrajzát lapunk 2010/5. számában közöltük. A cikk teljes terjedelmében az ombkenet.hu Kohászat 2011/5-ben olvasható.