

ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA ÉS GYÁRTÁSINFORMATIKA

2018/1

Nagy Ágoston Gábor, Bonyár Attila, Horváth Róbert:

A nanofluidikai atomerőmikroszkóp: FluidFM (4. oldal)

Szurdán Szabolcs, Medgyes Bálint, Mende Tamás:

Mangánnal mikroötvözött ólommentes forrasztóvezetek fejlesztése az elektronikai ipar számára (8. oldal)

Hurtony Tamás, Krammer Olivér:

Mangán mikroötvözös forrasztóanyag mikroszerkezetének vizsgálata elektrokémiai módszerekkel (13. oldal)

Farkas Gábor Ákos, Villányi Balázs János, Martinek Péter

Gyártási műveletek illeszkedésén alapuló heurisztikus ütemező módszer alkalmazása szalagrendszerű gyártásban (19. oldal)

ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA ÉS GYÁRTÁSINFORMATIKA

Lektorált szakmai folyóirat

Megjelenik évente kétszer magyar, valamint esetenként angol nyelven

Szerkesztőbizottság és lektori testület:

Harsányi Gábor, elnök

Bonyár Attila

Hárs György

Illés Balázs

Illyefalvi-Vitéz Zsolt

Jakab László

Krammer Olivér

Martinek Péter

Sántha Hunor

Szabó Péter János

Tiszteletbeli főszerkesztő: Tóth Endre

Felelős szerkesztő: Hajdu István

Szerkesztő: Török Marianna

Szerkesztőségi kapcsolat: hajdui@ett.bme.hu

**Kiadja: a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és
Informatikai Kar Elektronikai Technológia Tanszéke**

H-1111 Budapest, Egry József u. 18., V1. épület, fsz. 009.

Tel.: (+36-1) 463-2740, E-mail: admin@ett.bme.hu

Felelős kiadó: Dr. Harsányi Gábor, tanszékvezető

ISSN 2631-0813

Lapindító

Folyóiratunk a címében jelölt szakterületen folyó kutató, fejlesztő munkáról és innovációról kíván egy szélesebb kör számára áttekintést adni. Évente két szám magyarul, esetenként (terveink szerint általában évente) egy-egy szám angolul jelenik meg.

Szakmai elődünknek tekintjük az első ízben 1961-ben megjelent Finommechanika című lapot, amely később a tartalmi változásokat követve Elektronikai Technológia, Mikrotechnika-ra változtatta nevét, és utolsó száma 2009-ben jelent meg. A szakma történetének több – mások mellett – olyan jeles képviselői publikáltak itt, mint Almássy György, Ambrózy András, Kolos Richárd, Hahn Emil, Ripka Gábor, akik mindannyian kötődtek tanszékünkhöz is.

A nagy közlési hatékonyságú nemzetközi kiadványokkal természetesen nem kívánunk versenyezni, de szeretnénk, ha az Elektronikai Technológia és Gyártásinformatika a szakterület hasznos hazai tájékoztatójává válna. Nem csak illik, hanem kell is tudni, hogy mit csinálnak, hol tartanak a hazai műhelyek és várjuk a szakterület felsőfokú képzésére vonatkozó közleményeket is. Ugyan az Elektronikai Technológia Tanszék alapította és gondozza a lapot, de minden közérdeklődésre számot tartó közleményt kérünk a különböző szakmai műhelyektől is.

A tapasztalt szerzők mellett várjuk a publikációs tevékenységet kezdők közleményeit is. A lektori testület számukra nem csak bírál, hanem segít is. A tematikai követelményeknek megfelelően nem kizárólag a szerkesztő bizottság tagjai lektorálnak, hanem eseti lektorokat is felkérünk.

A kor követelményeinek megfelelően a megjelenés alapformája elektronikus. A közleményeket DOI azonosítóval látjuk el. A könnyű hozzáférhetőséget a szabad, online elérhetőség biztosítja. A szerkesztés azonban úgy történik, hogy a letölthető .pdf formátumból bármely digitális nyomda irkafűzéses nyomtatott kivitel tud készíteni. A cikkek egyenként is letölthetők és nyomtathatók.

A nanofluidikai atomerőmikroszkóp: FluidFM

Nagy Ágoston Gábor^{1),2)}, Bonyár Attila²⁾, Horváth Róbert¹⁾

¹⁾ MTA EK MFA Nanobioszenzorika Lendület Kutatócsoport
1121 Budapest, Konkoly-Thege M. út 29-33, 26. épület 2. emelet 205

²⁾ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Egry József u. 18.
E-mail: ag.nagy@ett.bme.hu

Tartalmi kivonat. A FluidFM technológiája kombinálja a hagyományos atomerő mikroszkópot nanofluidikai csatornákkal és egy nyomásszabályozó eszköz rendszerével, mely fejlesztéssel a műszer átlép olyan mérés-technikai korlátokat, amelyek korábban csak magas technikai tudással és jelentős időráfordítással voltak elérhetőek. A FluidFM berendezés által lehetővé válik nanotechnológiai és elő-sejtes rendszerek interdiszciplináris vizsgálata, ami által betekintést nyerhetünk olyan elemi részletekbe, mint például a sejtdhézió vagy pedig a nanostruktúrák hatásai az élő rendszerekre.

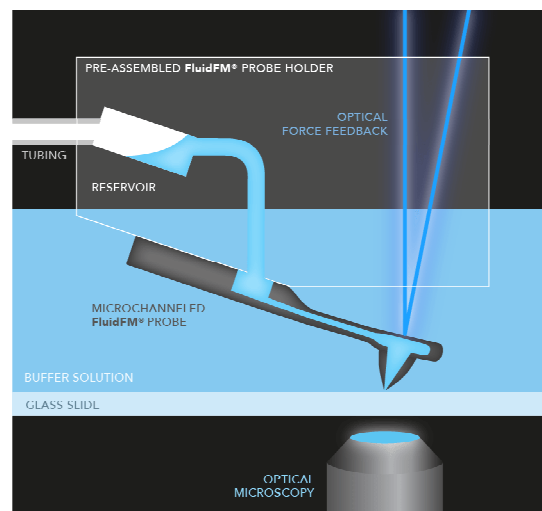
Kulcsszavak: FluidFM; atomerő mikroszkóp; nanofluidika; szilícium technológia; nanolitográfia

1. A FLUIDFM TÖRTÉNETE

A nanofluidikai atomerő-mikroszkóp technológiáját először 2009-ben írták le részletesen [1]. A nanofluidikával ellátott atomerő-mikroszkóp kutatása és technikai hátterének kidolgozása a 2000-es évek elején indult, azonban az eszköz kereskedelmi forgalomba hozatalában és fejlesztésében nagy szerepet játszott a Cytosurge AG, mely cég a zürichi technológiai főiskola (ETH Zürich) spin-off cége. A „fluidic force microscope”, avagy rövidebben FluidFM kombinálja a hagyományos atomerő mikroszkópot (atomic force microscope, AFM) nanofluidikai csatornákkal szabályozott rendszerével [1]. Az AFM technológiájának kidolgozásáért 1986-ban ítéltek oda a fizikai Nobel-díjat, és a műszer azóta is széleskörű népszerűségnek örvend, mivel nagy (akár atomi) felbontású képalkotást tesz lehetővé. Alkalmazása kiterjed az anyagtudományra, a műszaki tudományokra és az élettudományok számos területére is. Manapság számos alap és alkalmazott kutatási irányban az AFM rutinberendezésnek számít, amellyel felületi topográfiát és felületi fizikai kölcsönhatásokat (elektrosztatikus erő, mágneses erő, vezetőképesség-térképek, mechanikai tulajdonságok, stb.) lehet precízen leképezni, akár egyedi atom felbontással.

Az AFM talán legfontosabb része egy piezoelektromosan mozgatott, ismert geometriájú és igen hegyes tű (görbületi sugara ma már akár 10 nm alatti), amely a vizsgálni kívánt felszín pásztyázza

végig. Technikailag ez a tű egy ismert rugóállanddal rendelkező tartókonzolla, ún. rugólapkára van erősítve és így közösen alkotják a szondát. A rugólapkára irányított fókuszált lézerefény visszaverődésének valamint kitérésének detektálása teszi lehetővé a szondát érő erőhatások precíz leképezését. Topográfiai leképezéseknél a tű és felület között fellépő atomi vonzó és taszító kölcsönhatások játszanak szerepet, melyek a rugólapka elhajlását és így a visszaverődött lézerefény kitérését okozzák, melyet egy fotodetektorokból álló elrendezés érzékel [2]. Ennek köszönhetően tud az AFM mechanikai kölcsönhatásokat is kimérni, mert ha meghajlik a rugólapka, akkor a lézerefény arányos kitérése adja a számunkra értelmezhető fizikai paramétert.



1. ábra. A FluidFM kombinálja az AFM technológiáját nanofluidikai csatornákkal. A mérőszonda képes piko-Newtonos erőhatások kimérésére [3]

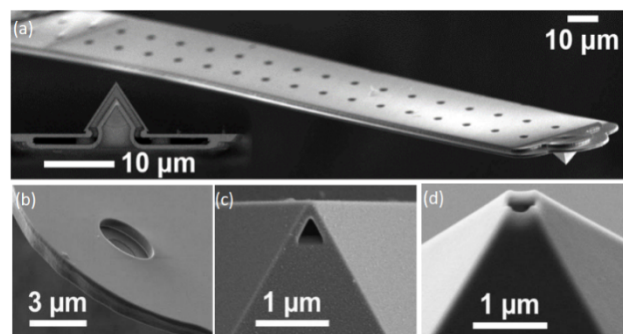
A FluidFM lényegében egy AFM berendezés, melynek pásztázó fejébe bevezettek egy nanofluidikai csatornát, amit összekapcsoltak egy nyomásszabályozó rendszerrel, így képesek vagyunk -800 és 1000 mBar között szabályozni a csatornában lévő folyadékoszlop mozgását. Ezen fejlesztéssel teret nyitottak a szélesebb körű felhasználásra, mint például kolloidális spektroszkópiára, élő sejtés vagy bakteriális rendszerek valós idejű mechanikai manipulációjára, illetve nanolitográfiás eljárásokra [3] (1. ábra).

2. A FLUIDFM MÉRŐFEJEK ELŐÁLLÍTÁSA

A FluidFM lehetőségeinek kiaknázását többféle kialakítású mérőfejek teszik lehetővé, melyek össze vannak kötve a folyadékmozgató rendszerrel. Először 2004-ben készítettek először nanofluidikával ellátott tűket [4], mely eljárás hasonló az AFM tűk gyártásához. Általában a tűk alapanyaga egykristályos szilícium vagy szilícium-nitrid (SixNy), melyet a klasszikusnak nevezhető fotolitográfiával kombinált anizotróp kémiai maratással alakítanak ki. A külön kialakított bemélyedéseket tartalmazó Si mikroszerkezetek bondolásával (ragasztásmentes kötésével) alakítják ki a mérőfejeket úgy, hogy bennükfusszon a nanofluidikai csatorna. A konzolok legfontosabb paramétereit – a rugóállandót és a rezonanciafrekvenciát – a konzol geometriai paramétereivel valamint a SiN-aránnyal, mint anyagi jellemzővel, lehet széleskörűen szabályozni. A konzolok rezonancia frekvenciája általában 1 kHz-től 1MHz-es tartományban mozog és a rugóállandójuk 0,01-től egészen 50 N/m-ig terjed. Jellemzően puhább (kisebb rugóállandójú) szondát kapunk, ha magasabb szilícium-nitrid tartalmat alkalmazunk a készítés során. A csúcsos háromszögben végződő hasáb a konzol tipikus geometriája, melynek a végén található a 15 nm-nél kisebb lekerekítési sugarú tű. A FluidFM mérőfejei is a hagyományos SixNy vegyületből állnak, és egy ilyen rugólapkán egy-vagy akár többcsatornás rendszerek is kiépíthetők. A nanofluidikai csatornák kivezetőnyílása általában egy piramis csúcsán vagy mellette elhelyezkedő nyílás, amit fotolitográfiával, vagy fókuszált ionnyalábos anyageltávolítással állítanak elő [4].

3. A FLUIDFM KÜLÖNBÖZŐ TÍPUSÚ MÉRŐFEJEINEK ALKALMAZÁSA

A FluidFM három típusú mérőfejjel rendelkezik, amelyekkel különböző alkalmazások és kísérletek valósíthatók meg (2. ábra). A FluidFM mikropipetta feje nem rendelkezik túszerű struktúrával a konzol végén, csupán egy kör alakú kivezető nyílás ad utat a fluidikának. Ezek a mérőfejek elsősorban sejtadhéziós mérésekre lettek kifejlesztve (2. ábra. a)), segítségével sejtmechanikai erőhatásokat tudunk mérni a piko-Newtonos skálán. A mikropipetta mérőfej kivezetése 2-8 μm átmérőjű, azonban amíg ez az átmérő is meglehetősen kicsinek számít, addig a FluidFM nanopipetta mérőfejének átmérője 300 nm, mely mérőfej hagyományos túszerű struktúrájú és a piramis csúcsán helyezkedik el a fluidika kivezető nyílása (2. ábra. d)). A nanopipetta mérőfeje leginkább bakteriális adhézió méréséhez vagy nanolitográfiához használatos. A legkisebb átmérőjű mérőfej a gyorsprototipizáló fej, melynek kivezető csatornája 30 nm-es átmérőjű és elsősorban femtoliter mennyiségű folyadékok célzott célbajuttatásáért felel (2. ábra. c)). Segítségével képesek vagyunk sejteket megjelölni fluoreszcens festékekkel, vagy esetleg gyógyszermolekulákat célzottan a sejttesten belülről fecskendezni.

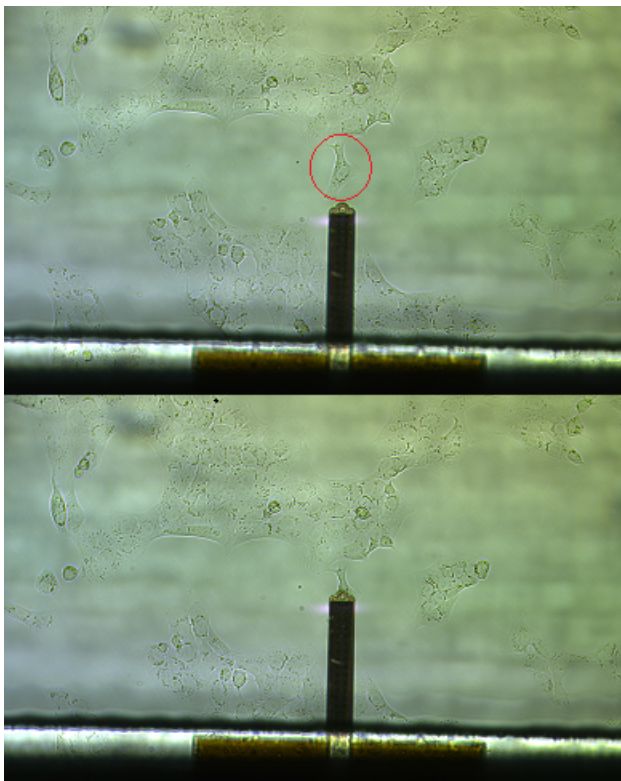


2. ábra. A FluidFM mérőfejek elektronmikroszkópos képei: a) a FluidFM mérőszondájának geometriai elrendezése; b) a mikropipetta mérőfej; c) a gyorsprototipizáló mérőfej; d) a nanopipetta mérőfej [5]

4. A FLUIDFM JÖVŐJE

Habár a technológia már egy évtizede ismert és a rendszert, valamint a belőle származó eredményeket már több rangos nemzetközi folyóiratban is publikálták [6,7], valóságos fellendülés következhet be technológiai újításoknak köszönhetően. A FluidFM működési sokoldalúsága erős

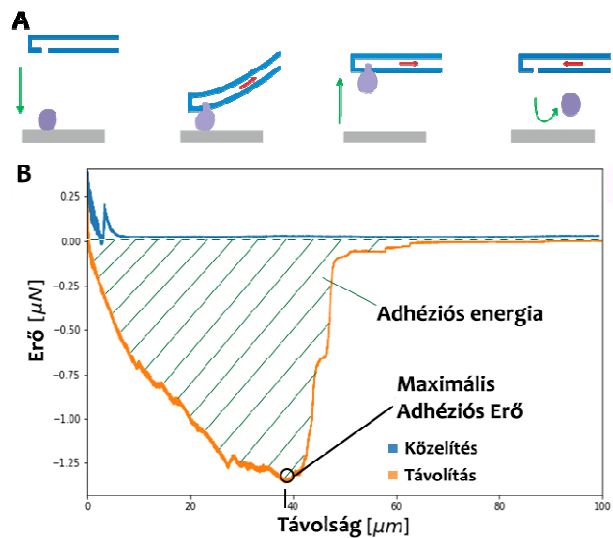
háttértámogatást nyújthat interdiszciplináris kutatásoknak, hiszen számos funkciója rávilágíthat eddig nem vizsgált, sőt esetleg ismeretlen eredetű jelenségekre. A Cytosurge AG. egyik legújabb fejlesztése a FluidFM Bot, amely egy nagyáteresztőképességű robotizált FluidFM berendezés, melynek segítségével képesek vagyunk automatizált méréseket végezni. Például amíg a sejtdhézió területén korábban csak 1–2 mérés volt lehetséges a technológiai korlátok miatt, a FluidFM Bot akár 10–20 mérést is képes kivitelezni egy órán belül (3. ábra). A fekete színű szonda egy sejt kultúra felett adott parancsra megközelíti a mérni vagy manipulálni kívánt egyedi élő sejtet (piros kör), amelyhez $\mu\text{m/s}$ -os sebességgel közelít. Amikor elérte a kívánt felület és szonda között kialakult erőhatást (kb. 3 nN [1]), akkor szívó hatást fejt ki a szétterült sejt. Egy kis várakozás után eltávolodik a felszíntől és felszakítja a sejtet az aljatról. Nyomás ráadásával a mért sejt eltávolítható a konzolról. Utóbbi folyamat során meghatározható a sejt adhéziós ereje és adhéziós energiája (4. ábra).



1. ábra. A FluidFM adhéziómérés közben

A magyar kutatási életben is jelen van ennek a technológiának az alapkövei, ugyanis Dr. Horváth Róbert által vezetett MTA EK MFA Nanobioszenzorika Lendület Kutatócsoportban üzemeltek be egy új FluidFM Bot-ot 2017-ben. A

csoport célja olyan jelölésmentes, modern biofizikai módszerek fejlesztése és alkalmazása az élettudományok különböző területein, amelyek ipari és tudományos szignifikanciával bírnak [8].



4. ábra. Sejtdhézió mérés: a) sejtdhézió mérésének folyamata [3]; b) a FluidFM segítségével minden sejtire egyedi jellegű erő-távolság görbét tudunk kimérni, amelyből számos információ kinyerhető

A FluidFM működésének kulcsfontosságú pontja a precízen szabályozott nanofluidikai rendszer, mellyel egyszerre tudunk szívást illetve nyomást kifejteni az adott rendszerre, és ezáltal vagyunk képesek nanolitográfias nyomtatásra, élő organizmusok sérülésmentes „megfogására” és felületi kitapadásuk kvantitatív vizsgálatára, mikroszkopikus objektumok nagy precizitású mozgatására. Túllépve az AFM korlátait, a FluidFM olyan automatizált, minimális anyagmennyiségű mérésekre ad lehetőséget, melyeket korábban csupán nagy körültekintéssel vagy egyáltalán nem lehetett megoldani. Hasonló nanofluidikai rendszerek már bizonyítottan jelen vannak a mindennapi orvosi diagnosztikában, mint például a „lab-on-chip” eszközök, melyek a gyors, hordozható és megbízható diagnózis felállításában segíthetnek. Elképzelhető, hogy a FluidFM technológiáját hamarosan a klinikai diagnosztikában is alkalmazni fogják, ugyanis számos kutatás korrelációt mutatott ki a sejtek rugalmassága és gyulladásra, vagy tumoros elváltozásra való hajlamuk között [9,10]. Ilyen és hasonló biológiai információk kvantitatív tanulmányozására kifejezetten alkalmas a FluidFM, mert pl. egyszerűen, kis mintamennyiségből meg lehet határozni, hogy egy adott páciens sejtjei

milyen tumorokra jellemző rugalmassági paraméterekkel rendelkeznek, és ezért a technológia segíthet egy korai diagnózis felállításában is. Továbbá mivel a FluidFM képes femtoliteres folyadék mennyiségek célzott célbajuttatására, ezért lehetőség nyílik minimális anyagfelhasználás mellett rákos sejteket tesztelni, hogy milyen tumorelleses gyógyszerekre rezisztensek vagy érzékenyek, és így a FluidFM technológia költséghatékony és újszerű utakat nyithat meg a hatékonyabb terápiák kidolgozásában is.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Meister A., Gabi M., Behr P., Studer P., Vörös J., Niedermann P., Bitterli J., Polesel-Maris J., Liley M., Heinzmann H., Zambelli T., „FluidFM: Combining Atomic Force Microscopy and Nanofluidics in a Universal Liquid Delivery System for Single Cell Applications and Beyond”, *Nano Lett.*, 9. évfolyam, 6. szám, 2501-2507 o., 2009.
<https://doi.org/10.1021/nl901384x>
- [2] Binnig G., Quate C.F., Gerber C., „Atomic Force Microscope”, *Phys. Rev. Lett.*, 56. évfolyam, 930-933 o., 1986.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.930>
- [3] <https://www.cytosurge.com/>
- [4] Deladi S., Tas N.R., Berenschot J.W., Krijnen G.J. M., de Boer M. J., de Boer J. H., Peter M., Elwenspoek M.C., „Micromachined fountain pen for atomic force microscope-based nanopatterning”, *Appl. Phys. Lett.*, 85. évfolyam, 5361-5363 o. 2004.
<https://doi.org/10.1063/1.1823040>
- [5] <http://smartmanufacturingseries.com/wp-content/uploads/2017/10/zambelli.pdf> (2017)
- [6] Sancho A., Vandersmissen I., Craps S., Luttun A., Groll J., „A new strategy to measure intercellular adhesion forces in mature cell-cell contacts”, *Sci. Rep.*, 7. évfolyam, 46152, 2017.
<https://doi.org/10.1038/srep46152>
- [7] Sankran S., Jaatinen L., Brinkmann J., Zambelli T., Vörös J., Jonkheijm P., „Cell Adhesion on Dynamic Supramolecular Surfaces Probed by Fluid Force Microscopy-Based Single-Cell Force Spectroscopy”, *ACS Nano*, 11. évfolyam, 3867-3874 o., 2017.
<https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00161>
- [8] <http://nanobiosensors.com/>
- [9] Guillaume-Gentil O., Potthoff E., Ossola D., Franz C.M., Zambelli T., Vorholt J.A., „Force-controlled manipulation of single cells: from AFM to FluidFM”, *Trends Biotechnol.*, 32. évfolyam, 7. szám, 381-388 o., 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.04.008>
- [10] Cross S.E., Jin Y., Rao J., Gimzewski J.K., „Nanomechanical analysis of cells from cancer patients”, *Nat. Nanotechnol.*, 2. évfolyam, 780-783 o., 2007.
<https://doi.org/10.1038/nnano.2007.388>

Mangánnal mikroötvözött ólommentes forrasztóvetetek fejlesztése az elektronikai ipar számára

Szurdán Szabolcs¹⁾, Medgyes Bálint²⁾, Mende Tamás³⁾

¹⁾ Metalloglobus Fémöntő és Kereskedelmi Kft., 1108 Budapest, Sírkert út 2-4.

²⁾ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Egry József u. 18.

³⁾ Miskolci Egyetem

Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros, B. épület
E-mail: szurdan@mtgfemonto.hu

Tartalmi kivonat. Munkánk során mangánnal mikroötvözött alacsony ezüsttartalmú forrasztóveteket gyártottunk, (SAC0307Mn0,1, SAC0307Mn0,4, SAC0307Mn0,7) majd megbízhatósági vizsgálatokat végeztünk azokon. A tesztek során az elektronikai iparban elterjedten alkalmazott SnAg3Cu0.5 (SAC305) forrasztóvetetet választottuk referenciának. Első lépésként kikísérleteztük a gyártáshoz szükséges ötvözesi paramétereket, majd az új forrasztóvetetek kristályosodási hőmérsékleteit határoztuk meg. Az ötvözeteken különböző mechanikai anyagvizsgálatokat végeztünk el; keménységmérés, szakítószilárdság és nyíróerő vizsgálatok. Az eredmények azt mutatták, hogy bizonyos mechanikai tulajdonságokon javíthat a SAC ötvözetekhez adott Mn mikroötvöző.

Kulcsszavak: forrasztóvetet; ólommentes; mangán; mikroötvöző; elektronika

1. BEVEZETÉS

A XXI. században a cél a minél kisebb méretű és tömegű elektronikai eszközök gyártása fokozódó jelterjedési sebesség és alacsonyabb ár elérése mellett. Az elektronikai eszközök többségét forrasztási technológiával állítják elő, ezért a forrasztáshoz használt ötvözetek fejlesztése is célja a gyártóknak. A forrasztóötvözetekkel szemben különböző követelményeket támasztanak a teljesség igénye nélkül: megfelelő elektromos vezetőképesség, mechanikai megbízhatóság, alacsony olvadáspont és költséghatékonyság. Korábban az ólom tartalmú forrasztók jó mechanikai és forrasztási tulajdonságokkal rendelkeztek, ezek használatát azonban az Európai Unió RoHS és a WEEE direktíváinak bevezetése után korlátozták és a forrasztó anyagok gyártóinak és felhasználóinak át kellett állniuk az ólommentes ötvözetekre. Ezen ötvözetek még napjainkban is fejlesztés alatt állnak [1–3].

Az ólommentes forrasztóvetetek alkalmazása során problémaként lépett fel például a magasabb olvadáspont, a rosszabb nedvesítési tulajdonság, valamint a relatív magas piaci ár. Továbbá a forrasztási vizsgálatok során különböző forrasztási hibák alakultak ki. A legáltalánosabban használt ólommentes ötvözetek közül az ón – ezüst – réz, az

úgynevezett SAC háromalkotós fémötvözetek típusai terjedtek el. A nagyon magas piaci ár miatt a fejlesztések egyik ága az ezüst tartalom csökkentésére irányul, amit az úgynevezett mikroötvözők hozzáadásával helyettesítenek. A cél olyan mikroötvözött, alacsony ezüst tartalmú forrasztóanyag kifejlesztése, amelynek a tulajdonságai hasonlóak, esetleg jobbak a magas ezüst tartalmú ötvözetekhez képest. Forrasztóvetetek esetében az egyik fő cél, hogy a kristályosodás befejező hőmérsékletét csökkentsük, ami által kiszélesedik a forrasztás technológiai ablaka [4]. Munkánk során eltérő Mn tartalmú SAC ötvözeteket gyártottunk, majd különböző megbízhatósági vizsgálatokat végeztünk el, mely során a SAC305-ös típus volt a referencia.

2. ÖTVÖZETEK ELŐÁLLÍTÁSA

Az ötvözeteket egy 300 kg-os grafit üstben állítottuk elő, ahol első lépésként az alacsony ezüsttartalmú SAC0307 előötvözetet készítettük el. Ezek után következett a mangán, mint mikroötvöző adagolása. Az ötvözők bevitelének nehézsége miatt az ötvözeset egy grafit haranggal végeztük, amely segítségével az ötvöző fémeket az olvadék aljára helyeztük, ahol 800°C-on 3 órán át tartott az ötvözes. Ez idő alatt az előötvözet olvadáspontjánál magasabb olvadáspontú fém a mangán feloldódása

megtörtént, majd egy grafit keverő segítségével homogenizáltuk az ötvözeteket, melyek kémiai elemösszetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Forraszötövözetek elemösszetétele (tömeg%)

Ötvözet	Ón	Ezüst	Réz	Mangán
SAC0307Mn0,1	R	0,35	0,77	0,08
SAC0307Mn0,4	R	0,36	0,8	0,49
SAC0307Mn0,7	R	0,4	0,82	0,69
SAC305	R	3,05	0,52	–

3. MEGBÍZHATÓSÁGI VIZSGÁLATOK

3.1. A lehülési görbe meghatározása

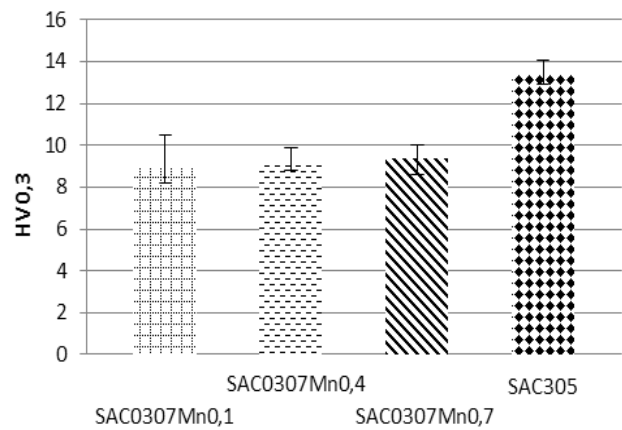
Annak érdekében, hogy megállapítsuk az ötvözetek kristályosodásának kezdő és befejező hőmérsékletét, az ötvözetek 400 °C-on történő megömlesztése után, az olvadékot 250 °C-ra előmelegített acél kokillába öntöttük, és az olvadék hőmérsékleti adatait a lehülés során számítógépes adatrögzítővel gyűjtöttük. A lehülési görbék kiértékelése után megállapítottuk, hogy a kristályosodás kezdő, valamint befejező hőmérséklete ilyen mértékű mangán tartalmú ötvöztől nem függ jelentősen.

4. MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

Az előállított ötvözetek megbízhatósági vizsgálatait különböző mechanikai tesztek elvégzésével kezdtük. A vizsgálatainkat a keménységméréssel kezdtük, amely során egy Instron Wilson Tukon 2100 B gyártmányú vickers keménységmérő berendezést alkalmaztunk 0,3 kg terhelőerővel és 10 másodperces terhelési idővel. A mintáinkon darabonként 5 mérést végeztünk el, majd ezeket az adatokat egy táblázatban összefoglaltuk és az 1. ábrán mutatjuk be.

4.1. Keménységmérés

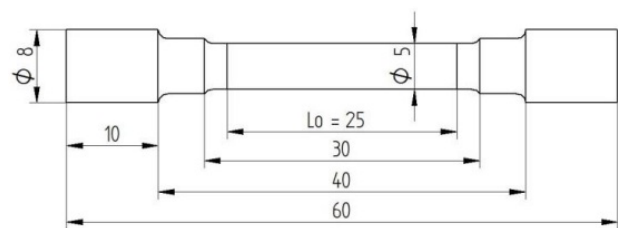
Az 1. ábrán megfigyelhető, hogy a keménységi értékek a mangán ötvözés hatására nem növekednek számottevően. Az 1. ábrán látható, hogy az iparban leggyakrabban alkalmazott SAC305 ötvözet keménységi értékéhez képest a 0,7% mangán tartalmú ötvözet körülbelül 30%-kal marad el. Mivel a SAC305-ös ötvözet keménységét a viszonylag magas 3% ezüst tartalom adja. Megfigyelhető a mérési adatok alapján, hogy a mangán ilyen mértékű ötvözése nem növeli jelentősen a keménységet.



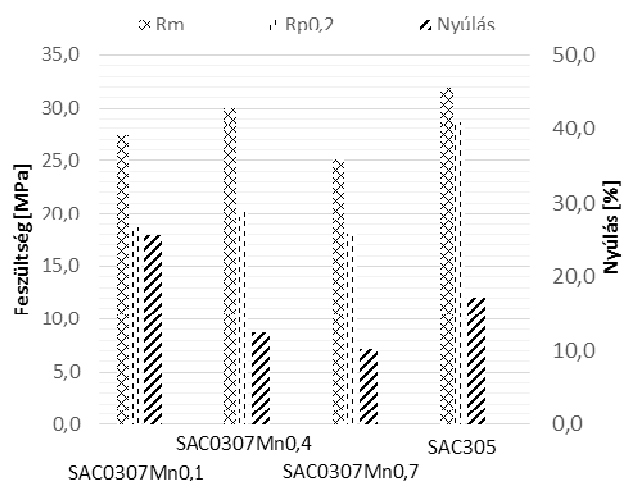
1. ábra. Kísérleti forraszanyagok keménységi értékei

4.2. Szakítóvizsgálat

Az ötvözetekből szabványos (DIN – EN – 50125) hengeres szakító próbatesteket készítettünk (2. ábra), majd egy Instron 5982 típusú, 10 tonnás univerzális anyagvizsgáló berendezéssel végeztük el a szakítóvizsgálatokat. A vizsgálatot állandó sebességgel, 3 mm/perc egytengelyű húzó igénybevétellel végeztük. A szakító próbatestek jellemző méreteit a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. Szakító próbatestek jellemző méretei [mm]



3. ábra. Szakítószilárdsági (Rm), egyezményes folyáshatár (Rp0,2) és a nyúlás értékek

Az eredmények alapján látható (3. ábra), hogy a Mn ötvöző hozzáadásával a szakítószilárdsági és az egyezményes folyáshatári értékek növekednek a 0,1% és a 0,4% mangán tartalmú ötvözet esetében,

majd a mangán 0,3% további hozzáadása után a kissé csökkennek. A nyúlás értékek a 0,1% mangán tartalom esetében a legmagasabb, majd a további ötvözés következtében csökkennek. A vizsgálat során ötvözetenként 2-2 db mintán végeztük el a szakító kísérletet. A diagramon látható, hogy a SAC0307Mn0,4 szakítószilárdsági eredménye hasonló eredményt mutat, mint a SAC305 ötvözet értéke.

5. FORRASZTOTT KÖTÉSEK VIZSGÁLATA

Célunk volt, hogy mindenképp készítsünk olyan valódi forrasztási igénybevétel szimuláló vizsgálatot is, melynek alapján össze tudjuk hasonlítani az általunk készített ötvözeteket a gyakorlatban alapötvözetnek számító SAC305 ötvözzel.

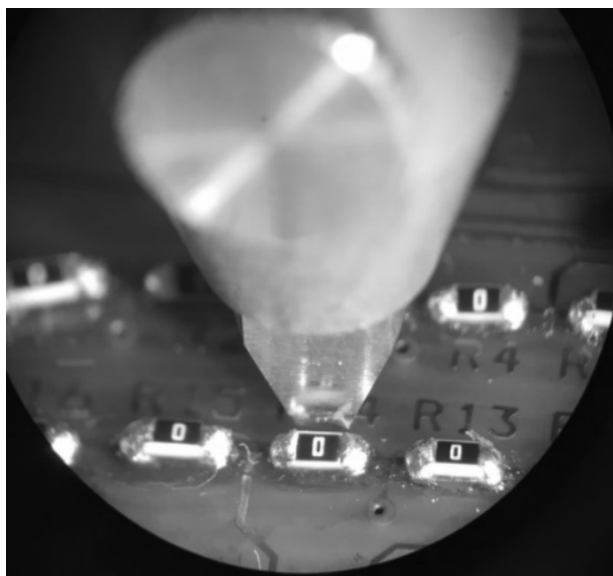
Már kezdetben probléma lépett fel, milyen formában állítsuk elő a forrasztanyagot és hogyan juttassuk a számunkra legyártott nyomtatott huzalozású lemez (NyHL) felületére. A legtökéletesebb és a legjobban szabályozható technológia a paszta formájában történő felvitel lett volna (stencilnyomatás), de sajnos nem tudunk ilyen kis mennyiségben forrasz pasztát készíteni ebből az ötvözetből. A NyHL 38x36 mm négyzet szelvényű lemezt, a forrasztási felületek (PAD-ek) méretét 1x1 mm-re, anyagát pedig immerziós ezüstnek (iAg) választottuk. A forrasztanyagot a Metalloglobus Fémöntő és Kereskedelmi Kft-nél 1 mm átmérőjű huzal formájában állítottuk elő, majd egy ötvös duó-hengerállvánnyal tovább alakítottuk 0,26 mm vastagságú szalag végtermékké. Ezek után következett a szalag feldarabolása kézi ollóval, amelyet végül a méret szerinti válogatás követett. A válogatás szabad szemmel történt, ezért a forrasztanyag NyHL-re történő felhordásának mennyisége körülbelül 10 %-os hibával vehető figyelembe. A forrasztóötvözetek felvitele a mérőlemeze a következő lépésekben történt:

- a NyHL megtisztítása izo-propil-alkohollal (IPA)
- folyasztószer (X33-125 típusú) felvitele a mérőlemeze
- mérőlemezek (NyHL) megtisztítása IPA-val
- flux adagolása a forrasztási felületekre

- a forrasztóötvözet lapok felvitele a forrasztási felületekre

Ezek után következett az ellenállások beültetése, ahol 0 ohmos felületszerelhető (SMD) 0603-as méretkódú ellenállásokat használtunk. Egy SMT Systems DIMA típusú pneumatikus beültető berendezéssel végeztük a beültetést.

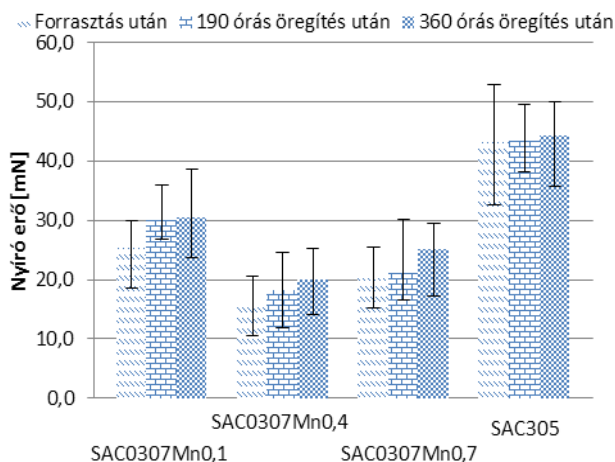
Ötvözetenként 4 db mérőlemezen végeztük el a forrasztási kísérleteket, lemezenként 16 db ellenállással, ami összesen 256 db mérési pontot jelentett. A forrasztást Euro Circuits gyártmányú elektromos infrásugaras újraömlésztéses (reflow) berendezéssel végeztük, miközben a hőmérsékleti értékeket számítógépen regisztráltuk, így megkaptuk a mérőlemez hőmérsékletének időbeni lefutását (hőprofil). Minden ötvözet esetében ugyanazt a hőprofilot használtuk. A forrasztott kötés minősítése érdekében minden egyes mérőlemez esetében megmértük az ellenállásokat Hewlett Packard 34401A típusú multiméter mérőkészülék segítségével (négy vezetékes mérés). A forrasztott kötések nyíró igénybevételű terheléssel szembeni ellenállását Dage 2400 típusú nyíróerő mérőberendezéssel vizsgáltuk meg (4. ábra). A vizsgálatokat először közvetlenül forrasztás utáni állapotban, majd 190 órás, végül 360 órás öregítés után is elvégeztük 80 °C-os terhelés mellett.



4. ábra. Nyíróerő mérése vizsgálat közben

A nyíróerő vizsgálat eredményeit az 5. ábrán foglaltuk össze. Észrevehető, hogy minden ötvözet esetében az öregítés hatására némileg növekednek a

nyíró erő értékek. A mangán tartalmú ötvözetek esetében az öregítési idővel nagyobb nyíróerő növekedést tapasztaltunk, mint a SAC305-nél. A SAC0307Mn0,1 típusú ötvözet esetében a kezdeti 25,4 N értékről 190 óras 80°C-on történő öregítés után közel 20%-ot emelkedett a nyíróerő és további 170 óras öregítés után további 1%-ot növekedett, szemben a SAC305 ötvözet növekedési tendenciájával.



5. ábra. Forrasztótvözetek nyíró erő mérési eredményei reflow után, valamint 190 óra, 80° C és 360 óra, 80°C-os terhelés után

A SAC0307Mn0,4 típusú ötvözet esetében a forrasztás után 16,3 N volt a mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállás értéke, majd 190 óras öregítés után 12%-ot, a 360 óras öregítés után további 9%-ot növekedett. A SAC305 ötvözet értékei magasabbak, a forrasztás utáni állapotban végzett kísérlet eredményei alapján a nyíróerő 43,2 N volt, és ez az öregítés hatására kis mértékben változott, 190 óra után 0,5%-ot, míg 360 óras öregítés után is csak további 2%-ot emelkedett. Lee és munkatársai [5] is ezt a tulajdonságot vizsgálták és hasonló eredményre jutottak. Mások [5, 6] vizsgálati eredményeiből megállapítható, hogy a mangánnal ötvözött alacsony ezüsttartalmú ötvözet IMC rétegvastagsága megnő, azonban hosszabb öregítési ciklusok után a vastagság kisebb mértékben növekszik és a szövetszerkezet is finomabb marad, ennek köszönhetően a nyírószilárdság megnövekszik.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során SAC ólommentes forrasztótvözetek mangánnal történő ötvözésének

lehetőségeit kutattuk és különböző megbízhatósági vizsgálatokat is elvégeztünk. Célunk volt, hogy megvizsgáljuk a mangán tartalom hatását az alacsony ezüsttartalmú ólommentes SAC forrasztók esetében, mind a mechanikai tulajdonságok, illetve a gazdaságossági szempontok figyelembe vételével. A keménységvizsgálati eredményekből kiderült, hogy a forrasztótvözethez hozzáadott mangán csökkentheti a keménységet, valamint számottevően nincs hatással a kristályosodás hőmérsékletére. A szakítóvizsgálati eredmények alapján látható, hogy az ólommentes forrasztótvözethez hozzáadott Mn hatására a szakítószilárdsági értékek némileg csökkennek. A forrasztási vizsgálatok után kiderült, hogy az általunk készített ötvözetek nem érik el a SAC305-ös ötvözet mechanikai szilárdságát. Ugyanakkor a forrasztott kötések öregítés utáni állapotának vizsgálata megerősítette a korábbi szakirodalmi közléseket, miszerint a hosszabb öregítési időtartam során a mechanikai szilárdsága a Mn tartalmú forrasztott kötéseknek nagyobb mértékben növekszik, mint a SAC305 ötvözeteké. Jóllehet a mangánnal ötvözött SAC ötvözetek mechanikai paraméterei általában rosszabb értékek mutattak a SAC305-ös képest, de a forrasztáshoz szükséges minimum követelményt több esetben elérték illetve meghaladták. Összességében mind a gazdasági, mind a mechanikai tulajdonságokat is figyelembe véve a mangánnal mikroötvözött SAC0307-es forrasztótvözet ipari alkalmazását javasoljuk.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Büyök U., Marasli N., „The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn-Ag-Cu eutectic alloy”, *J. Alloy. Compd.*, 485. évfolyam, 264-269 o., 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.067>
- [2] Molnár A., Kardos I., Molnár I., Gácsi Z., „Az ezüsttartalom hatása ólommentes forrasztanyagok tulajdonságaira”, *Bányászati és Kohászati Lapok*, 147. évfolyam, 2. szám, 17-20 o., 2014.
- [3] Horváth B., „Az RoHS direktívái és a tiltott anyagok vizsgálata XRF berendezéssel”, Diplomamunka, *Budapesti Műszaki Egyetem*, Budapest, 2008.
- [4] Óbudai Egyetem, levelező tagozat Elektronikai technológia előadás, www.uni-obuda.hu/grollerg/Elektronikaitechnologia/Prezentacio/levelezo-tav-16/4-szeresles.pdf /megtekintés: 2017. 02.11.

- [5] Lin L.W., Song J.M., Lai Y.S., Chiu Y.T., Lee N.C., Uan J.Y., „Alloying modification of Sn–Ag–Cu solders by manganese and titanium”, *Microelectron. Reliab.*, 49. évfolyam, 235-241 o., 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.10.001>
- [6] Song J.M., Liu Y.R., Lai Y.S., Chiu Y.T., Lee N.C., „Influence of trace alloying elements on the ball impact test reliability of SnAgCu solder joints”, *Microelectron. Reliab.*, 52. évfolyam, 180-189 o., 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.09.003>

Mangán mikroötvözős forrasztóanyag mikroszerkezetének vizsgálata elektrokémiai módszerekkel

Hurtony Tamás, Krammer Olivér

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Egrý József u. 18.
E-mail: hurtony@ett.bme.hu

Tartalmi kivonat. Jelen munkánk során magánnal adalékolt ón-ezüst-réz alapú ólommentes forrasztóanyag mikroszerkezetét hasonlítottuk össze hagyományos SAC305 (Sn96.5/Ag3/Cu0.5) forrasztóanyaggal. A 0,1 a 0,4 vagy 0,7 tömegszázalék mangánt tartalmazó forrasztóanyagból FR4-es hordozón kialakított tesztmintázaton, újraömlésztési technológiával forrasztódombokat hoztunk létre. A forrasztódombokról keresztmetszeti csiszolatot készítettünk, melyeket energiadiszperzív spektrométerrel felszerelt pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. Speciális elektrokémiai maratási technológiát alkalmazva eltávolítottuk a forrasztott kötések keresztmetszeti csiszolatából a tiszta ónt, hogy az intermetallikus finomszerkezet láthatóvá tegyük. Az így feltárt mikroszerkezet sajátosságait vizsgáltuk a mangánt tartalmazó és hagyományos forrasztók esetében. Magas mangán tartalmú kiválókat láttunk a forrasztó tömbi anyagában, melyek szemcsefinomító hatásuk révén hatást gyakorolhatnak a forrasztott kötés mechanikai tulajdonságaira. Továbbá a mangán hatással volt a kialakuló Cu_6Sn_5 intermetallikus struktúrák morfológiájára. A mangán tartalom hatására hosszú túrkristályoszerű képződmények jelentek meg a tömbi anyag teljes térfogatában. Ezen kívül a az Ag₃Sn intermetallikus vegyületek ahelyett, hogy ideális esetben a teljes térfogatot átszövő finom szerkezetet hoztak volna létre, a mangán tartalmú szemcsék közvetlen közelében formálódtak.

Kulcsszavak: ólommentes forrasztóanyag; mangán ötvöző; újraömlésztési forrasztás; metallográfia; szelektív elektrokémiai maratás

1. BEVEZETÉS

A 2002-ben megfogalmazott és 2006-ben bevezetett EU RoHS (Restriction of Hazardous Substances) direktíva értelmében az elektronikai ipar számos szegmenséből száműzték a veszélyes anyagokat, többek között a legelterjedtebben alkalmazott ón-ólmot forrasztóanyag egyik fő alkotóelemét, az ólmot is. Ez a változás ösztönözte az új ólommentes forrasztóanyagokkal kapcsolatos kutatásokat. Az intenzív kutatások eredményeként az ón-ezüst-réz (Sn-Ag-Cu – SAC) tartalmú ötvözetek váltak egyeduralgokká. Ezekről általánosságban elmondható, hogy az olvadáspontjuk lényegesen magasabb a korábbi ólom tartalmú forrasztóanyagokéhoz képest. Az emelkedett technológiai hőmérséklet az optimális kötés kialakításához szükséges paraméterek beállítására az alkatrészek és a szerelőlemez hőkárosodása nélkül sokkal kisebb mozgásteret enged a szakemberek számára. A legnagyobb előszeretettel alkalmazott SAC305 (Sn96.5/Ag3/Cu0.5) ötvözet nem megfelelő hűlési meredekég (>1,5 K/s és <5-6 K/s) alkalmazása

mellett közismerten hajlamos lemezes szerkezetű Ag₃Sn intermetallikus vegyületeket kialakítására, ami a gyengíti a forrasztott kötések, különösen impulzusszerű behatásokkal szemben, (pl. ejtésteszt alkalmával fellépő erők). Ez a jellemző viselkedés a forrasztóanyag relatíve magas, jellemzően hipereutektikus (>1,35 tömeg%) ezüst tartamának a következménye. [1]. Egy átlagos felületszerelt áramkör panelján több ezer kötés kerül egyidőben kialakításra, ezért még a hőprofil precíz beállítása [2] és szigorú ellenőrzése [3] mellett is előfordul, hogy egyes kötések minősége elmarad az elfogadható mértéktől.

A különböző hőkapacitású alkatrészekkel szerelt áramkör esetében a hűlési meredekség nem minden kötés esetében tartható a kívánt technológiai határokon belül, ezért az újgenerációs forrasztóanyagok esetében az ezüsttartalom tudatos csökkentésére irányuló törekvések érvényesülnek. Az ezüsttartalom csökkentésével párhuzamosan új ötvözőket kevernek (Pl. Bi, Ni, Mn stb.) a forrasztóanyagba, hogy javítsák a forrasztó nedvesítési és termomechanikai tulajdonságait. Chen és

munkatársai bizmottal adalékolt SAC forrasztanyagok olvadási és mechanikai tulajdonságait vizsgálták [5]. Eredményeik alapján elmondható, hogy a Bi szilárd oldatot képez az ónnal és ezáltal gátolja a diszlokációk vándorlását. Végeredményben a Bi-tal adalékolt SAC forrasztanyag mechanikai tulajdonságai javultak. Ugyanakkor azt is meg kell említeni, hogy a Bi adalékolás jelentős mértékben lenyomja a forraszt olvadási hőmérsékletét, mely egyes alkalmazások szempontjából nem kívánatos. Liu és munkatársai szintén Bi-tal adalékolt forrasztanyagok keménységét és nyíró igénybevétellel szembeni ellenállásukat vizsgálták [6]. Azt találták, hogy 8 tömeg% vagy e feletti mennyiségben adalékolt Bi szubmikronos struktúrák kialakulásához vezet, melyek a keménységet ugyan növelik, de a nyíró igénybevétellel szembeni ellenállást csökkentik. Gyakran használnak SAC típusú forrasztok adalékozására nikkelt, antimon, vagy cinket. Például Roa és munkatársai megmutatták, hogy a cinkkel adalékolt SAC ötvözetek mikroszerkezete finomodik, ami a mechanikai tulajdonságok szempontjából kedvező [7]. Benabou és a kollégái a nikkelt és antimon mint ötvöző hatását vizsgálták [8]. Azt találták, hogy a szilárdfázisú öregítés során növekvő intermetallikus határreteg (Cu_6Sn_5 and Cu_3Sn) kisebb mértékben vastagodik az ötvözők hatására, ami a forrasztott kötések hosszútávú megbízhatóságában fontos tulajdonság. A technológiai paraméterek ígéretesen befolyásolhatók például nanorészecskék hozzáadásával. Yakymovych és kollégái eredményei alapján javasolt a mechanikai tulajdonságok javítása céljából 2 tömegszázalék alatti mennyiségben Ni és Ni_3Sn_2 nanorészecskék hozzáadása [9]. Ani és munkatársainak TiO_2 nanorészecskékkel folytatott kísérleteikben megmutatták, hogy a nanorészecskék egyenletesen oszlanak el a forraszt tömbi anyagában, és hogy hatásokra javulnak a nedvesítési tulajdonságok [10]. Ban és a kollégái magas hőmérsékletű élettartam vizsgálatok során megmutatták, hogy a réz nanorészecskék hatására csökken az intermetallikus határreteg növekedési sebessége, ami kedvez a hosszútávú megbízhatóságnak [11].

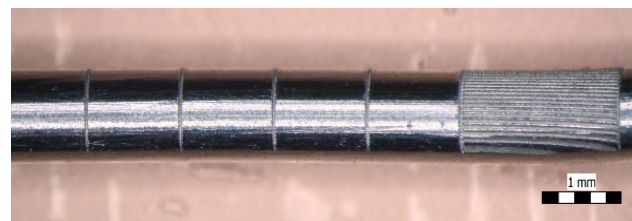
A mangán és cérium adalékok használata bizonyítottan növelte az ejtéstesztekkel szemben

mutatott ellenállását a forrasztoknak. [12]. Míg mások eredményei szintén azt támasztják alá, hogy a mangán tartalom javítja a dinamikus igénybevétellel szemben mutatott ellenállást [13]. Lin eredményei alapján jól látszik, hogy a mangán adalékolás hatására csökken a forrasztok rugalmassági modulusa [14]. A 0,05 tömegszázalékban adagolt mangán nanoszemcse jelentős mértékben javította a SAC alapú forrasztötvözet nedvesítési tulajdonságait [15].

Összességében elmondható, hogy bár a különféle ötvözők makroszkópikus tulajdonságokra gyakorolt hatása intenzíven kutatott terület, kevesen vizsgálják az új elemek hatására létrejövő mikroszerkezet alaki sajátosságait. Jelen munkánk során különböző mennyiség mangánnal adalékolt forrasztok mikroszerkezetét vizsgáljuk és hasonlítjuk SAC305-ös referencia minták szerkezetéhez.

2. MINTAELŐKÉSZÍTÉS

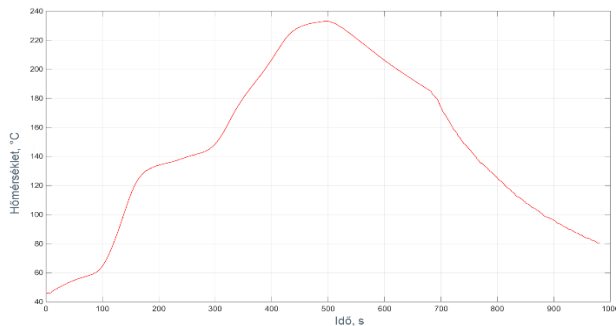
35 μm vastag réz rétegű, üvegszál erősítésű, FR4 típusú epoxy hordozó felületén három különböző alakú tesztábrát hoztunk létre, úgy hogy teli fémezésen a forrasztásgátló lakkon nyitott ablakok határozták meg a forrasztási felületek geometriáját. Egy kör alakú (0,75 mm sugarú) és két ovális forrasztási felületet (0,75 mm görbületi sugár és 3 illetve 4 mm-es főátló) alakítottunk ki. A cél a keresztmetszeti síkon közel félgömb alakú forrasztombok létrehozása volt, melyek a hordozó fém felületének tetszőleges pontjával galvanikus kapcsolatban vannak. Az ehhez szükséges ~1, 2,3 és 3,7 mm^3 forrasztmennyiséget egy 1 mm vastagságú tömör huzal megfelelő hosszúságúra történő darabolásával állítottuk elő. A reprodukálható forraszt mennyiség előállításához a huzal felületén lézerrel jelöltük be a megfelelő hosszúságú szakaszokat (1. ábra).



1. ábra. Lézeres jelölés a forrasztáshuzal felületén egyenlő távolságokra

A forrasztási felületekre a huzaldarabok felhelyezése előtt természetes alapú folyasztószer

vittünk fel. Az újraömlésztéses forrasztást egy infra kemencében végeztük ~ 228 °C csúcshőmérséklettel. A forrasztási folyamat során a forrasz ~ 147 s-ot töltött olvadt halmazállapotban. A konkrét hőprofil a 2. ábrán látható.



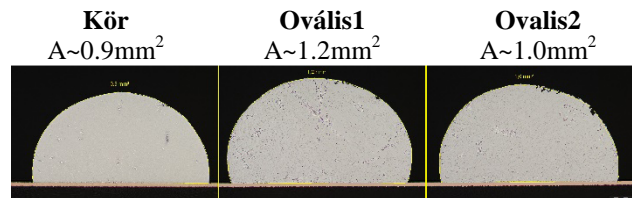
2. ábra. Az alkalmazott újraömlésztéses forrasztás hőprofilja

3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A forraszdombokból és a hordozóból álló félköteket kétkomponensű hideg beágyazó anyagba öntöttük majd keresztmetszeti csiszolatot készítettünk róluk. A csiszolatokat metallográfiai mikroszkópokkal és a pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk. A csiszolati síkon látott struktúrákat energiadiszperzív spektroszkópia segítségével azonosítottuk be. Az intermetallikus finomszerkezet láthatóvá tételére szelektív elektrokémiai módszereket használtunk. A felpolírozott keresztmetszeti csiszolatot hátoldali kivezetés segítségével megkontaktáltuk és egy 1%-os híg kénsav elektrolitot tartalmazó elektrokémiai cellába helyeztük, ahol a forrasztott kötés volt maga a munkaelektroda. -350 mV előfeszítést alkalmazva 120 s-ig marattunk a minták csiszolati síkon mutatott felületét, melynek hatására a minta adott mélységéből szelektíven kivontuk a tiszta β -ón fázisokat [17]. A visszamaradt intermetallikus finomszerkezet így láthatóvá és vizsgálhatóvá vált.

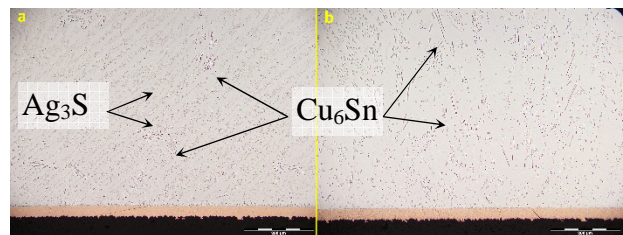
4. EREDMÉNYEK

Csiszolati sík megközelítőleg a mintázatok hossz tengelyre merőlegesen azok felezővonalán haladt keresztül. Az így adódó forrasz felületek alakját és méretei a 3. ábrán látható optikai mikroszkópos képek szemléltetik. A további kísérletek során a legnagyobb felületet mutató mintázatot használtuk. A különböző összetételű mintákból 5-5 db forraszdombot készítettünk és a vizsgáltunk.



3. ábra. Minták keresztmetszeti felszíne

Az azonos típusú minták mikroszerkezeti sajátosságai nagyon hasonlítottak egymásra, míg a mangántartalmú forraszok és a referencia SAC305 mikroszerkezetei alapvetően eltértek egymástól. Az alacsony ezüsttartalomnak köszönhetően a mangán tartalmú forraszok csiszolatain a forrasz tömbi anyagában az Ag_3Sn intermetallikus vegyületek szinte alig láthatóak (4. ábra). Ugyanakkor a tömbi anyagban található Cu_6Sn_5 intermetallikus vegyületek száma kvalitatívan sokkal nagyobb a mangánt is tartalmazó forraszok esetében. Az ilyen mértékű ón-réz intermetallikusok jelenléte aligha magyarázható az adalékolt anyagok 0,2 tömeg%-os réztartalom különbségével.

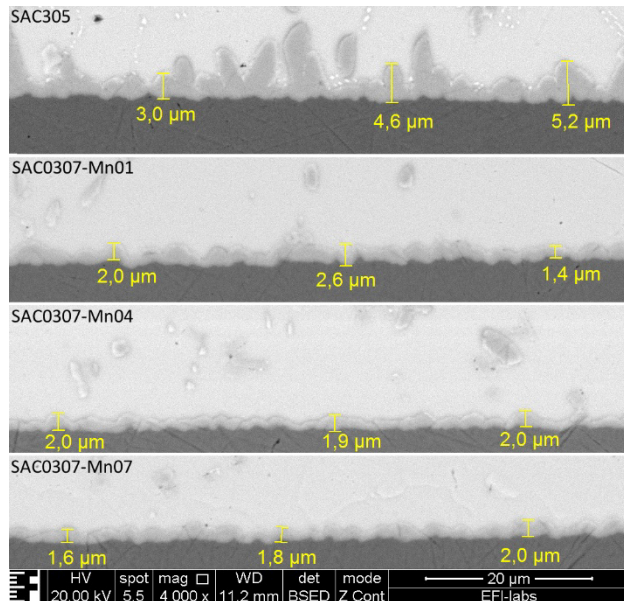


4. ábra. A SAC305 (a) és a SAC0307-Mn01 (b) forraszminták keresztmetszeteiről készült optikai mikroszkópos képek; az 1 tömeg% mangánt tartalmazó minta csiszolati síkján a mangán tartalmú szemcsék nem láthatók

Mivel valamennyi minta forrasztását egy újraömlésztéses forrasztás alkalmával alakítottuk a ki, a forrasz olvadt állapotban töltött ideje mintáról mintára hasonló kell, hogy legyen. Ebből arra lehet következtetni, hogy a mangánnal adalékolt forraszanyagok egységnyi idő alatt több rézet oldanak be az alapfémből. Habár az 1 tömeg%-os mangánnal adalékolt minták keresztmetszeti csiszolatain nem találtunk mangánban gazdag kiválásokat, a mikroszerkezet morfológiája már minimális adalékkoncentráció esetében is jelentősen eltért a hagyományos SAC305 mikroszerkezetétől.

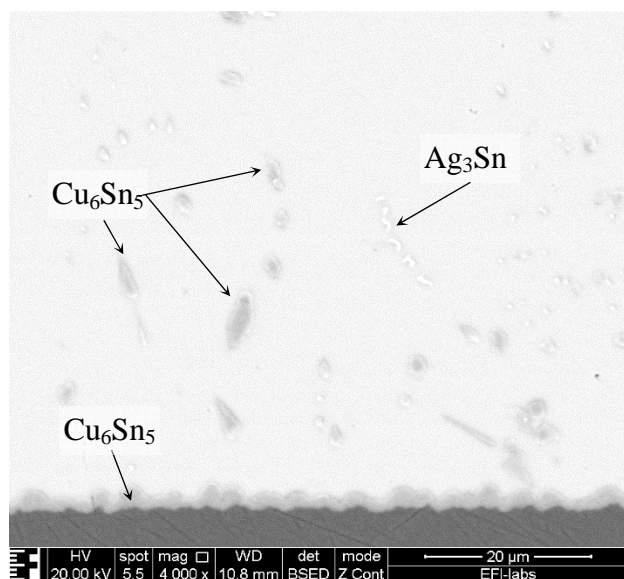
A forrasz-alapfém határán csipkés és folytonos intermetallikus határreteg alakult ki minden esetben, de a mangánnal adalékolt minták esetében tapasztalt intermetallikus határreteg morfológiája szintén eltért

a SAC305-höz képest. A határreteget alkotó szemcsék hosszúkás alakúak és a határreteg átlagvastagsága lényegesen nagyobb volt a SAC305 esetében, igaz mindkét érték az elfogadható tartományban volt.



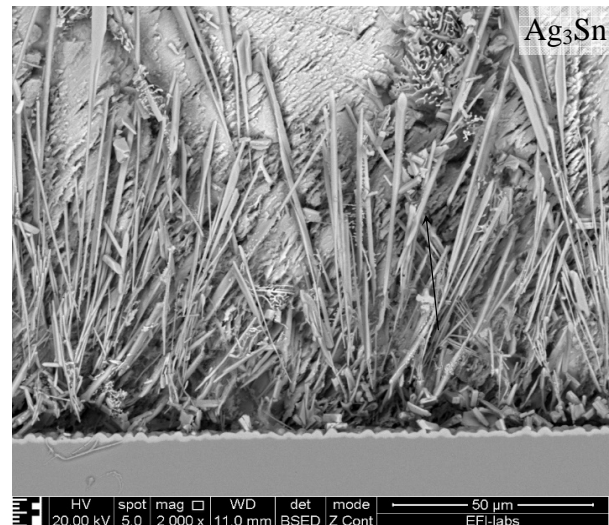
5. ábra. A minták forrasz-alapfém felületén kialakult intermetallikus határretegekről készült elektronmikroszkópos képek

Az elektronmikroszkópos vizsgálat megerősítette, hogy az 1 tömeg% mangánt tartalmazó minták keresztmetszeti csiszolatain relatíve magas mangántartalmú terület nem láthatóak (6. ábra). Az ilyen alacsony koncentrációjú minták vizsgálatára pedig SEM-EDS mérési módszer pedig már nem elég érzékeny.



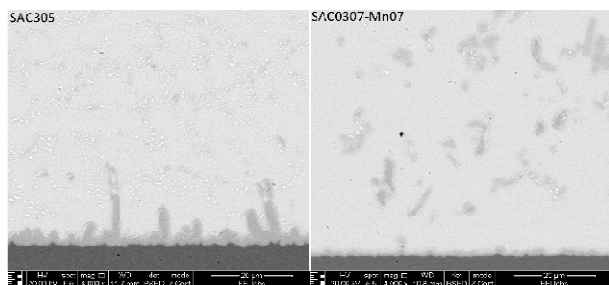
6. ábra. SAC0307-Mn01 minta visszazórt elektron detektorral alkotott képe; Mn tartalmú szemcsék nem láthatóak a csiszolati síkon

A szelektív elektrokémiai maratással feltárt intermetallikus mikroszerkezet között azonban már megfigyelhetőek voltak mikrométeres méretnél kisebb mangán szemcsék (7. ábra). Ez is jól példázza a szelektív elektrokémiai maratási módszer alkalmazhatóságát. Mivel a magán tartalmú szemcsék karakterisztikus mérete a primer elektronnaláb behatolási mélységével egy nagyságrendbe esik, ezért a jelen, beágyazott formájában a pontos elemösszetétel meghatározása nem lehetséges.



7. ábra. SAC0307-Mn01 minta maratott felületéről visszazórt elektron detektorral alkotott kép; a Mn tartalmú szemcsék láthatók a finom mikroszerkezetben

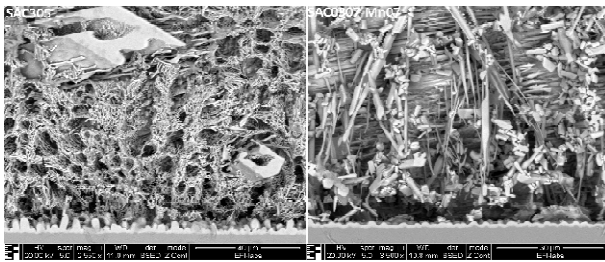
Továbbá érdemes megjegyezni, hogy általában az Ag_3Sn intermetallikus vegyületek a mangán tartalmú szemcsék közvetlen közelében találhatóak meg. Nagy valószínűséggel a Mn tartalmú szemcsék kristálycsíra képző helyként viselkednek a nukleáció fázisában.



8. ábra. SAC305 és SAC0307-Mn07 minták visszazórt elektrondetektorral alkotott képei; a nem maratott minták csiszolati képein mangán tartalmú részecskék csak a SAC0307-Mn07 mintákon voltak megfigyelhetőek

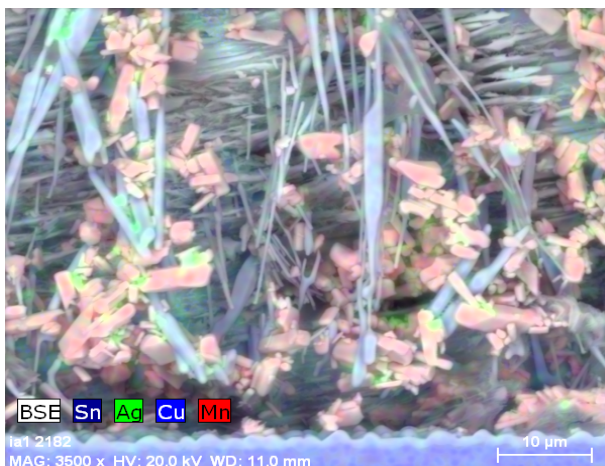
Az optikai mikroszkóppal megfigyelt mikroszerkezetbeli különbségek SEM-EDS-szel is láthatóak voltak a mangán tartalmú és a referencia

SAC305-ös forrasz között (8. ábra). A lényegesen kevesebb Ag_3Sn intermetallikus vegyület mind a mangán tartalmú szemcsék közvetlen közelében váltak ki. Míg a SAC305-ös forrasz esetében az Ag_3Sn intermetallikus finomszerkezet a forrasz tömbi anyagában egyenletesen volt jelen. A mangán tartalmú forraszok maratott képein jól megfigyelhetők a túszerű Cu_6Sn_5 intermetallikus kiválások (9. ábra). A túszerű kiválások hossz tengelyei a forrasz alapfém határfelületének irányába mutatnak, hiszen az intermetallikus kristályok növekedése során a hőmérsékletgradiens irányába orientálódnak.



9. ábra. SAC305 és SAC0307-Mn07 minták visszaszórt elektron detektorral alkotott képei maratás után

A visszaszórt elektron detektorral alkotott képeken rendszámkontrasztot láthatunk. Mivel a Mn rendszáma alacsonyabb, mint a környező anyagoké, a Mn tartalmú szemcséknek sötétebb árnyalatúnak kell lenniük visszaszórt elektron detektorral alkotott képeken. Ugyanakkor elég nehéz megkülönböztetni őket a Cu_6Sn_5 szemcséktől. Mivel a szelektív maratás után a forrasz térbeli szerkezete figyelhető meg, a mangán tartalmú szemcsék beazonosítása sokkal könnyebb. A mangán tartalom meghatározására elemösszetétel térképeket készítettünk (10. ábra).



10. ábra. SAC0307-Mn07 minta maratott felületének elemösszetétel térképe

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A metallográfiai vizsgálatok eredményei alapján elmondható, hogy a SAC305 és a mangán tartalmú forraszanyagok mikroszerkezete jelentősen eltér egymástól. Ez az eltérés részben a jelentősen kevesebb ezüst tartalommal magyarázható. Az Ag_3Sn intermetallikus vegyületek a SAC305-ös forraszban egy összefüggő finom mikroszerkezetet alkotnak, javítva ezzel a forrasz mechanikai tulajdonságait. Ugyanakkor a nem megfelelően beállított hőprofil hatására az Ag_3Sn vegyületek lemez formában válnak ki a forrasz tömbi anyagában, mely csökkenti a dinamikus igénybevétellel szemben mutatott ellenállását. Az alacsonyabb ezüst tartalom egyértelműen csökkenti a lemezszerű kiválások valószínűségét, melyet tovább csökkent az, hogy a forrasz tömbi anyagában egyenletesen jelenlévő Mn tartalmú szemcsék közelében válik ki finomszemcsés formában az Ag_3Sn . A mangán tartalmú forraszok esetében tapasztalt túszerű Cu_6Sn_5 vegyületek erősíthetik a forraszt, ellenállóbbá téve ezzel a mangán tartalmú forraszokat a külső mechanikai behatásokkal szemben.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The research reported in this paper was supported by the Higher Education Excellence Program of the Ministry of Human Capacities in the frame of Nanotechnology and Material Science research area of Budapest University of Technology and Economics (BME FIKP-NAT).

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Krammer O., Garami T., Horváth B., Hurtony T., Medgyes B., Jakab L., „Investigating the thermomechanical properties and intermetallic layer formation of Bi micro-alloyed low-Ag content solders”, *J. Alloy Compd.*, 634. évfolyam, 156-162 o., 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.02.092>
- [2] Géczy A., Kvanduk B., Illés B., Harsányi G., „Comparative Study on Proper Thermocouple Attachment for Vapour Phase Soldering Profiling”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 28. évfolyam, 1. szám, 7-12 o., 2016.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2015-0033>
- [3] Livovsky L., Pietrikova A., „Real-time profiling of reflow process in VPS chamber”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 29. évfolyam, 1. szám, 42-48 o., 2017.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0026>

- [4] Hirman M., Steiner F., „Optimization of solder paste quantity considering the properties of solder joints”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 29. évfolyam, 1. szám, 15-22 o., 2017.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0025>
- [5] Chen Y., Gao Y., Liu Z.Q., Zhang H., Sugahara T., Nagao S., Sukanuma K., „Investigation on the melting and tensile properties of Bi-containing SAC105 lead-free solder alloys”, *2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, Harbin, 464-468 o., 2017.
<https://doi.org/10.1109/ICEPT.2017.8046495>
- [6] Liu Y., Fu H., Zhang H., Sun F., Wang X., Zhang G., „Microstructure, hardness, and shear behavior of the as-soldered SnBi–SAC composite solder pastes”, *J. Mater. Sci.-Mater. El.*, 28. évfolyam, 19113-19120 o., 2017.
<https://doi.org/10.1007/s10854-017-7866-6>
- [7] Roa S.M.G., Magdaluyo E., Gierlotka W., „Microstructural Characterization and Properties of Sn-Ag-Cu (SAC) Compound Induced by Zn Alloying”, *Nano Hybrid Compos.*, 16. évfolyam, 33-36 o., 2017.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/NHC.16.33>
- [8] Benabou L., Vivet L., Tao Q.B., Tran N.H., „Microstructural effects of isothermal aging on a doped SAC solder alloy”, *Int. J. Mater. Res.*, 109. évfolyam, 1. szám, 76-82 o., 2018.
<https://doi.org/10.3139/146.111578>
- [9] Yakymovych A., Sr. Švec P., Orovcik L., Bajana O., Ipser H., „Nanocomposite SAC Solders: The Effect of Adding Ni and Ni-Sn Nanoparticles on Morphology and Mechanical Properties of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solders”, *J. Electron. Mater.*, 47. évfolyam, 1. szám, 117-123 o., 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11664-017-5834-9>
- [10] Ani F.C., Jalar A., Saad A.A., Khor C.Y., Ismail R., Bachok Z., Abas M.A., Othman N.K., „SAC–xTiO₂ nano-reinforced lead-free solder joint characterizations in ultra-fine package assembly”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 30. évfolyam, 1. szám, 1-13 o., 2018.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-04-2017-0011>
- [11] Ban G., Sun F., Liu Y., Cong S., „Effect of nano-Cu addition on microstructure evolution of Sn_{0.7}Ag_{0.5}Cu–BiNi/Cu solder joint”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 29. évfolyam, 2. szám, 92-98 o., 2017.
<https://doi.org/10.1108/SSMT-06-2016-0013>
- [12] Wang R.D., Zhang S.M., Hu Q., Zhang F.W., „Effect of Boron on Microstructure and Properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu Low-Silver Lead-Free Solder”, *Mater. Sci. Forum*, 898. évfolyam, 908-916 o., 2017.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.898.908>
- [13] Song J.M., Liu Y.R., Lai Y.S., Chiu Y.T., Lee N.C., „Influence of trace alloying elements on the ball impact test reliability of SnAgCu solder joints”, *Microelectron. Reliab.*, 52. évfolyam, 180-189 o., 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.09.003>
- [14] Lin L.W., Song J.M., Lai Y.S., Chiu Y.T., Lee N.C., Uan J.Y., „Alloying modification of Sn–Ag–Cu solders by manganese and titanium”, *Microelectron. Reliab.*, 49. évfolyam, 235-241 o., 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2008.10.001>
- [15] Tang Y., Luo S., Li G., Yang Z., Hou C., „Effects of Mn nanoparticle addition on wettability, microstructure and microhardness of low-Ag Sn-0.3Ag-0.7Cu-xMn(np) composite solders”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 30. évfolyam, 3. szám, 153-163 o., 2018. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2017-0027>
- [16] Hurtony T., Bonyár A., Gordon P., Harsányi G., „Investigation of intermetallic compounds (IMCs) in electrochemically stripped solder joints with SEM”, *Microelectron. Reliab.*, 52. évfolyam, 1138-1142 o., 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.12.035>

Gyártási műveletek illeszkedésén alapuló heurisztikus ütemező módszer alkalmazása szalagrendszerű gyártásban

Farkas Gábor Ákos, Villányi Balázs János, Martinek Péter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Egry József u. 18.
E-mail: martinek@ett.bme.hu

Tartalmi kivonat. A gyártásütemezés feladata a múlt század közepe óta foglalkoztatja a kutatókat. A magas költségű gyártósorok és berendezések optimális kihasználása és a megrendelések minél gyorsabb kiszolgálása elengedhetetlenné teszi ezen módszerek használatát. Jelen cikkben a gyártástervezés egy speciális területével, a szalagrendszerű gyártással foglalkozunk. Egymást követő gyártási műveletek átfutási idejének összehasonlításával egy egyszerű illeszkedés alapú heurisztikus megközelítést mutatunk be. Módszerünk épít továbbá az utazó ügynök probléma egy korszerű megoldására is. Az ütemezés optimalizálásánál célfüggvénynek a teljes átfutási idő minimalizálását választottuk. Megoldásunk hatékonyságát annak működési paramétereinek finomhangolásával is növeltük illetve részletesen vizsgáltuk az egyes paraméterek végeredményre gyakorolt hatását. Megközelítésünk jóságát a szakirodalomban elterjedt mintafeladatok megoldásával bizonyítottuk.

Kulcsszavak: gyártásütemezés; szalagrendszerű gyártás; átfutási idő minimalizálása; heurisztikus megközelítés

1. BEVEZETÉS

A termelés rendszerszerű, módszeres megtervezése az első ipari forradalom óta foglalkoztatja a termelésirányítókat. Ennek érdekében szükséges volt munkafolyamatokat definiálni, standardizálni; a szabályozottságot a termelési rendszerben megteremteni. Ezt a feladatot ma már termeléstervezésként (és -irányításként) azonosítjuk. A Ford-féle tömeggyártási rendszer létrejötté óta a gyártási folyamatok komplexitása jelentősen nőtt, így a termeléstervezéshez szükséges munkaelemzési és folyamatszabályozási feladatokat egyre összetettebb adathalmazon kell elvégezni [1]. Ennek megfelelően, a termeléstervezés és -irányítás is már egyre inkább a digitalizációról és az ipari információtechnológiai megoldásokról szólnak [2].

A termeléstervezés a vállalati tervezés egy szintje, melynek feladata a gyártási terv elkészítése. Ehhez figyelembe veszi a termelőrendszer paramétereit: például az üzemek valós napi kapacitásait és a termelési körülményeket. A tervezés eredménye a gyártási rendelések, amelyek elemi műveleteit még ütemezni kell konkrét gyártóberendezésre. A gyártásütemezés során meghatározzuk az elemi műveletek optimális sorrendjét, a szükséges alapanyagok és munkaerő biztosítása mellett. A gyártási rendelések tehát

komplex gyártási folyamatokat írnak le, különböző gyártó berendezésekre és időtartamokra. Az előbb ismertetett ütemezés során pedig pontosan definiáljuk az egyes munkafázisok erőforrás-szükségletét és gépfoglalási idejét.

Következésképpen, a gyártásütemező algoritmusok kezelnek elemi műveleteket, gyártóberendezéseket és időintervallumokat. A cél elsősorban a megvalósíthatóság vizsgálata, másodsorban pedig a célfüggvény által meghatározott költség – például teljes átfutási idő – minimalizálása.

A gyártási elrendezéseknek alapvető hatása van az ütemezési problémák formalizálására. Két alapvető elrendezési véglet különböztetünk meg. A műhelyrendszerű gyártás (job-shop) esetében a hangsúly a terméken és az azt előállító üzemen van, e köré szerveződik a gyártás [3]. Így a hasonló műveletek gépei egy helyre, azonos műhelyekbe kerülnek. Végbemegy a gyártási folyamatok műhelyek szerinti specializációja, mely ezen gyártási rendszer jellegzetessége. A gyártási folyamat egyes műveletei tehát más-más műhelyben kerülnek elvégzésre. A másik elrendezési véglet a szalagrendszerű gyártás (flow-shop), ahol a hangsúly a termelési folyamaton és annak hatékonyságán van [4]; a termék és termelő

berendezés ennek van alávetve. Jellemzően a gépek, illetve a munkafolyamatok a gyártási folyamat sorrendjében, egymáshoz közel helyezkednek el. További általános jellemzőjük, hogy a gépek kapacitása kiegyenlített, azaz közöttük ütemazonosság áll fenn. Sajátos megvalósulási formája a futószalagos gyártási rendszer. A két szélsőséges gyártási elrendezés között több közbülső forma is ismeretes [2].

Jelen cikkben szalagrendszerű gyártás ütemezésére mutatunk be egy új megközelítésmódszert. Az ütemezési probléma a következőképpen általánosítható: legyen adott n darab munkafolyamat, amelyek egyenként m darab műveletből állnak, és ezeket m darab gép között kell optimálisan szétosztani térben-időben – azaz ütemezni – a gépek legjobb kihasználtsága mellett.

Az ütemezési problémák megoldásának sok módszere és csoportja ismert. Megoldási megközelítések azonban alapvetően háromféle. Egyfelől léteznek egzakt matematikai optimalizáción alapuló megoldások, amelyek célfüggvények analitikus megoldásával globálisan optimális megoldást találnak [5]. Az ezzel járó sokszor jelentős futási idő azonban kizárja ezen eljárások valós problémákra történő alkalmazhatóságát. Egy másik ütemezési megközelítés a becslő eljárás, amely az előbb említett futásidő csökkenésével kecsegtet, de az optimalitás rovására. Van azonban egy mellékelt vállalás ezekhez a megoldásokhoz, amely mégiscsak kellő alapot adnak ezen módszerek alkalmazásához: az optimumhoz képest behatárolt mértékben térnek el (approximatívak). És végül az ütemezési megközelítések gyakorlatban leginkább használható alternatíváját a heurisztikán alapuló megoldások nyújtják, amelyek futásideje rövid és lokálisan optimális megoldást eredményeznek [6]. Oly népes ezen megközelítési csoport halmaza, hogy alkategóriákba soroljuk őket. Ismerünk döntési mechanizmusokat használó heurisztikákat, ezek a konstruált heurisztikák. Ilyen például a DR algoritmus. Emellett még vannak fejlődő heurisztikák is, amelyek lokális keresésen alapszanak és jellemzően változtatják döntési logikájukat az ütemezés során. Ide sorolhatjuk például a szimulált lehűtésen [6], és a genetikus

algoritmusokon alapuló ütemezőket [7]. Jelen cikk tárgya egy javasolt új karakterisztika alapján működő heurisztikus ütemező. Módszerünk alapja az egymást követő munkafolyamatok illeszkedésének vizsgálata. Ez alapján történik az optimális végrehajtási sorrend meghatározása, az ütemezési feladatok gépekhez rendelése és az optimális foglalási időintervallumok meghatározása. Az ütemező algoritmus fejlesztésénél különböző működési és paraméteres finomhangolásokat is végeztünk. Az eredményeket az irodalomban széles körben elterjedt Taillard-féle [16] ütemezési problémákon validáltuk a tesztek során.

A cikk felépítése a következő. Ez az első szakasz betekintést nyújt a gyártásütemezés problémájába, hátterébe. A második szakasz ismerteti a kapcsolódó munkákat. Ezt követi az általunk vizsgált ütemezési feladat és a javasolt módszer részletes ismertetése. A mérési eredmények a cikk végén, az összefoglalás és kitekintés előtt kerülnek ismertetésre.

2. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A szalagrendszerű gyártás ütemezésével sok munkában foglalkoznak. Rajendran és társai két heurisztikus megközelítést mutatnak a probléma megoldására, mely az új munkák egymás után történő beillesztésével közel optimális megoldást talál [8]. A [9]-ben egy genetikus algoritmuson alapuló heurisztikus megoldást mutatnak be a teljes átfutási idő hatékony minimalizálására szalagrendszerű gyártásnál. Li és Wand pedig már több célfüggvényt is támogat a genetikus algoritmus alapú ütemező megközelítéssel [10]. Dai és társai az átfutási idő minimalizálása mellett az energiafogyasztást is próbálják minimalizálni az ütemezésnél. Módszerük genetikus algoritmusra és szimulált lehűtésre épül [11].

Léteznek továbbá más gépi tanulási módszeren alapuló megközelítések is. Például a [12]-ben egy mesterséges neurális hálózaton alapuló heurisztikus megoldást láthatunk a szalagrendszerű gyártásütemezés problémájára. Linn és társai egy speciális, úgynevezett hibrid szalagrendszerű problémát ismertetnek, ahol egy-egy művelet elvégzésére párhuzamosan több gép is beállítható. Továbbá gyakran előfordul, hogy az egyes megmunkálási fázisok gépei egyformák, vagy

univerzálisak. Az ütemezési megoldások közül a két, három illetve n -lépcsős megközelítéseket mutatják be részletesen [13]. A [14] pedig egészen sokféle megközelítést közöl a hibrid szalagrendszerű ütemezési feladat megoldására teljes osztályozási rendszer bemutatásával.

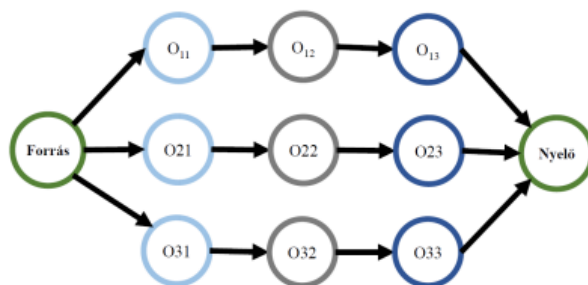
3. AZ ÜTEMEZÉSI PROBLÉMÁK OSZTÁLYOZÁSA

Ebben a szakaszban röviden ismertetjük a gyártásütemezési legfontosabb jellemzőit, osztályait, amely egyben betekintést ad megoldásunk alkalmazási környezetébe is.

Az ütemezési probléma általános esetben tartalmaz gyártási tevékenységeket (job), azokat felépítő műveleteket (operation), valamint gyártóberendezéseket (machine). Célunk a tevékenységek műveleteinek szétosztása a gyártóberendezések között úgy, hogy az átfutási idő minimális legyen. Ez előbbi különböző megkötések módosíthatják, mint a határidőtartás, a késedelem minimalizálása, műveleti függőségek betartása stb. Egy gyártási ütemezés megfelelő, ha nincs átlapolódás a műveletek időintervallumai között. Ezen felül optimális is, ha az adott probléma jellemzőjét – jelen esetben például az átfutási időt – minimalizáltuk. További probléma specifikus jellemző lehet az átlagos késedelem mértéke, a maximális késés mértéke, a késedelmes feladatok száma, a gyártóberendezések állásideje, a műveletközi átállások időigénye stb.

Az ütemezési problémákat jellemzően a következő elemek felhasználásával modellezzük. A modell tartalmaz egyrészt gyártási tevékenységeket, amelyek felhasználnak olyan erőforrásokat, mint például a megmunkálást végző gép munkavégző képessége. Adott továbbá egy célfüggvény – például a teljes átfutási idő –, amit minimalizálni szeretnénk, tehát amihez viszonyítjuk az optimumot. Az ütemezés elsődleges szemléltető eszköze a Gantt-diagram, amely kifejezetten ütemezett tevékenységek időintervallumainak relációit hivatott szemléltetni. Ezen felül, az ütemezések függőségeit is modellezhetjük, például gráfok segítségével. Ezek általában súlyozott, irányított, összefüggő, hurok nélküli gráfok, melyeknek nincs izolált csomópontja. Jellemző rájuk továbbá, hogy egy

forrás- és egy nyelőcsomópontjuk van. Az 1. ábrán három gyártási feladatot látunk, melyek külön-külön is három egymásra épülő műveletből állnak, ahol O_{nm} az n . feladat m . művelete.



1. ábra. Az ütemezés irányított gráfja

Ahogy a bevezetőben taglaltuk, két alapvető gyártási elrendezést ismerünk, melyek közül jelen cikkben a szalagrendszerű gyártással (flow-shop) foglalkozunk. A szalagrendszerű gyártás ütemezési problémája a következő: legyen adott n darab gyártási tevékenység (job), m darab gép és m darab művelet. A műveletek a gépeknek megfelelően definiáltak, sorrendjük adott, végrehajtásuk nem félbeszakítható. Célunk olyan munkafolyamatsorrend meghatározása, mellyel a teljes ütemterv átfutási ideje minimális. Ez az általános forma – amely az imént felsorolt megkötéseket tartalmazza – NP-nehez, ezért megoldása nem triviális, sokszor közelítő megoldások alkalmazását indokolja. Ahogy azt a bevezetőben kifejtettük, a megoldóknak a következő főbb csoportjai ismeretesek: egzakt matematikai optimalizáció, becslő eljárás, közelítő módszerek. A megközelítésünk szempontjából nem nélkülözhető továbbá a szalagrendszerű gyártás célfüggvényeinek ismerete. Általános esetben a teljes átfutási idő minimalizálására törekszünk, tehát minél rövidebb idő alatt igyekszünk a gyártási tevékenységekkel végezni. Ha a határidőre nem tudnánk végezni az összes előírt feladattal, akkor a késés időben kifejezett mértékét próbáljuk minimalizálni. További fontos célfüggvény lehet a kapacitáskihasználás is: az adott erőforrások névleges feladatvégző képességét szeretnénk a lehető legjobb mértékben megközelíteni.

3.1. Az illeszkedés alapú ütemezés

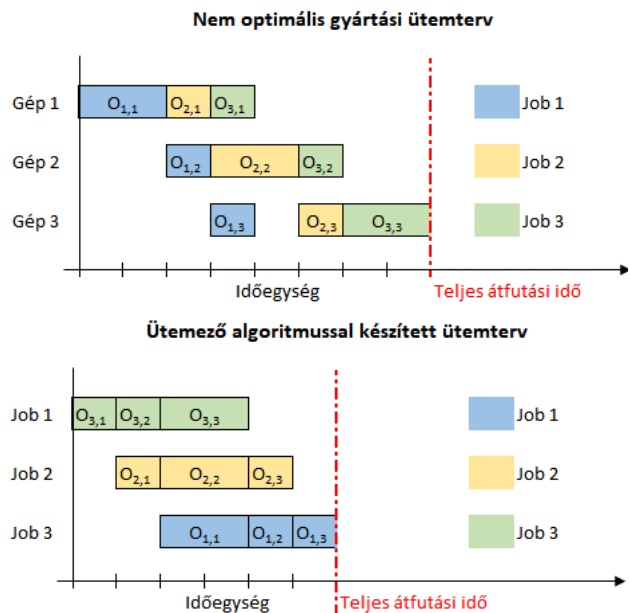
A rövid problémáismertetést követően, most definiáljuk a gyártásütemezés műveleti illeszkedésének fogalmát. Ehhez először is rávilágítunk szükségességére, majd néhány

kiegészítő fogalom segítségével definiáljuk azt és módszert javasolunk az így definiált ütemezési problémák megoldására.

Vegyük az átfutási idő szempontjából talán legkritikusabb faktort: az állásidőt. Legyen $T_f(O_{j,i})$ a j . gyártási tevékenység i . műveletének befejezési ideje, míg $T_s(O_{j,i+1})$ a j . gyártási tevékenység $i+1$. műveletének kezdési ideje. Ekkor az állásidő a következőképpen adható meg:

$$t_d = T_s(O_{j,i+1}) - T_f(O_{j,i}) \quad (1)$$

A 2. ábrán látható két ütemezés közül az elsőnél állásidő fordul elő, mely optimális ütemezéssel kiküszöbölhető és így csökken a teljes átfutási idő.

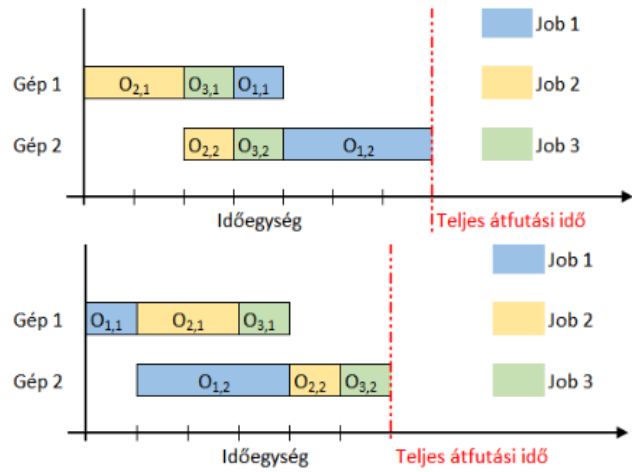


2. ábra. Állásidő kiküszöbölése optimális ütemezéssel

Sajnos az állásidő definiálása és figyelembe vétele még önmagában nem garancia az optimalitásra. Vegyük például azt az esetpárost, amelyet 3. ábra szemléltet. Jól látható, hogy bár egyik esetben sincs a műveletek között állásidő, az első esetben nagyobb a teljes átfutási idő. Az itt bemutatott esetekben tehát az állásidő segítségével nem tudunk differenciálni, mégis a célfüggvény értékében eltérés van. Az ilyen esetek megkülönböztetésére alkalmas a műveleti illeszkedés. Ez ugyanis azt fejezi ki, hogy az egyes műveletek milyen hatással vannak más műveletek műveleti (végrehajtási) idejére. Jelölje $pt(O_{j1,i})$ a j_1 tevékenység i . műveleti idejét. A műveleti

illeszkedés kiindulási alapja az egymást követő tevékenységek egymást követő műveleteinek végrehajtási idejében jelentkező különbség:

$$F = pt(O_{j1,i}) - pt(O_{j2,i+1}) \quad (2)$$



3. ábra. Illeszkedésből adódó eltérés különböző ütemezéseknél

Ez idáig analógiát mutat az előzőekben definiált állásidővel, két különbséggel. Egyrészt itt a műveleti időket vizsgáljuk, másrészt két különböző tevékenységen belül. Annak érdekében, hogy az illeszkedés számszerű értéke minél alkalmasabb legyen ütemezési problémák leírására, az előbb bemutatott kiindulási alapot még adekvát módon súlyozzuk:

$$\begin{aligned}
 F &= \left(pt(O_{j1,i}) - pt(O_{j2,i+1}) \right)^{c_2} && \text{ha} \\
 pt(O_{j1,i}) - pt(O_{j2,i+1}) &\geq 0 && \text{vagy} \\
 F &= c_1 \left| pt(O_{j1,i+1}) - pt(O_{j2,i+1}) \right|^{c_2 c_3} && \text{ha} \\
 pt(O_{j1,i}) - pt(O_{j2,i+1}) &< 0
 \end{aligned} \quad (3)$$

A fenti képlet azért tartalmazza külön esetként a negatív különbséget, mert ugyanis ekkor áll elő az a kifejezetten kerülendő helyzet, hogy j_2 tevékenység $i+1$. művelete várakozni kényszerül, azaz állásidő keletkezik. Mivel ez súlyosan rontja az átfutási időt, ezért ezt az esetet különösen drasztikusan szükséges büntetni: erre hivatottak a c_1 és c_3 faktorok. A c_2 faktor pedig egyszerűen átskálázza az illeszkedést, így lehetővé válik a kisebb illeszkedési eltéréseket is kellő hangsúllyal kezelni. Összességében minél kisebb az F érték, annál jobb az illeszkedés, tehát az ütemezés szempontjából a minél alacsonyabb kumulált F érték az előnyös.

(Az $F = 0,00$ érték a tökéletes illeszkedést reprezentálja.)

Az ütemezési probléma megoldásához az illeszkedésből gyártó berendezéseken allokált műveleti idő intervallumokat kell előállítanunk. Ez azonban triviális feladattá válik, ha észre vesszük, hogy a műveleti illeszkedés által egy végrehajtási sorrend is adottá válik a tevékenységek műveletei között. Ezután már nincs más dolgunk, mint az így kialakult végrehajtási sorrendnek megfelelően ütemezni a gyártási tevékenységek műveleteit a gépekre.

Az optimalizáláshoz a gyártási tevékenységek illeszkedését is vizsgálunk kell műveleteik illeszkedésén keresztül. Ehhez egy olyan eljárást kell alkalmaznunk, amely j_1 tevékenység $\{1,2, \dots, m-1\}$ műveleteit összehasonlítja j_2 tevékenység $\{2,3, \dots, m\}$ műveleteivel, amennyiben j_1 a j_2 előtt közvetlenül végrehajtott gyártási tevékenység. Erre esetünkben az a legjobb megközelítés, ha a műveletek egész sorozatait hasonlítjuk össze, hiszen a szalagrendszerű gyártásban a műveleti sorrend kötött. Valamennyi művelet költséges egyenkénti összehasonlítása helyett azonban dolgozhatunk közelítő megoldásokkal melyek terméksorozatokat hasonlítanak össze egyben. Ez természetesen befolyásolja a végeredmény pontosságát, melyet részletesen bemutatunk lentebb az eredmények leírásánál.

Ezután az ütemezési problémához definiáljunk egy $n \times n$ műveleti illeszkedés-mátrixot, amely $F(i,j)$ eleme az i . tevékenység illeszkedését tartalmazza a j . tevékenységhez (4).

$$F_{\text{cost}} = \begin{pmatrix} \infty & \dots & F_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{n,1} & \dots & \infty \end{pmatrix} \quad (4)$$

Vegyük észre, hogy $F(i,j) \neq F(j,i)$, tehát a műveleti illeszkedés nem kommutatív. Az F érték jellegénél fogva az átlókba tetszőlegesen nagy értéket tehetünk, hiszen egy gyártási tevékenységet sem követheti saját magát. Ezzel a mátrixszal egy teljes gráfot definiálhatunk adekvát élsúlyozással. Az illeszkedés alapú ütemezési probléma pedig átalakult egy súlyozott gráfbejárás problémára, ahol minden csomópont meglátogatásával jelöljük ki a

végrehajtási sorrendet, melynek jóságát pedig a bejárt élek súlya adja meg. Ennek minimalizálását már könnyen elvégezhetjük, hiszen a jól ismert utazó ügynök problémáról van szó.

Az utazó ügynök problémára használt algoritmus kiválasztása során elsődleges szempont volt, hogy egy olyan algoritmust használjunk, amely a kutatásban eddig használt módszerekhez jól illeszkedik. Választásunk a Nicos Christofides által publikált Christofides heurisztikus algoritmusra esett [15].

Az algoritmus futási ideje gyors – $O[n^2 \log_2(n)]$ – és garantálja, hogy az algoritmus által talált célérték maximum másfélszerese az optimális célértéknek.

4. EREDMÉNYEK

A közölt futási eredmények egy Intel (R) Core (TM) i5-2410M típusú / 2.30 GHz processzoron, 4 GB RAM-on, 5400 rpm fordulatszámú háttértáron 64-bites Windows 10 operációs rendszeren, kerültek kiszámításra. A c_1 változtatásával azokat az eseteket emeljük ki, ahol a követő munkafolyamatnak nagy valószínűséggel várakoznia kell. Teszteléshez az E. Taillard [16] által közölt példafeladatokat használtuk, azok bizonyított és ismert minimális megoldási értékeivel. A c_1 paraméter hatását a végeredményre az 1. táblázat szemlélteti. Az első sor c_1 beállított értékét, míg a 2. sor a teszteseteknél megtalált szakirodalomból ismert optimális értékek számát mutatja adott c_1 beállítás mellett.

1. táblázat. A c_1 paraméter hangolása

c_1	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
N	73 db	67 db	62 db	66 db	66 db

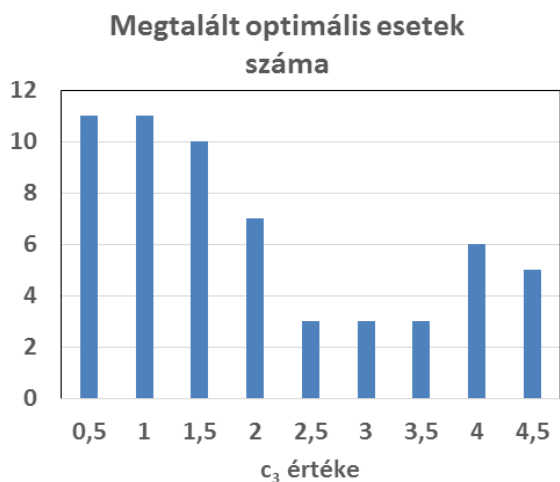
A c_2 paraméter hangolása során a "kiseltérés-nagyeltérés" fogalmat vizsgáltuk, azaz hogy érdemes-e a nagyobb eltéréseket jóval nagyobb mértékben büntetni az illeszkedésszámításnál, illetve esetleg elhanyagolni a nagyon kis eltéréseket. Az eredményeket az 2. táblázat összegezi, mely második sorában megmutatja, hogy összesen hány esetben találtuk meg az irodalomban is közölt minimális átfutási idejű ütemterveket a paraméter változtatásának függvényében. Minél nagyobb a megtalált optimális esetek száma, annál hatékonyabban működik a módszerünk.

2. táblázat. A c_2 paraméter hangolása

c_2	0,5	1	2
Megtalált optimális esetek száma	2 db	20 db	8 db

Mivel a $c_2 = 1,00$ kitevőérték alkotta legtöbbször a legjobb ütemterveket, ezért úgy tűnik, hogy a jó és rossz illeszkedések egyértelmű elkülönítése már legtöbbször megtörténik a paraméter változtatása nélkül is (tehát annak elhagyásával). Megfigyelhető ugyanakkor, hogy néhány szélsőséges esetben érdemes lehet c_2 értékét növelni.

A c_3 paraméter vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy csak bizonyos esetekben figyelhető meg ezen büntetés jótékony hatása, mivel a $c_3 = 0,5; 1$ és $1,5$ értékek esetén közel azonos számban értük el a legjobb átfutási idejű ütemterveket. A paraméter finomhangolása során a legjobb átfutási idejű ütemtervek tipikusan akkor készültek el, amikor $c_3 = 0,5; 1$ vagy $1,5$ értéket választottuk. Ezen értékek között nem tapasztaltunk jelentős különbségeket, viszont a c_3 érték további növelésével csökken a megtalált minimális átfutási idejű ütemtervek száma. Az eredményeket a 4. ábra szemlélteti.

**4. ábra.** A c_3 értékének hatása a működésre

A 3. táblázatban módszerünk hatékonysága látható a szakirodalomban közölt legjobb eredményekkel összevetve. A táblázat fejléc értékei a következők: E. Taillard [16] által közölt példafeladatok sorszáma (Id), az irodalomban publikált és bizonyított minimális átfutási idejű értékek az egyes példafeladatokon (LM), és az általunk talált legjobb eredmények hányadosa (E). Megfigyelhető hogy az optimálisan elérhető célértéktől minden esetben kevesebb, mint 20%-kal

tértünk el az egyébként egyszerű és gyorsan meghatározható illeszkedésen alapuló megközelítésünkkel. Összesítve átlagosan 8%-al hosszabb átfutási idejű ütemtervek készültek.

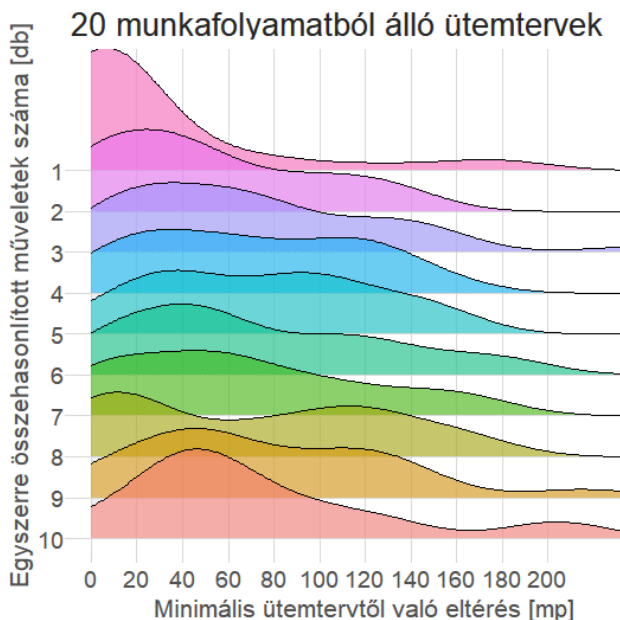
3. táblázat. Eredményeink összehasonlítása, az irodalomban közölt optimummal

Id	LM	E	Id	LM	E	Id	LM	E
1	1278	1,04	31	2724	1,03	61	5493	1,01
2	1359	1,02	32	2834	1,03	62	5268	1,02
3	1081	1,13	33	2621	1,03	63	5175	1,02
4	1293	1,08	34	2751	1,01	64	5014	1,02
5	1235	1,05	35	2863	1,02	65	5250	1,03
6	1195	1,09	36	2829	1,04	66	5135	1,01
7	1234	1,06	37	2725	1,03	67	5246	1,02
8	1206	1,10	38	2683	1,05	68	5094	1,02
9	1230	1,08	39	2552	1,05	69	5448	1,03
10	1108	1,07	40	2782	1,04	70	5322	1,03
11	1582	1,15	41	2991	1,14	71	5770	1,07
12	1659	1,11	42	2867	1,11	72	5349	1,07
13	1496	1,09	43	2839	1,15	73	5676	1,05
14	1377	1,11	44	3063	1,10	74	5781	1,05
15	1419	1,12	45	2976	1,09	75	5467	1,10
16	1397	1,13	46	3006	1,11	76	5303	1,08
17	1484	1,06	47	3093	1,09	77	5595	1,06
18	1538	1,11	48	3037	1,07	78	5617	1,07
19	1593	1,08	49	2897	1,11	79	5871	1,05
20	1591	1,10	50	3065	1,10	80	5845	1,05
21	2297	1,07	51	3850	1,13	81	6202	1,14
22	2099	1,08	52	3704	1,13	82	6183	1,15
23	2326	1,06	53	3640	1,10	83	6271	1,14
24	2223	1,06	54	3723	1,13	84	6269	1,10
25	2291	1,08	55	3611	1,17	85	6314	1,13
26	2226	1,10	56	3681	1,13	86	6364	1,12
27	2273	1,07	57	3704	1,16	87	6268	1,08
28	2200	1,05	58	3691	1,14			
29	2237	1,09	59	3743	1,14			
30	2178	1,09	60	3756	1,13			

Vizsgáltuk továbbá az F_{cost} mátrix illeszkedési értékeinek pontosságát különböző bonyolultságú számítási módszerek esetén is. Megfigyelhető, hogy a legtöbb minimális átfutási idejű ütemtervet az 1-1 összehasonlítás során kapjuk eredményül. Ugyanakkor ez a módszer jóval több számítási időt igényel, mint ha egyszerre több műveletet hasonlítanánk össze az F_{cost} mátrix illeszkedési

értékeinek meghatározásánál. Így érdemes vizsgálni mennyit romlik a várható végeredmény, ha az optimalizálás sebességét próbáljuk növelni az egyszerre vizsgált esetek számának növelésével.

Az egyszerre összehasonlított műveletek számának befolyását az 5. ábra szemlélteti. Látható hogy a legjobb megoldást az egyenkénti összehasonlítás adja. Ekkor tudtuk a legjobban megközelíteni a szakirodalomban közölt optimális minimum átfutási időket az ütemezésünkkel. Természetesen ez jelentősen több futásidőbe kerül, mintha teljes sorozatokat hasonlítanánk össze az egyszerre összehasonlított műveletek számának növelésével. Az 5. ábrán az is látható, hogy a növeléssel együtt fokozatosan romlik a végeredményben kapott ütemezések jósága is a tesztfeladatok eredményeinek átlagát tekintve.



5. ábra. Egyszerre összehasonlított műveletek vizsgálata 20 job-ból álló feladatokon

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy egyszerű, ugyanakkor hatékony módszert mutattunk be a szalagrendszerű gyártás optimális ütemezésére jelen cikkben. Az gyártási tevékenység műveleteinek illesztésén alapuló heurisztikus megközelítésünk az utazó ügynök probléma megoldására is építve gyorsan képes jó eredményeket adni. Az elért eredményeinket a szakirodalomban ismert E. Taillard [16] által publikált tesztfeladatok bizonyított optimális megoldásaival hasonlítottuk össze. Átlagosan 8 százalékos, de maximum 20 százalékos eltéréssel

sikerült közelítenünk ezen eredményeket, bizonyítva ezzel, hogy módszerünk alkalmas a szalagrendszerű gyártásütemezés átfutási idejének gyors minimalizálására.

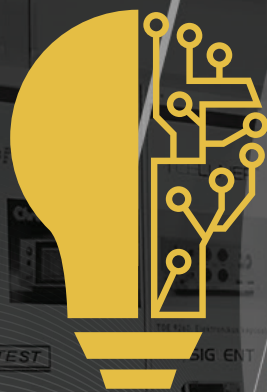
További kutatásainkban még részletesebben szeretnénk vizsgálni az egyes paraméterek eredményre gyakorolt hatását. Vizsgálunk továbbá más megoldásokat is az utazóügynök probléma kezelésére is a jelenleg használt Christofides-féle megközelítés helyett illetve mellett. A jövőben szeretnénk elemezni még módszerünk működését más a szakirodalomban elterjedt ütemezési feladatok végrehajtásával is.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Graves S.C., „A Review of Production Scheduling”, *Oper. Res.*, 29. évfolyam, 4. szám, 646-675 o., 1981. <https://doi.org/10.1287/opre.29.4.646>
- [2] Nahmias S., Olsen T.L., „Production and operations analysis”, *Waveland Press*, USA, 2015.
- [3] Błażewicz J., Domschke W., Pesch E., „The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques”, *Eur. J. Oper. Res.*, 93. évfolyam, 1. szám, 1-33 o., 1996. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00362-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00362-2)
- [4] Dudek R.A., Panwalkar S.S., Smith M.L., „The Lessons of Flowshop Scheduling Research”, *Oper. Res.*, 40. évfolyam, 1. szám, 7-13 o., 1992. <https://doi.org/10.1287/opre.40.1.7>
- [5] Graham R.L., Lawler E.L., Lenstra J.K., Kan A.H.G.R., „Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey”, *Ann. Discrete Math.*, 5. évfolyam, 287-326 o., 1987. [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70356-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70356-X)
- [6] Harjunkoski I. és tsai., „Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods”, *Comput. Chem. Eng.*, 62. évfolyam, 161-193 o., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.12.001>
- [7] Bierwirth C., Mattfeld C., „Production Scheduling and Rescheduling with Genetic Algorithms”, *Evol. Comput.*, 7. évfolyam, 1. szám, 1-17 o., 1999. <https://doi.org/10.1162/evco.1999.7.1.1>
- [8] Rajendran C., Chaudhuri D., „Heuristic algorithms for continuous flow-shop problem”, *Nav. Res. Log.*, 37. évfolyam, 5. szám, 695-705 o., 1990. [https://doi.org/10.1002/1520-6750\(199010\)37:5<695::AID-NAV3220370508>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1520-6750(199010)37:5<695::AID-NAV3220370508>3.0.CO;2-L)
- [9] Etiler O., Toklu B., Atak M., Wilson J., „A genetic algorithm for flow shop scheduling problems”, *J. Oper. Res. Soc.*, 55. évfolyam, 8. szám, 830-835 o., 2004. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601766>

- [10] Li B.B., Wang L., „A Hybrid Quantum-Inspired Genetic Algorithm for Multiobjective Flow Shop Scheduling”, *IEEE T. Syst. Man Cy. B*, 37. évfolyam, 3. szám, 576-591 o., 2007.
<https://doi.org/10.1109/TSMCB.2006.887946>
- [11] Dai M., Tang D., Giret A., Salido M.A., Li W.D., „Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm”, *Rob. Cim-Int. Manuf.*, 29. évfolyam, 5. szám, 418-429 o., 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.04.001>
- [12] Ramanan T.R., Sridharan R., Shashikant K.S., Haq A.N., „An artificial neural network based heuristic for flow shop scheduling problems”, *J. Intell. Manuf.*, 22. évfolyam, 2. szám, 279-288 o., 2011.
<https://doi.org/10.1007/s10845-009-0287-5>
- [13] Linn R., Zhang W., „Hybrid Flow Shop Scheduling: A survey”, *Comput. Ind. Eng.*, 37. évfolyam, 57-61 o., 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00023-6)
- [14] Riba I., Leisten R., Framiñanc J.M., „Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective”, *Comput. Oper. Res.*, 37. évfolyam, 8. szám, 1439-1454 o., 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.001>
- [15] Goodrich M., Tamassia R., „The Christofides Approximation Algorithm”, *Algorithm Design and Applications*, Wiley, 513-514 o., 2015.
- [16] Taillard E., „Benchmarks for basic scheduling problems”, *Eur. J. Oper. Res.*, 64. évfolyam, 2. szám, 278-285 o., 1993.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90182-M](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90182-M)

SZAKEMBEREK ÉS MEGOLDÁSOK SZEMTŐL SZEMBE



ELECTROSUB

KONFERENCIA ÉS KIÁLLÍTÁS

2019.MÁRCIUS 26-28. FUSION ÉLMÉNYKÖZPONT | BUDAÖRS

WWW.ELECTROSUB.HU | INFO@ELECTROSUB.HU | FACEBOOK.COM/ELECTROSUB

VEVŐI, PARTNEREI, KONKURENCIÁI OTT LESZNEK! ÖNT IS VÁRJUK!

Association Connecting Electronics Industries



AZ ELEKTRONIKAI IPAR TALÁLKOZÓPONTJA

Az Electrosub az elektronikai és a hozzá kapcsolható iparágak koncentrált üzleti és szakmai fóruma. Érint minden olyan szakterületet, ahol az elektronika valamilyen formában jelen van.

A rendezvény megszólítja mindazon cégeket, intézményeket, szervezeteket, amelyek elektronikai műszaki megoldásokon alapuló termékek előállításában érdekeltek, akár tervezőként, kutatóként, fejlesztőként, gyártóként, szolgáltatóként, oktatóként, kereskedőként, vagy bármi más módon, függetlenül a termékek végső felhasználási területétől.

A kiállítás mellett 3 napos konferencia 2 párhuzamos szekcióban zajlik!