

# ELEKTRONIKAI TECHNOLOGIA ÉS GYÁRTÁSINFORMATIKA

2018/2

**Krammer Olivér:**

*Újraömllesztéses forrasztás stencilnyomtatási folyamatának modellezése (3. oldal)*

**Géczy Attila, Krammer Olivér, Martinek Péter, Bonyár Attila, Illés Balázs, Bojta Péter:**

*Oktatás a felhőben: a mikroelektronikai felhőalapú szövetség (MECA) (11. oldal)*

**Géczy Attila, Mohamed Amine Alaya, Straubinger Dániel, Hantos Gusztáv, Bozsóki István:**

*A gőzfázisú újraömllesztéses forrasztás megfigyelése újszerű alkalmazott szenzorikai módszerekkel (15. oldal)*

**Berényi Richárd, Ruzinkó Miklós:**

*Integrált induktivitások lézeres megmunkálással segített készítése (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](mailto: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](mailto:admin@ett.bme.hu)

**Felelős kiadó: Dr. Harsányi Gábor, tanszékvezető**

**ISSN 2631-0813**

# Újraömllesztéses forrasztás stencilnyomtatási folyamatának modellezése

Krammer Olivér

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

**Tartalmi kivonat.** Napjaink elektronikus áramköreinek szerelésénél az egyik legkritikusabb lépés a forrasztás stencilnyomtatása, melynek alapos vizsgálata, pl. numerikus modellezéssel elengedhetetlen. Jelen cikk a stencilnyomtatási folyamat numerikus modellezésének lépéseit részleteiben tárgyalja. A peremfeltételek kritikus részeit, a geometriai valamint az anyagparamétereket egyaránt részletesen ismertetem. Bemutatom, hogy milyen módszerrel lehetséges a stencilnyomtatás numerikus modelljének validálása, a modell érvényességének ellenőrzése. Megmutatom, hogy milyen mértékben csökken a stencilnyomtató-kés szöge a nyomtatás közbeni késerő hatására. Ismertetem, hogy milyen mérési módszerrel mutatható ki a forrasztás viszkozitásának csökkenése a stencilnyomtatási folyamat során. Ugyanezen mérési módszerrel kimutatható a különböző szemcseméretű forrasztások reológiai tulajdonságai közötti különbség is. A reológiai tulajdonságok modellezésével kapcsolatban taglalom az elterjedt, Cross és Carreau-Yasuda anyagmodelleket. Végezetül ismertetem a gépi tanulás lehetséges alkalmazását a stencilnyomtatási folyamat optimalizálására.

**Kulcsszavak:** stencilnyomtatás; forrasztás; reológia; tixotropia; numerikus modellezés

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban az elektronikai eszközök tömeggyártását az automatizált felületszerelési technológia uralja, melynél a nyomtatott áramköri lemezre az alkatrészeket ún. újraömllesztéses forrasztással rögzítik [1,2]. A modern áramkörökben az alkatrész méretek folyamatosan csökkennek, hogy az áramköri paraméterek megfeleljenek a hordozható-, az IoT- (Internet of Things) és az 5G eszközök követelményeinek. Az alkatrészek csökkenő mérete (pl. a passzív alkatrészekenél 200 x 100  $\mu\text{m}$ ) komoly kihívást jelent a forrasztási technológia legkritikusabb lépésénél, a forrasztás (folyasztószer és forrasztószemcsék szuszpenziója) felvitelére szolgáló stencilnyomtatás során [3,4]. Kutatások szerint a gyártási hibák akár 50–60%-a is erre a folyamatra vezethető vissza [5]. A nyomtatási folyamat még kritikusabbá vált az ultra-finom raszterosztású, mint pl. QFN (Quad-Flat-No-Lead) és  $\mu\text{BGA}$  (Micro Ball Grid Array) [6] tokozású alkatrészek széleskörű elterjedésével, mert ezen alkatrészekhez még kisebb méretű apertúrák tartoznak a stencilen, mint a passzív alkatrészekhez. Ezért elengedhetetlen a stencilnyomtatási-folyamat alapos, új módszerekkel történő vizsgálata pl. numerikus modellezéssel, az ún. „zero-defect”, nulla-hibás gyártás eléréséhez.

A stencilnyomtatási folyamatot numerikus modellekkel vizsgáló kutatások eddig szignifikáns elhanyagolásokat tartalmaztak. Durairaj és tsai. munkájuk során például mérték a különböző típusú forrasztások reológiai tulajdonságait [7] annak érdekében, hogy a numerikus modellezésénél figyelembe tudják venni a forrasztások nem-newtoni viselkedését, de nem vették figyelembe a forrasztások nyomtatás közbeni tixotropikus, időfüggő reológiai viselkedését. A forrasztások viszkozitása a legelső nyomtatástól kezdve nyomtatásról nyomtatásra csökken, és legalább 5–6 nyomtatás szükséges az állandósult állapot eléréséhez a viszkozitás szempontjából. A viszkozitás időfüggésének mérése eddig csak konstans nyírási ráták mellett valósult meg [8,9]. Ez egyrészt nem ad pontos képet a nyomtatás közbeni viszkozitás csökkenéséről az eltérő időtartamok miatt; a mérés időtartama több perc [10,11], míg a stencilnyomtatás időtartama 30–90 s. Másrészt elhanyagolták azt, hogy a stencilnyomtatási folyamat során a nyomtatások között állásidő van (hossza 15–60 s), mely során a forrasztás viszkozitása növekszik.

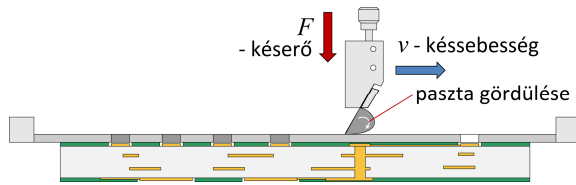
Nem elemezték eddig azt sem, hogy a különböző szemcseméretű forrasztóanyagot tartalmazó paszták eltérő tulajdonságai milyen hatással vannak a

numerikus modellek eredményeire. Elhanyagolták továbbá azt, hogy a stencilnyomatás közben a nyomtatókés deformálódik a késelő hatására, azaz a stencil síkjával bezárt szöge csökken, amely befolyásolja a nyomtatás eredményét. Eddigi kutatások mindig a terheletlen késszöget (pl. 60° vagy 45°) vették figyelembe [12]. Felmerül továbbá a „digitális iker” létrehozásának lehetősége, a gépi tanulás lehetőségeinek kiaknázása az elektronikai gyártási folyamatok optimalizálására.

## 2. STENCILNYOMTATÁS MODELLEZÉSE

### 2.1. A numerikus modell általános peremfeltételei

A stencilnyomatási folyamat során megadott sebességgel és megadott erővel húzzuk végig a nyomtatókést a stencil felületén. Ennek hatására a forraszpasztta mozgásba jön, gördül a kés előtt, és kitölti a stencilen lévő apertúrákat. A nyomtatás sematikus képét az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A stencilnyomatás sematikus ábrája

A forraszpasztta mozgásának leírásához a Navier-Stokes-féle mozgásegyenlethez indulhatunk ki. Mivel a forraszpaszták esetében az áramlási sebesség relatíve alacsony, a viszkozitás pedig relatíve nagy, a Navier-Stokes egyenletben (1) a konvektív gyorsulási tag ( $\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}$ ) elhanyagolható a súrlódási taghoz ( $\mu \cdot \rho^{-1} \nabla^2 \mathbf{u}$ ) képest.

$$-\frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} - \mathbf{f}, \quad (1)$$

ahol  $\rho$  a sűrűség,  $p$  a nyomás,  $\mathbf{u}$  az áramlási sebesség,  $\mu$  a dinamikai viszkozitás és  $\mathbf{f}$  a testre ható külső erők. Továbbá, a Reynolds szám (2) pedig nagyságrendekkel kisebb, mint egy ( $Re < 10^{-2}$ ) [7], ami lamináris áramlást indikál.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu}, \quad (2)$$

ahol,  $u$  az áramlási sebesség magnitúdója,  $L$  a karakterisztikus hossz és  $\mu$  a forraszpasztta dinamikai viszkozitása. Tehát a Navier-Stokes-féle mozgásegyenlet stacioner esetben a Stokes-féle áramlási egyenletre egyszerűsödik (3).

$$\nabla p = \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (3)$$

ahol az (1)-hez hasonlóan  $p$  a nyomás,  $\mu$  a viszkozitás,  $\mathbf{u}$  az áramlási sebesség és  $\mathbf{f}$  a testre ható külső erők, esetünkben  $\mathbf{f} = 0$ .

A forraszpasztta kezelhető továbbá összenyomhatatlan folyadékként, melynek eredményeképp a tömegmegmaradásra vonatkozó kontinuitási egyenlet a térfogat-megmaradás (4) egyenletévé egyszerűsödik.

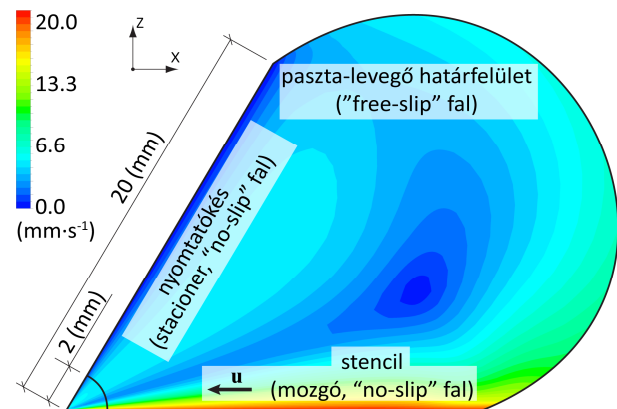
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (4)$$

Végezetül, Mannan és tsai. munkája alapján a stencilnyomatás közben a forraszpasztta belső súrlódásából származó hőmennyiség elhanyagolható, így a folyamat izotermikus folyamatként (5) kezelhető, vagyis a  $T$  abszolút hőmérséklet a  $t$  idő függvényében nem változik [13]:

$$dT / dt = 0. \quad (5)$$

### 2.2. Geometriai peremfeltételek

A modell geometriája a stencilből, a nyomtatókésből és a gördülő forraszpasztából épül fel (2. ábra: sebességtér és peremfeltételek). Lényeges geometriai paraméter a nyomtatókés és a stencil által bezárt szög. Értékének az eddigi kutatásokban rendre a kés terheletlen szögét (60° vagy 45°) alkalmazták, de fontos megemlíteni, hogy a valóságnak ez nem felel meg (lásd 3. fejezet)



2. ábra. A stencilnyomatás geometriai modellje

Az egyes határokon a következő peremfeltételek érvényesek figyelembe véve azt, hogy modellezési okok miatt a vonatkoztatási rendszer a mozgó nyomtatókéshez igazodik. A nyomtatókés statikus fal ún. „no-slip” peremfeltétellel. A „no-slip” peremfeltétel azt jelenti, hogy a folyadék fal melletti első rétegének sebessége megegyezik a fal sebességével; itt zérus. A stencil szintén „no-slip”

peremfeltétellel rendelkező mozgó fal; sebessége megegyezik a nyomtatási sebességgel, iránya ellentétes azzal. A forraszpaszta-levegő határfelületen ún. „free-slip” peremfeltétel érvényesül, amely azt jelenti, hogy a fal melletti folyadék rétegben a folyadék sebességének felületre merőleges komponense, valamint a falon a nyírási feszültség zérus.

### 2.3. Viskozitási anyagmodellek

A forraszpaszták szuszpenziók, forraszszemcséket és folyasztószert tartalmaznak kb. 50-50% térfogatszázalékban. A forraszpaszták viszkozitás szempontjából nem-newtoni tulajdonságokat mutatnak: a viszkozitásuk függ a nyírási rátától, azaz a nyírófeszültség a sebességgradienssel nem lineárisan változik (6), és a mutatott viszkozitásnak időfüggése van, csökken a terhelés folyamán (tixotrópia).

$$\tau = C \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^n = C \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (6)$$

ahol  $\tau$  a nyírás feszültség,  $C$  az anyagot jellemző konstans,  $\partial u/\partial y$  a sebességgradiens ( $y$  az elmozdulás síkjára merőleges irány), és  $n$  dimenzió nélküli, az áramlási tulajdonságokat jellemző hatványkitevő.

A nem-newtoni folyadékok főbb csoportjai közül a forraszpaszták az ún. pszeudoplasztikus, nyírásra vékonyodó folyadékok csoportjába tartoznak ( $n < 1$ ). A forraszpaszták ezen viselkedését alapvetően két anyagmodellel: vagy a Cross (7) [14] vagy a Carreau-Yasuda (8) [15] anyagmodellel szokás jellemezni, a mutatott viszkozitásukat közelíteni.

$$\eta_{Cross} = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^n}, \quad (7)$$

$$\eta_{C-Y} = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{\left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{1-n}{a}}}, \quad (8)$$

ahol  $\eta_0$  és  $\eta_{\infty}$  a nagyon alacsony ill. nagyon magas nyírási rátákhoz tartozó viszkozitások aszimptotikus értékei,  $\lambda$  idő dimenziójú állandó,  $n$  dimenzió nélküli konstans, és  $a$  a Yasuda együttható.

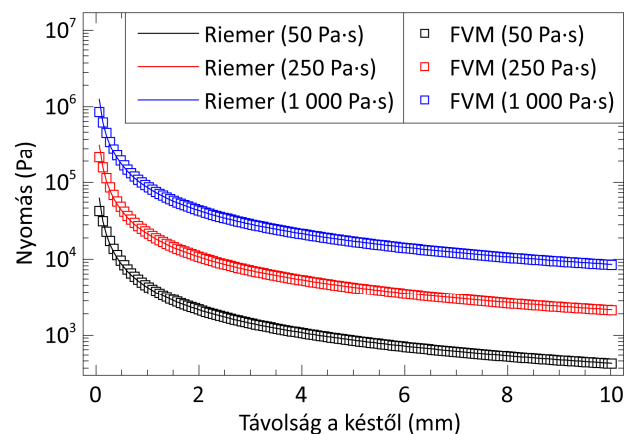
### 2.4. Stencilnyomtatás modelljének validálása

A stencilnyomtatás numerikus modelljének validálása, a modell érvényességének ellenőrzése

Riemer analitikus modellje (9) alapján lehetséges [16,17]. Riemer a Navier-Stokes-féle mozgásegyenletet oldotta meg analitikusan a szitanyomtatás problémájára. A Riemer modell alapján lehetséges a numerikus modell rácsméretét illetve a kalkuláció iterációs lépéseinek számát optimalizálni. A modell hiányossága, hogy csak newtoni tulajdonságokkal rendelkező folyadékokra alkalmazható, tehát a stencilnyomtatás numerikus modelljét konstans viszkozitású közeg alkalmazásával lehetséges ellenőrizni.

$$P = \frac{1}{r} \left( \frac{2 \sin^2 \theta}{\theta^2 - \sin^2 \theta} \right) \eta \cdot u, \quad (9)$$

ahol  $r$  a stencil és a nyomtatókész érintkezési pontjától vett távolság,  $\theta$  a késszög,  $\eta$  a viszkozitás és  $u$  a nyomtatási sebesség. A stencilnyomtatás numerikus modelljének ellenőrzését mutatja a 3. ábra.



3. ábra. A stencilen kialakuló nyomásprofil – a Riemer analitikus és a véges térfogatok módszerén (FVM – Finite Volume Method) alapuló modell összehasonlítása

A modell érvényességének (és esetleg skálázhatóságának) ellenőrzése után át lehet térni az előző alfejezetben ismertetett viszkozitási anyagmodellek használatára.

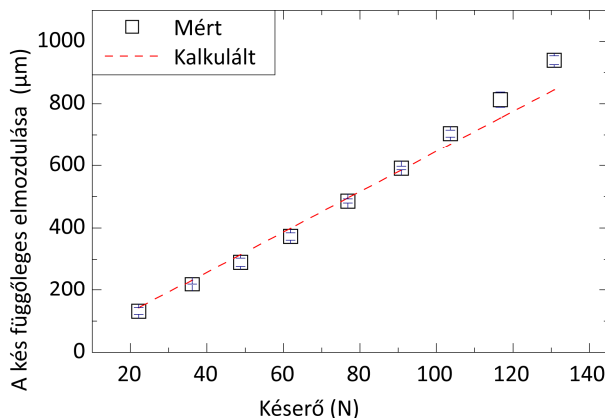
## 3. A PEREMFELTÉTELEK VIZSGÁLATA, FINOMÍTÁSA

Az előző fejezetben tárgyalt peremfeltételek közül eddig elhanyagolták, vagy nem tudták figyelembe venni a késszög nyomtatás közbeni változását (terheletlen -> terhelt késszög) illetve a forraszpaszták tixotropikus viselkedését, amely a nyomtatások során leginkább abban jelentkezik, hogy az  $\eta_0$  és  $\eta_{\infty}$  viszkozitási értékek csökkennek szignifikánsan.

### 3.1 Terhelt és érintkezési szögének meghatározása

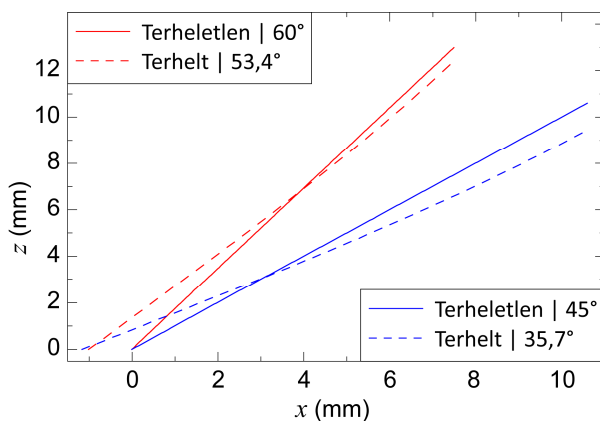
A terhelt kés (fajlagos nyomtatási erő kb. 0,3 N/mm) szögének meghatározására végelem közelítően alapuló numerikus modellt készítettünk. A modell érvényességét empirikus úton ellenőriztük [18] oly módon, hogy különböző terhelések esetére mértük a kés függőleges elmozdulását, majd ugyanezt számítottuk a numerikus modell segítségével (4. ábra).

A vizsgált nyomtatókés geometriai paraméterei: terheletlen készsög  $60^\circ$ , penge anyaga rozsdamentes acél, penge vastagsága 200  $\mu\text{m}$ , penge magassága 15 mm, kés hossza 300 mm. A numerikus modell érvényességének ellenőrzése után meghatároztuk a terhelt szögeket  $45^\circ$ -os terheletlen készsögre, valamint 6, 20, 25 mm pengemagasságokra is [19].



4. ábra. A nyomtatókés mért és numerikus modellel számolt függőleges elmozdulása a késérő hatására, amely elmozdulás készsög csökkenést eredményez

Jelen cikkben csak a 15 mm-es pengemagasságra vonatkozó eredményeket mutatom be, amely alapján a 0,3 N/mm fajlagos késérő hatására a  $60^\circ$ -os kés szöge  $53\text{--}54^\circ$ -ra, míg a  $45^\circ$ -os kés szöge  $36^\circ$ -ra csökken (5. ábra).

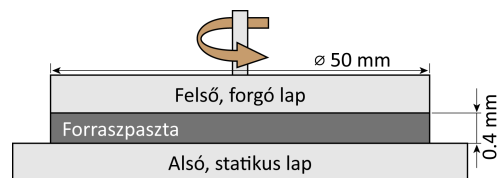


5. ábra. A nyomtatókés profilja és készsöge terheletlen és terhelt esetekben

Ez a csökkenés nem elhanyagolható változást okoz a stencilnyomtatás numerikus modellezésében, a stencil felületén kialakuló nyomásprofilban. A nyomtatókés szöge mellett a másik kritikus paraméter a modellezés szempontjából a forraszpaszta anyagi tulajdonságai, melyről a 3.2 fejezet értekezik.

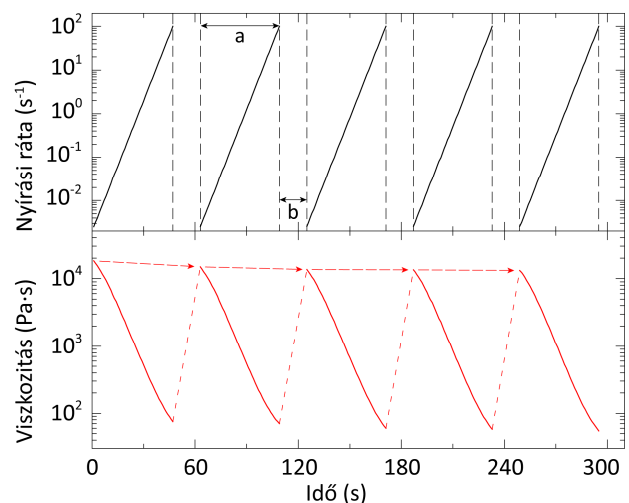
### 3.2 A forraszpaszta tixotropikus tulajdonságainak vizsgálata

A forraszpaszta tixotropikus tulajdonságainak vizsgálatához olyan mérési szekvenciát alakítottunk ki, melynél a nyírási rátától (tartomány:  $0,002\text{--}100\text{ s}^{-1}$ ) függő viszkozitást egymás után többször is megmértük rotációs reométerrel; lap-lap elrendezésben. A mérés során a forraszpasztát az alsó, statikus lapra helyezzük (6. ábra), ráhelyezzük a felső, forgó lapot és mérjük a forgó lapra ható nyírófeszültséget adott, illetve több fordulatszám mellett.



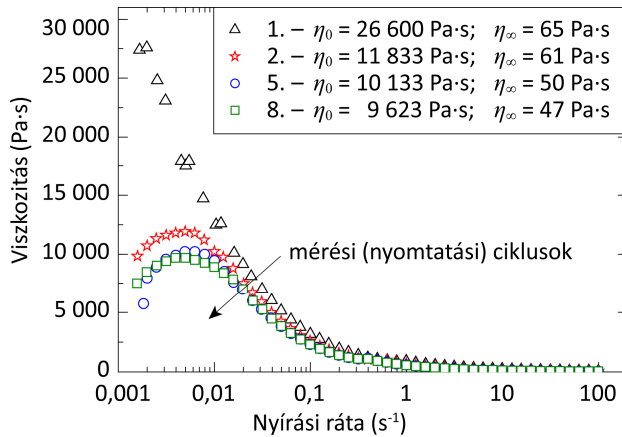
6. ábra. A forraszpaszta reológiai mérésének elvi ábrája

A mérési ciklusok között a stencilnyomtatási folyamat általános állásidejének (15, 30 vagy 60 s) megfelelő szüneteket iktattunk be [20]. Ezzel modelleztük a forraszpaszta viselkedését a gyártás indításakor, a viszkozitás csökkenését az első nyomtatástól kiindulva. A mérési szekvenciát és a viszkozitás elvi csökkenését a 7. ábra mutatja.



7. ábra. A viszkozitás mérésének szekvenciája és a viszkozitás elvi csökkenése (a – egy mérési ciklus időtartama; b – a nyomtatás általános állásidejének megfelelő mérési szünet, itt 15 s)

Az eredmények egyértelmű csökkenést mutattak a viszkozitás menetében a mérési ciklusok során (8. ábra), melynek feltételezett oka, hogy a nyomtatások során a forraszpasztá szemcséi rendezett sorokba állnak össze, viszont a teljes rendeződéshez nem elegendő egy nyomtatási (mérési) ciklus, hanem legalább 5–6 ciklusra van szükség. A rendezettség mértéke telítődési jelleggel éri el állandósult állapotát, melynek következtében a viszkozitás csökkenése a mérési ciklusok függvényében nemlineáris jelleget mutat.

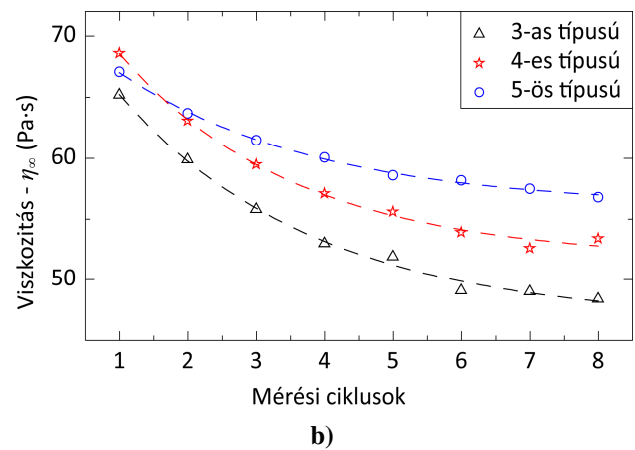
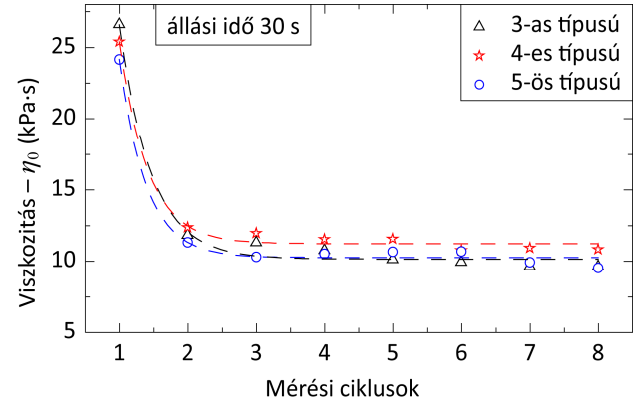


**8. ábra.** A viszkozitási görbék alakulása a mérési ciklusok számának függvényében (3-as típusú forraszpasztá – szemcseméret: 20–45 μm; állásidő: 30 s)

A forraszpasztá stabilizálódott állapotában az  $\eta_0$  és  $\eta_\infty$  viszkozitási értékek akár 30%-kal is kisebbek lehetnek, mint ugyanezek a forraszpasztá kezdeti állapotában. Az állandósult állapot csak 5–6 mérés (azaz 5–6 stencilnyomtatás) után áll be, legalább ennyi nyomtatásra van szükség ahhoz, hogy azután a finom raszterosztású alkatrészek helyeinél konzisztens minőségű forraszpasztá-lenyomatokat kapjunk.

A mérési módszer alkalmazásával továbbá lehetőség nyílik a különböző szemcseméretű forraszpaszták között különbségek kimutatására a viszkozításban [21], mivel az csak a stabilizálódott állapotban jelentkezik, leginkább az  $\eta_\infty$  értékében. A kezdeti állapotban az irodalmi eredmények [22] és a méréseink alapján sem mutatható ki különbség a viszkozításban. Az  $\eta_0$  és  $\eta_\infty$  viszkozitási értékek alakulását a nyomtatások (mérési ciklusok) számának függvényében a 9. ábra mutatja különböző szemcseméretű forraszpaszták esetére. Az egyes forraszpaszták szemcsemérete a következő: 3-as típusú – 20–45 μm; 4-es típusú – 20–38 μm; 5-ös típusú – 15–25 μm. Végezetül

megállapítottuk, hogy a 2.3 alfejezetben bemutatott viszkozitási anyagmodellek közül a Cross modell a forraszpaszták kezdeti állapotbeli viszkozitását tudja csak megfelelően lekövetni, míg a stabilizálódott állapot lekövetéséhez a Carreau-Yasuda modell megfelelő.



**9. ábra.** A viszkozitást jellemző paraméterek alakulása a mérési ciklusok során különböző típusú forraszpaszták esetére: a) az  $\eta_0$  értékének alakulása – a forraszpaszták közötti különbség nem szignifikáns; b) az  $\eta_\infty$  értékének alakulása – a különbség szignifikáns

Az anyagmodellek paramétereit az egyes esetekben az 1. táblázat tartalmazza.

**1. táblázat.** Az egyes viszkozitási anyagmodellek paramétereit a különböző állapotú, különböző típusú forraszpasztákhoz (C-Y a Carreau-Yasuda modell)

	Kezdeti állapot	Stabilizálódott állapot		
		3-as tip.	4-es tip.	5-ös tip.
	Cross	C-Y	C-Y	C-Y
$\eta_0$ [Pa·s]	44 500	9 200	10 560	9 070
$\eta_\infty$ [Pa·s]	19	17	24	26
Idő-konst. $\lambda$ [s]	730	80	110	92
$n$	0,61	0,36	0,36	0,38
$a$	–	7	7	7

#### 4. GÉPI TANULÁSI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA A STENCILNYOMTA- TÁS OPTIMALIZÁLÁSÁRA

Gépi tanulás esetén a legkritikusabb lépés a tanítóhalmaz felépítése. Ennek tartalmaznia kell az összes bemeneti folyamatparamétert, ami szignifikáns a stencilnyomtatás szempontjából, valamint kimeneti paramétertérként a stencilnyomtatás minőségét jellemző paraméter(ek)e)t, melyek közül a legjelentősebb az ún. nyomtatási hatékonyság. A nyomtatási hatékonyság a felvitt forraszpaszta térfogatának és a stencilapertúra térfogatának hányadosa (10). Értékének megfelelő nyomtatás esetén a  $100\% \pm 15\text{--}20\%$ -os tartományba kell esnie.

$$TE = \frac{V_{\text{lenyomat}}}{V_{\text{apertúra}}}, \quad (10)$$

ahol  $TE$  a nyomtatási hatékonyság,  $V_{\text{lenyomat}}$  az áramköri hordozó kontaktusfelületére felvitt forraszpaszta térfogata,  $V_{\text{apertúra}}$  a stencilapertúra térfogata.

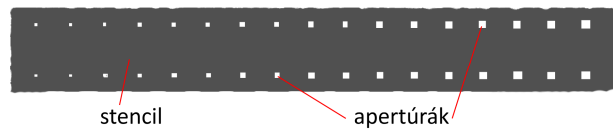
A nyomtatási hatékonyság alapvetően négy paramétertől függ: a stencilnyomtató gépképességétől, ami magába foglalja az összes nyomtatási paramétert (késerő, késszög, késsebesség stb.); a forraszpaszta reológiai tulajdonságaitól; a stencil készítési technológiájától (lézervágás, galvanoplasztika stb.); valamint a stencilapertúra méretétől, melyet leginkább annak terület-fal felület arányával szokás jellemezni (11).

$$AR = \frac{w \cdot l}{2(w+l) \cdot d} \quad (11)$$

ahol  $AR$  a terület-fal felület arány,  $w$  a stencilapertúra rövidebbik élének hossza,  $l$  az apertúra hosszabbik élének hossza,  $d$  pedig a stencilfólia vastagsága. A tanítóhalmaz építésénél a következő paramétereket tervezzük figyelembe venni: nyomtatási sebesség (20–70 mm/s), a forraszpaszta reológiája különböző típusú forraszpaszták használatával, valamint az apertúra mérete a 10. ábrán mutatott tesztmintázat alkalmazásával.

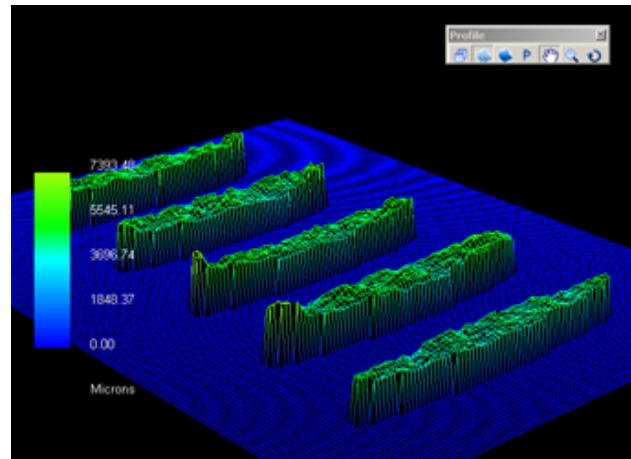
A nyomtatási hatékonyság meghatározásához pedig az ASC Vision 150 3D mérőberendezés alkalmazható, mely a felvitt forraszpaszta magassága, körvonala mellett a térfogat megmérésére is alkalmas (11. ábra).

$w$ : 8-tól 24 mil-ig (200–600  $\mu\text{m}$ )



$AR$ : 0,33-től 1,2-ig (küszöbérték 0,66)

10. ábra. Stencil mintázata a nyomtatási hatékonyság apertúraméret-függésének vizsgálatára



11. ábra. Az ASC Visionmaster berendezéssel vizsgált forraszpaszta lenyomatok

A tanítóhalmaz felépítéséhez szükséges mérések után a stencilnyomtatás optimalizálására a következő módszerek alkalmazhatók pl.: adaptív neuro-fuzzy rendszerek (ANFIS – Adaptive neuro fuzzy inference systems); döntési fák (Decision trees); mesterséges neurális hálók (ANN – Artificial neural networks). A különböző módszerek becslési hibája az ún. SMAPE – szimmetrikus átlagos abszolút százalékos hiba (12) (Symmetric Mean Absolute Percentage Error) [23] és MAPE – átlagos abszolút százalékos hiba (13) (Mean Absolute Percentage Error) [24] paraméterekkel jellemezhető.

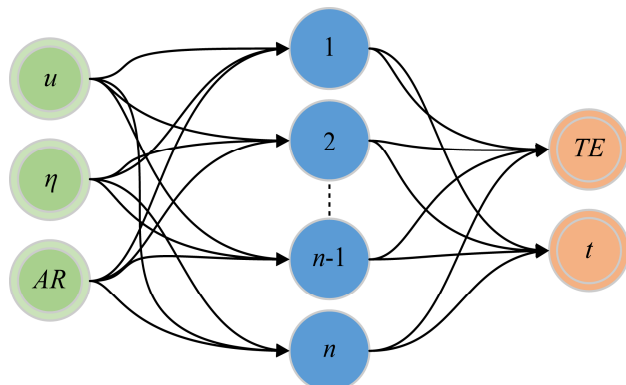
$$SMAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|F_t - A_t|}{(|A_t| + |F_t|) / 2}, \quad (12)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{F_t - A_t}{A_t} \right|, \quad (13)$$

ahol  $n$  a minta elemszáma,  $F_t$  a  $t$ -ik elem becslött értéke,  $A_t$  pedig a valós, ill. mért érték. A hibamennyiségek meghatározásával optimalizálható a gépi tanulási módszer. ANN esetében például fontos paraméter az ún. rejtett neuronok száma (12. ábra). Amennyiben a neuronok száma alacsony a módszer nem tudja megfelelően becslőni a nyomtatási hatékonyságot; magas neuronszám esetén pedig megnő a túlilleszkedés (overfitting) veszélye, amely szintén magasabb becslési hibát



eredményez. Az ANFIS esetében pedig a tagsági függvények száma az a kritikus paraméter, amely az előbbihez hasonlóan nagymértékben van hatással a becslési hibára.



Bemeneti réteg      Rejtett neuronok      Kimeneti réteg

**12. ábra.** Az ANN lehetséges struktúrája a stencilnyomatás vizsgálatára ( $u$  a nyomtatási sebesség,  $\eta$  a forraszpaszta viszkozitása,  $AR$  az apertúra terület-falfelület arány,  $TE$  a nyomtatási hatékonyság,  $t$  a felvitt lenyomat vastagsága)

Az optimalizálás után pedig a stencilnyomatás eredménye, pl. a nyomtatási hatékonyság vagy a lenyomat átlagos vastagsága becsülhető különböző bemenő paraméter értékhalmozok esetére.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk bemutatta a stencilnyomatás modellezésének lehetőségeit, valamint a numerikus modellezés kritikus peremfeltételeit. Megfelelő modellek, alkalmas peremfeltételek és precíz anyagparaméterek alkalmazásával nagymértékben javítható az újraömlasztési forrasztási technológia, azon belül a stencilnyomatási folyamat minősége.

A forrasztási technológia javítása a kritikus elektronikai rendszereknél, mint pl. önvezető gépjárművek, is áttörést hozhat a megbízhatóság terén, ahol általános követelmény, hogy a tervezett élettartamon belül egyáltalán nem történhet meghibásodás, tehát egy nagyméretű populációt tekintve nem a meghibásodásig eltelt átlagos idő, hanem az első meghibásodásig eltelt idő a kritikus.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS



A cikk az emberi erőforrások minisztériuma ÚNKP-18-4 kód-számú új nemzeti kiválóság programjának támogatásával készült.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Illés B., Géczy A., Skwarek A., Busek D., „Effects of substrate thermal properties on the heat transfer coefficient of vapour phase soldering”, *Int. J. Heat Mass Tran.*, 101. évfolyam, 69-75 o., 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.04.116>
- [2] Illés B., Géczy A., „Investigating the heat transfer on the top side of inclined printed circuit boards during vapour phase soldering”, *Appl. Therm. Eng.*, 103. évfolyam, 1398-1407 o., 2016. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.153>
- [3] Lau C.S., Khor C.Y., Soares D., Teixeira J.C., Abdullah M.Z., „Thermo-mechanical challenges of reflowed lead-free solder joints in surface mount components: a review”, *Solder. Surf. Mount Technol.*, 28. évfolyam, 2. szám, 41-62 o., 2016. <https://doi.org/10.1108/ssmt-10-2015-0032>
- [4] Skwarek A., Synkiewicz B., Kulawik J., Guzdek P., Wittek K., Tarasiuk J., „High temperature thermogenerators made on DBC substrate using vapour phase soldering”, *Solder. Surf. Mount Technol.*, 27. évfolyam, 3. szám, 125-128 o., 2015. <https://doi.org/10.1108/ssmt-04-2015-0017>
- [5] Tsai T.N., „Modeling and optimization of stencil printing operations: A comparison study”, *Comput. Ind. Eng.*, 54. évfolyam, 3. szám, 374-389 o., 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.08.001>
- [6] Pan J., Tonkay G.L., Storer R.H., Sallade R.M., Leandri D.J., „Critical Variables of Solder Paste Stencil Printing for Micro-BGA and Fine-Pitch QFP”, *IEEE T. Electron. Pa. M.*, 27. évfolyam, 2. szám, 125-132 o., 2004. <https://doi.org/10.1109/tepm.2004.837965>
- [7] Durairaj R., Jackson G.J., Ekere N.N., Glinski G., Bailey C., „Correlation of solder paste rheology with computational simulations of the stencil printing process”, *Solder. Surf. Mount Technol.*, 14. évfolyam, 1. szám, 11-17 o., 2002. <https://doi.org/10.1108/09540910210416422>
- [8] Mallik S., Ekere N.N., Marks A.E., Seman A., Durairaj R., „Modelling of the Time-dependent Flow Behaviour of Lead-Free Solder Pastes used for Flip-Chip Assembly Applications”, *2nd ESTC conf.*, United Kingdom, 1219-1224 o., 2008. <https://doi.org/10.1109/estc.2008.4684527>
- [9] Pietriková A., Kravčík M., „Boundary Value of Rheological Properties of Solder Paste”, *34th ISSE conf.*, Slovakia, 94-97 o., 2011. <https://doi.org/10.1109/isse.2011.6053557>
- [10] Pietriková A., Kravčík M., „Investigation of Rheology Behavior of Solder Paste”, *35th ISSE conf.*, Austria, 138-143 o., 2012. <https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273124>
- [11] Ekere N.N., He D., Cai L., „The Influence of Wall Slip in the Measurement of Solder Paste Viscosity”, *IEEE T. Compon. Pack. T.*, 24. évfolyam, 3. szám, 468-473 o., 2001. <https://doi.org/10.1109/6144.946495>

- [12] Glinski G.P., Bailey C., Pericleous K.A., „A non-Newtonian computational fluid dynamics study of the stencil printing process”, *P. I. Mech. Eng. C-J. Mec.*, 215. évfolyam, 4. szám, 437-446 o., 2001. <https://doi.org/10.1243/0954406011520869>
- [13] Mannan S.H., Ekere N.N., Ismail I., Currie M.A., „Flow processes in solder paste during stencil printing for SMT assembly”, *J. Mater. Sci.-Mater E.*, 6. évfolyam, 1. szám, 34-42 o., 1995. <https://doi.org/10.1007/bf00208132>
- [14] Ferguson J., Kembrowski Z., „Applied Fluid Rheology”, *Springer Netherlands*, 1991, ISBN 978-1-85166-588-4.
- [15] Boyd, J., Buick, J.M., „Analysis of the Casson and Carreau-Yasuda non-Newtonian blood models in steady and oscillatory flows using the lattice Boltzmann method”, *Phys. Fluids*, 19. évfolyam, 9. szám, 093103, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2772250>
- [16] Riemer, D., „Analytical engineering model of the screen printing process: Part I.”, *Solid State Technol.*, Augusztus, 107-111. 1988.
- [17] Riemer, D., „Analytical engineering model of the screen printing process: Part II.”, *Solid State Technol.*, Szeptember, 85-90. 1988.
- [18] Krammer O., Molnár L.M., Jakab L., Szabó A., „Modelling the effect of uneven PWB surface on stencil bending during stencil printing process”, *Microelectron. Reliab.*, 52. évfolyam, 1. szám, 235-240 o., 2012. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2011.08.012>
- [19] Krammer O., Jakab L., Illés B., Bušek D., Pelikánová I.B., „Investigating the attack angle of squeegees with different geometries”, *Solder. Surf. Mount Technol.*, 30. évfolyam, 2. szám, 112-117 o., 2018. <https://doi.org/10.1108/ssmt-09-2017-0023>
- [20] Krammer O., Gyarmati B., Szilágyi A., Storcz R., Jakab L., Illés B., Géczy A., Dušek K., „Investigating the thixotropic behaviour of Type 4 solder paste during stencil printing”, *Solder. Surf. Mount Technol.*, 29. évfolyam, 1. szám, 10-14 o., 2017. <https://doi.org/10.1108/ssmt-10-2016-0022>
- [21] Krammer O., Gyarmati B., Szilágyi A., Illés B., Bušek D., Dušek K., „The effect of solder paste particle size on the thixotropic behaviour during stencil printing”, *J. Mater. Proc. Tech.*, 262. évfolyam, 571-576 o., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.027>
- [22] Pabst W., „Fundamental considerations on suspension rheology”, *Ceram., – Silikáty*, 48. évfolyam, 1. szám, 6-13 o., 2004.
- [23] Flores B.E., „A pragmatic view of accuracy measurement in forecasting”, *Omega*, 14. évfolyam, 2. szám, 93-98 o., 1986. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(86\)90013-7](https://doi.org/10.1016/0305-0483(86)90013-7)
- [24] Myttenaere A., Golden B., Le Grand B., Rossi F., „Mean Absolute Percentage Error for regression models”, *Neurocomputing*, 192. évfolyam, 5. szám, 38-48 o., 2016. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>

# Oktatás a felhőben: a mikroelektronikai felhőalapú szövetség (MECA)

Géczy Attila, Krammer Olivér, Martinek Péter, Bonyár Attila,  
Illés Balázs, Bojta Péter

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

**Tartalmi kivonat.** A felsőoktatási intézményeknek általában fokozott kihívással kell szembenézniük, amikor a tudományágak területeinek széles körű lefedésével szeretnék a szükséges oktatási infrastruktúrát és szakértői háttérrel kialakítani. Ezért is van szükség a szakterületeket átfogó virtuális oktatási anyagokra, amelyek kifejlesztése és alkalmazása az elmúlt évtizedek fontos oktatási irányzatainak tekinthetőek. A BME egy európai Erasmus+ program keretén belül csatlakozott a MECA (Microelectronics Cloud Alliance) konzorciumhoz, amelyben az egyetemek a projekt partnerek számára egy felhőalapú oktatási rendszer keretében biztosítanak hozzáférést távoli hálózati megoldások keretein belül egymás mikroelektronikai felszereléseinek leírásaihoz, tananyagokhoz, laboratóriumi, kutatási, illetve szoftver rendszereihez.

**Kulcsszavak:** e-learning; elektronikus oktatás; felhőalapú tudástár; Erasmus+

## 1. BEVEZETÉS

A mikro- és nanoelektronika a tudományterületek egyik leggyorsabban fejlődő területe, és alapja az elektronikus gazdaság fejlődésének is. A folyamatos oktatás és tanulás kérdése is fontos ebben a rendszerben. A technológiai tudás bővítésének érdekében az egyes európai oktatási és kutató-fejlesztő intézeteiknek össze kell fogniuk, hogy megerősítsék a térség K+F potenciálját. [1] Erre a kihívásra jelenthet megoldást az egyesített e-oktatási felületek kialakítása, ahol az ipar és az akadémia együttműködése újszerű potenciált hozhat az oktatási anyagok minőségét, tartalmát és hozzáférhetőségét illetően. Az elmúlt években több hasonló rendszer kialakítása is megtörtént a régióban, amelyek során fontos volt a tudástranszfer kérdése [2], a gyakorlatias problémamegoldás elektronikus tudanyagokba való integrálása [3] és az ezen elvrendszerek mentén zajló fejlesztések éles pilot-projektekben való tesztelése. [4,5]

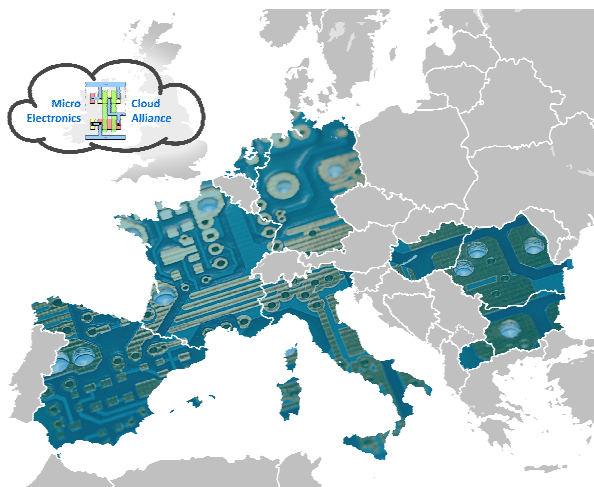
A környező országok hasonló kezdeményezései közül érdemes megemlíteni az romániai háttérrel megvalósított mSysTech projektet [6, 7], a svájci-makedón-bulgár közreműködésben futó SCOPES projekteket [8], valamint a DIPSEIL és Train\_Nanoelectronics kezdeményezéseket [9]. A tématerületen hazánkban is történtek jövőbe mutató fejlesztések az elektronikus oktatás területén. A mikro-elektromechanikai eszközök és a szenzorok területén a MEMSEDU [10] és a SENSEDU [11]

internetes kurzusokat szükséges megemlíteni. Az Eurotraining kurzusok [12] mellett pedig az Elec2EAT [13] és a Mechatronikai mérnök MSc tananyagfejlesztés [14] anyagok kötötték össze az ipar és az akadémia között a pontokat.

A MECA (Microelectronic Cloud Alliance) a korábbi tapasztalatokra építve folytatta a munkát. A szövetség feladata az volt a fentiek alapján, hogy létrehozson egy felhő alapú infrastruktúrára (szoftver/hardver) épülő rendszert, melyben az egyetemi tantárgyak és adott esetben laborgyakorlatok ismeretanyagai, a CAD eszközök, a projektötletek és a rendelkezésre álló oktatási erőforrások egyfajta "oktatási felhőt" képezzenek. Ez a szövetség egy Erasmus+ projekt keretein belül valósult meg, a projekt kialakítása során tíz európai felsőoktatási intézmény és nyolc kis- és középvállalat fejlesztett közösen különféle virtuális tananyagokat tizenhat kurzushoz. A konzorcium ezeket a kurzusokat Nyílt Oktatási Segédanyagokként (angolul: „OER”, azaz „Open Educational Resources”) teszi közzé, ezzel könnyű hozzáférhetőséget biztosít mind az egyetemi hallgatóság, mind az ipari szakemberek számára. A felhőalapú oktatási rendszer keretében a projekt partnerek felhő alapú infrastruktúrában távhozzáférést nyújtanak egymás számára a saját virtuális felszereléseikhez, laboratóriumi, kutatási, illetve megosztható szoftver rendszereihez.

A BME Elektronikai Technológia Tanszéke (BME-ETT) és hazai oldalról a Lightware Kft.

három fő ponton csatlakozott a kilenc országot képviselő, tizennyolc partnert bevonó konzorcium munkájába. A partnerek térképét az első ábra mutatja be.



1. ábra. A MECA projekt partnereinek területi eloszlása

Az oktatási anyagok terén az ETT fő kompetenciaterületeit átfogó elektronikai technológiai, valamint egy elektronikai szerelési és elektronikai vizsgálati módszereket összefoglaló modullal bővíti a MECA tudástárát. Emellett egy átfogó szenzor- és MEMS technológiai, valamint egy virtuális laboratórium modul is bekerül a felhőalapú oktatási rendszer tudástárába.

## 2. A TECHNIKAI HÁTTER

A projekt fontos hozzáadott értéke a felhőrendszert futtató szerverhátter működési elvének kidolgozása, amelyben szintén kiemelt szerepet vállalt a hazai BME és a Lightware Kft. A rendelkezésre álló felhőszolgáltatások három fő csoportra oszthatók:

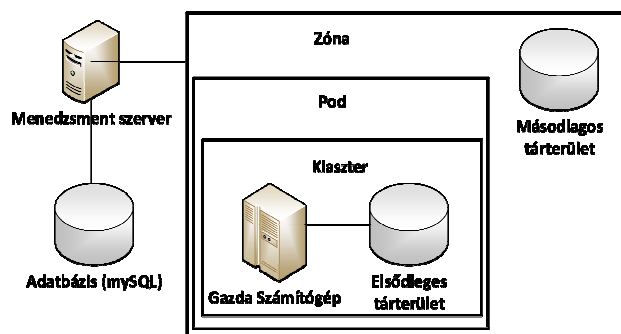
- Szoftverszolgáltatás (Software as a Service – SaaS),
- Platformszolgáltatás (Platform as a Service - PaaS) és
- Infrastruktúra-szolgáltatás (Infrastructure as a Service – IaaS).

Publikus felhőszolgáltatásokat az elmúlt években kedvező áron lehetett igényelni különböző szolgáltatóktól előre telepített szoftverek segítségével.

A nagyfokú testreszabhatóság és az alacsony beruházási költségek miatt a MECA konzorcium úgy határozott, hogy az infrastruktúra-jellegű szolgáltatás modellt (IaaS) követi a saját felhőjének

megvalósításánál. A vonatkozó felhő megépítéséhez többféle piacon elérhető megoldás választható, melyek mind képességeikben, mind árakban, mind licenzelési módjukban is jelentősen eltérnek. Néhány elterjedtebb megoldás ezek közül a szolgáltatások közül: Microsoft Private Cloud, VMware vCloud Suite, OpenStack és Apache CloudStack. A MECA konzorcium választása az Apache CloudStack-re esett, ami egy elterjedt, nyílt forráskódú, jól skálázható és minden alapvető üzleti igényt kielégítő rendszer.

A projekt során megépült, úgynevezett mCloud felhő az egyes partnerek által felajánlott hardver erőforrásokon osztozódik, ez adja a működésnek az alapjait. Minden partner egy egyszerű infrastrukturális csomópontot épít saját telephelyén. Ennek megtervezésében és megvalósításában szigorú szabályokat kellett lefektetni a későbbi integrálhatóság érdekében. Minden csomópont pontosan egy zónát, azon belül egy „pod”-ot, azon belül pedig egy „cluster”-t foglal magában. Ez a felépítés látszik a lenti 1. ábrán is.



2. ábra. A Cloudstack csomópont (node) felépítése

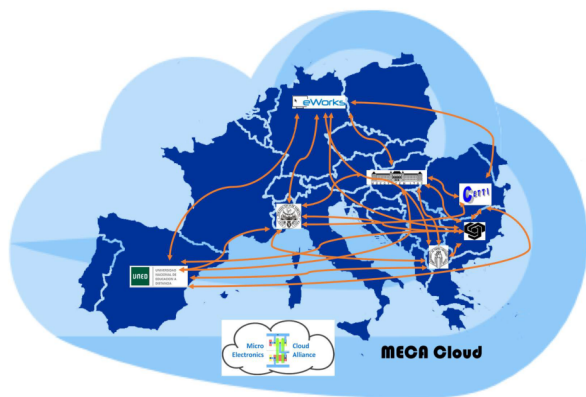
A fentiek mellett csomópontonként üzemeltetni kell egy menedzsment szervert, minimum egy gazda számítógépet, valamint minimum egy-egy elsődleges és másodlagos tárterület szolgáltatást. Valamennyi node csomópont saját, kizárólagos alhálózatban működik, melyek szabványos internet címeit (IP address) egységes rendszerben határozta meg a konzorcium a felhőn belüli egyértelmű azonosíthatóság érdekében. A hálózati megoldások tekintetében rögzítésre került továbbá, hogy kötelezően Kernel-based Virtual Machine (azaz KVM) virtualizációs technológiát alkalmaz valamennyi csomópont a gazdaszámítógépeken, a felhőből lehívható virtuális számítógépek (VM-ek) futtatásához. A csomópontok összekötéséhez az Apache CloudStack régiókon alapuló megközelítést használta a projekt. Az egyes

csomópontok egyértelműen sorszámozott régióként kerülnek megvalósításra, ami lehetővé teszi a rendszer üzemeltetői és fejlesztői számára valamennyi csomópont erőforrásainak elosztását, hozzáférését és kezelését. Egy megfelelő jogosultsággal rendelkező felhasználó – például egy oktató – egyszerre igénybe tud venni több erőforrást is a csomópontok segítségével, ezzel például ki tud szolgálni egy nagyobb létszámú vagy nagyobb erőforrás igényű elektronikus oktatási kurzust.

### 3. EREDMÉNYEK

#### 3.1. A technikai háttér eredményei

Kilenc projekt partner csomópontjainak összekötésével a mCloud működőképes és optimalizáción keresztül alkalmazható. Az alkalmazás során tovább finomodhat a működés: a hallgatói hozzáférés módszerének és szabályozásának rendszere, az oktatási környezet hivatalos tananyagokba való beépítése az egyes partnerintézményeknél kialakult alkalmazás kérdése. A projekt által felállított nemzetközi felhőrendszernek a BME is a részese, a teljes térképet pedig a 3. ábra mutatja be.



3. ábra. A MECA Clouds felépítése [15]

A rendszer minden probléma nélkül lehetővé teszi sablonok (olyan tömegesen klónozható számítógépek) definiálását, amelyek egy vagy több kurzus kiszolgálására képesek specifikus hardver/szoftver konfigurációjuknak köszönhetően.

#### 3.2. Előzetes és terepi tesztek eredményei

A rendszer előzetes pilot tesztjében a partnerintézményeknek köszönhetően 302 személy vett részt. A személyek 65%-a férfi, 35%-a nőnemű volt. Pilot tesztben résztvevők közül 90% azt jelezte vissza, hogy a rendszer kialakítása megfelel a felhasználóbarát elvárásoknak, a felület könnyen

értelmezhető és alkalmazható. A résztvevők 75%-a szerint nem szükséges technikai személyzet betanító segítsége a rendszer használatához. A résztvevők 65%-a azt jelezte, hogy a tananyagok konzisztensek, didaktikusak és a rendszer tartalmilag megfelelően van integrálva. A kezdeti tesztek azt igazolták, hogy a rendszerre méretezett Moodle külső felület megfelelő a projekt megvalósításához.

A rendszer éles terepi tesztjén a partnerek 826 résztvevővel ellenőrizték a rendszert. Ennek az úgy nevezett „field trial”-nak 45/55%-os résztvevő aránya volt a nemek tekintetében (nő/férfi). A visszajelzések alapján a következő pozitív pontokat lehetett leszűrni.

A rendszer jól strukturált, a gyors linkek és orientációs megoldások jól működnek a felhasználói felület szempontjából. A könnyű tanulási hozzáférhetőség mellett a felsorakoztatott tananyag széles spektruma is dicséretet kapott. A kezdeti visszajelzések tanulságai nagyságrendileg a terepi teszten is visszaköszöttek. A MECA rendszerrel szemben megfogalmazott általános kritika az információ nagy, olykor akár terhelő mennyiségét hozta fel fő pontként. A másik oldalról a több videó-animáció alkalmazásában látott volna még lehetőséget a tesztet elvégző felhasználók egy része. (A dicséretnek között az animációk könnyű megérthetősége is visszaköszönő elem.) A felhasználók több mint 70%-a szerint a kurzusok a munkaerőpiac igényeit is lefedik, és 95%-uk ajánlaná a rendszert másoknak is.

A belső BME-s teszten abból a szempontból is vizsgálták a hallgatók az anyagokat, hogy mennyire tudják otthoni tanulásra használni azokat, olyan formában, hogy az órai anyag mellé kapják kiegészítő tananyagként a felhőben szereplő kurzusokat. Az elégedettség általános volt, a döntő többség szerint be kellene vezetni az oktatásba a rendszert és a többség szerint az ilyen formában leadott anyagok számonkérések szempontjából (pl. zárthelyi dolgozatnál) is alkalmazhatóak.

A projekt statisztikai alapján tehát 25 kurzus készült, összesen 1128 fő tett gyakorlati próbát a rendszerrel, és végül 18 szakcikk készült a projekt eredményeinek terjesztése céljából. További információkat a projekt hazai [16] vagy a nemzetközi hivatalos [17] honlapján lehet megtalálni.

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra került a MECA projekt koncepciója, felépítése, technikai megvalósításának a háttere. A munka kivitelezése felsőoktatási intézmények és vállalatok együttműködésében történt, a felhőalapú rendszer alkalmazása pedig a (mikro)elektronikai képzés elősegítése érdekében már rendelkezésre áll a projekt zárását követően.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A MECA az (562206-EPP-1-2015-1-BG-EPPKA2-KA) sorszámú Erasmus+ Knowledge Alliance projekt keretében valósult meg.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Tzanova S., Martin P.M.C., Schaeffer C., „An European Project Virtual Performance Centred Environment for Training in aNanoelectronics”, *Web-Based Education*, Chamoni, Franciaország, 337-341 o., 2007.
- [2] Tzanova S., „Innovation of the Electronics Education Through an Internet-Based Performance Support System”, *Learning Conference 2004*, Havana, Kuba, június 27-30, 260-266 o., 2004.
- [3] Mediano C.M., Mileva N., Tzanova S., Castro M., Bastiaen T., Stonayov S., López E., Mathieu N., „Los sistemas de apoyo a la realización de tareas prácticas a través de internet: resultados de su aplicación a la enseñanza de ingeniería en diferentes universidades europeas”, *XIII congreso nacional de pedagogía*, Valencia, Spanyolország, szeptember 13-16, 270-282 o., 2004.
- [4] Tzanova S., Codreanu N., „Training Microsystems Technologies in an European eLearning Environment”, *Proc. of EDUCON 2010*, Madrid, Spanyolország, április 14-16, 2010.
- [5] Tzanova S., Codreanu N., Chaisemartin M., Beisser E., Wlekinski F., Tzanov M., Svasta P., Popescu G., Fuica R., Pantazica M., „Advanced Performance-centered and Job-linked Training Approach based on the E-Training Microsystems Technologies European Project”, *Proc. of 10th European Conference E-COMM-LINE*, 50-56 o., 2009.
- [6] Pantazica M., Codreanu N., „Multi-media “DFM” course for design of electronic modules/micro-systems”, *IEEE-SIITME 2009*; 45-49 o., 2009. <https://doi.org/10.1109/siitme.2009.5407404>
- [7] Pantazica M., Codreanu N., Svasta P., Ionescu C., „E-learning packaging technologies course in the frame of the MSYSTech European project”, *IEEE-SIITME 2010*; 317-320 o., 2010. <https://doi.org/10.1109/siitme.2010.5650874>
- [8] SCOPES, (Scientific co-operation between Eastern Europe and Switzerland), <http://www.snf.ch/en/funding/programmes/scopes/Pages/default.aspx#Documents> elérés: 2019. 02. 22.
- [9] Mediano C.M., Tzanova S., Castro M., Díaz G., Riopérez N., „Distributed Internet-based Performance Support Environment for Individualized Learning. Application in several European Universities”, *FIE 2008*, Saratoga Spring, USA, október 22-25, T1A1-T1A6 o., 2008.
- [10] Harsanyi G., Bojta P., Gordon P., Santha H., „An Internet Course for Teaching Basic MEMS Technologies and Applications: MEMSEdu”, *55th IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 1935-1942 o., 2005. <https://doi.org/10.1109/ectc.2005.1442064>
- [11] Harsányi G., Lepsényi I., Gordon P., Bojta P., Ballun G., Illyefalvi-Vitéz Z., „SensEdu - an Internet Course for Teaching Sensorics”, *IEEE Sens.*, 2. évfolyam, 1. szám, 34-40 o., 2002. <https://doi.org/10.1109/7361.987059>
- [12] Illyefalvi-Vitéz Z., Harsányi G., Balogh B., Civera P., „Analysis of Distance Learning Courses Offered by the EuroTraining Course Directory”, *55th IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 1909-1915 o., 2005. <https://doi.org/10.1109/ectc.2005.1442059>
- [13] Bátorfi R., Illyefalvi-Vitéz Z., „Teaching Electronics Assembling, Inspection and Test Techniques in Elect2EAT”, *IEEE-SIITME 2009*, 39-43 o., 2009. <https://doi.org/10.1109/siitme.2009.5407403>
- [14] Fodor D., Korondi P., Szabó T., „Mechatronikai mérnök MSc tananyagfejlesztés”, TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0042; elérés: <http://moodle.autolab.uni-pannon.hu/>; Elérés időpontja: 2019. 02. 24.
- [15] Roch M.R., Demarchi D., Klossek M., Tzanova S., „MECA, the microelectronics cloud alliance”, *2018 IEEE Global Engineering Education Conference EDUCON*, 1419-1423 o., 2018. <https://doi.org/10.1109/educon.2018.8363396>
- [16] MECA hazai honlap: <http://www.ett.bme.hu/meca/index.html>; Elérés: 2019. 02. 24.
- [17] MECA nemzetközi honlap: <http://meca-project.eu/>; Elérés: 2019. 02. 24.

# A gőzfázisú újraömllesztés forrasztás megfigyelése újszerű alkalmazott szenzorikai módszerekkel

Géczy Attila<sup>1)</sup>, Mohamed Amine Alaya<sup>1)</sup>, Straubinger Dániel<sup>1)</sup>,  
Hantos Gusztáv<sup>2)</sup>, Bozsóki István<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikai Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Egrý József u. 18.

<sup>2)</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke, 1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2.  
E-mail: gattila@ett.bme.hu

**Tartalmi kivonat.** A gőzfázisú forrasztás egy feltörekvő újraömllesztés forrasztási módszer, amely elterjedése az ipari tömeggyártásban lassú ütemben zajlik, de speciális szakterületeken, és alkalmazásoknál már most kiemelt fontosságú megoldásként tekintenek rá. A kondenzációs hőátadáson alapuló módszert egyenletes melegítése, többféle folyamatvezérlési lehetősége és a kiváló forrasztási minősége miatt alkalmazzák. A kondenzációhoz szükséges gőztér beállítása (a rendszer vezérlése) és vizsgálata azonban több szempontból is kihívást jelent, így az alkalmazott szenzorikai megközelítésben újszerű megoldásokat kell keresni. A most bemutatott összefoglaló cikk rávilágít a folyamat jellegzetességeire, a vezérlési módokra, és bemutatja az újszerű alkalmazott szenzorikai (hőmérsékletmérési, kapacitív, infrakamerás, nyomásmérési) módszereket, amelyek végül a folyamat szabályzásában, és végül az optimalizált forrasztási minőségben hasznosulhatnak.

**Kulcsszavak:** gőzfázisú forrasztás, kondenzációs hőátadás, alkalmazott szenzorika

## 1. BEVEZETÉS

Az elektronikai ipar szereléstechnológiája során kulcsfontosságú lépés az újraömllesztés forrasztás. A szereléshez előkészített hordozóra (nyomatott huzalozású lemez, áramköri hordozó, „printed circuit board” - PCB) stencilnyomatással kerül fel a forrasz paszta formájában, majd automatizált alkatrészbeültetést követően hőközlést alkalmaznak a szerelvényen. Ez az újraömllesztés, amelynek a végén a visszahűlt forraszanyag létrehozza hordozó és alkatrész között a mechanikai-villamos kötést.

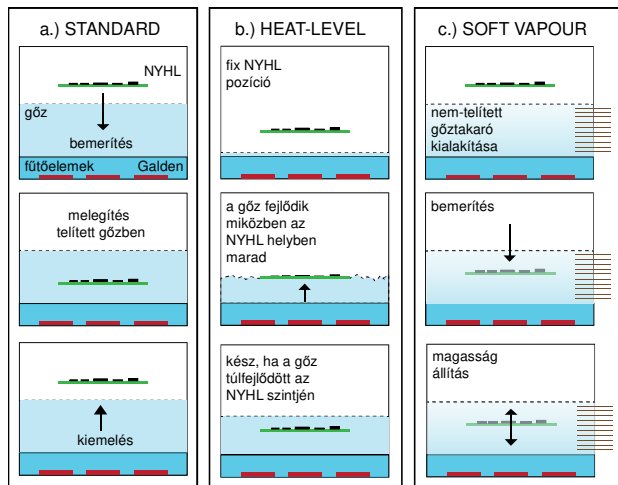
A hőátadási módszerek között elterjedt az infrasugárzáson alapuló hőátadás, az iparban számottevően a kényszerkonvekciós kemencéket használják [1], az elmúlt időszakban feltörekvő módszerként jelent meg a gőzfázisú forrasztás („vapour phase soldering” – VPS) is [2], amely a filmszerű kondenzáció elvén alapul. A módszert 1975-ben fejlesztették ki [3], de az alkalmazott CFC-tartalmú hőközlő anyagok miatt háttérbe szorult a technológia, ami az elmúlt két évtizedben [4] és az ólommentes technológiák térnyerésével kezd ismét az ipari alkalmazás figyelmébe kerülni. Az új népszerűség oka a Galden folyadék széles körű elterjedése volt [5], amely perfluor-poliéter típusú, inert hőközlő anyagot kínált a hőátadáshoz.

A folyamat során a Galdent forralják egy tartály alján, a keletkező gőz pedig a kondenzációs hőátadás közegének tekinthető. A forrásponthoz képest hideg állapotban bemártott szerelvényen megindul a lecsapódás, ezzel pedig a filmszerű kondenzáció egyenletes hőátadási elvei érvényesülnek a szerelvény szabad felületein.

A módszert többféleképpen lehet alkalmazni. A standard megoldás (1. ábra. a) során telített gőzbe mártják a szerelvényt, amely rapid, de egyenletes felmelegedéssel áll be a csúcshőmérsékletre. Ettől egy fokkal összetettebb az úgy nevezett „heat-level” módszer (b), ahol a szerelvényt egy fix pontra helyezik a kemencében, a Galden gőze pedig alulról tör a lemez irányába, ami a kondenzáció során folyamatosan elvonja maga körül a gőzt. Idővel (a fűtési teljesítmény függvényében) a gőz túlfelődik a lemezen vertikális irányban, amit egy szenzor jelez (jellemzően K-típusú hőelem). A harmadik lehetőség a telítetlen gőztakaróban való vertikális mozgatás, az úgynevezett „soft-VPS” (c) [6], ami komplex hőprofilok létrehozására lett kifejlesztve.

A fenti módszereket az 1. ábra mutatja be. A vezérlési módokat a későbbiekben további lehetőségekkel bővítették: a kemence munkatere kaphatott infra-előfűtő zónát [6], kétrétegű

gőzoszlopot, a zóna mentén vertikálisan elhelyezett többkörös hűtőrendszert, és vákuumos kamrát, ahol az olvadt állapotban lévő forraszból vákuummal lehet a gázzárványok mennyiségét csökkenteni. [7]



1. ábra. Különböző módszerek a hőtadásra gőzfázisú forrasztás során

## 2. A FOLYAMAT MEGFIGYELÉSE HŐMÉRSÉKLETMÉRŐ SZENZOROKKAL

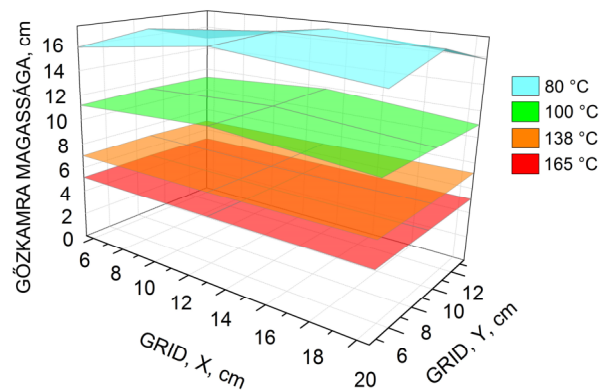
A gőzfázisú forrasztóállomások belső megfigyelése általában hőelemekkel történik. Ezek közül leggyakoribb a K-típusú hőelem, amely szonda formájában, vagy a szerelvény vizsgálatára különböző rögzítési lehetőségekkel alkalmazható. A hőelemet a folyadékban, a gőztér különböző pontjaiban, a szerelvényen különböző pozíciókban, illetve a mintatartón szokás elhelyezni konstrukciótól függően.

A munkatérben és a szerelvényen elhelyezett hőelemek segítségével a munkatér hőmérséklete a Z tengely mentén feltérképezhető, a hőmérséklet-visszacsatolás segítségével pedig előre leprogramozott profilkövetés valósítható meg. Géczy [8] és Livovsky [9] a visszacsatolt hőmérsékletet a fentebb bemutatott soft-VPS további finomítására használta. A hőelemek segítségével készített szabályzórendszer így előre letárolt profilok lekövetésére [8], vagy egy forrasztási hőmérséklet-ablakban definiált profil megvalósítására [9] lehet alkalmas.

Livovsky tovább is fejlesztette a hőelemeken alapuló mérését [10] - ehhez egy "intelligens hőmenedzsment" rendszert fejlesztett ki, ami egy XMC4500 CPU-n alapul és egy LabView vezérelt PID szabályzót is tartalmaz, ami  $\pm 2$  °C hibával képes követni a programozott hőprofilot. Ezzel a

rendszerrel a minta magasságát, a mozgató sebességét, a minta méretét és a Galden folyadék szintjét is képes vizsgálni. A módszert sikeresen alkalmazták nagy hőkapacitású, kerámia alapú modulok esetében.

A hőelemeket (vagy adott esetben platina ellenállás hőmérőket) sikeresen alkalmaztuk létrás elrendezésben a gőztér magasságának feltérképezésére, kilencpontos 2D rács elrendezésben laterális hőmérséklet eloszlás és izoterma vizsgálatára (2. ábra). A mérési eredményekkel pedig telítési küszöböt (a kamra készenléti állapotát), illetve a gőztér kialakulásának fűtési teljesítménytől való függését, és a szerelvények melededésének folyamatát (felületen, vagy furatokba SMD ragasztóval rögzítve) is vizsgáltuk [11].



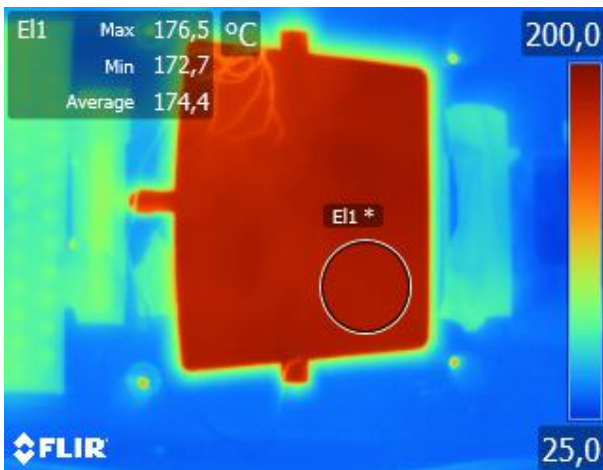
2. ábra. Izotermák vizsgálata 2D hőelemrács segítségével [11]

## 3. A FOLYAMAT MEGFIGYELÉSE INFRAKAMERÁVAL

A hőmérsékletet további lépésként infrakamerás mérőberendezéssel is vizsgáltuk, sajnos azonban a gőztér és a kemence falának nagymértékben eltérő emisszivitásának, valamint a gőztér árnyékolásának köszönhetően nem lehet konzekvens kvantitatív vizsgálatokat készíteni.

A módszerrel kvantitatívan verifikálni lehet a gőztakaró csúcshőmérsékletét, kvalitatívan a gőz kezdeti összeesése is megfigyelhető bemelegítéskor, a kamera a kemence rosszul hőszigetelt pontjainak feltérképezésére is alkalmas. A 3. ábra egy kísérleti forrasztóállomás nyitott zsilipét mutatja, ahol a bemelegített szerelvény nem látszik, a gőztakaró maximális hőmérséklete azonban leolvasható a felvételen. A mérés során a kamera a gőztakaró hőmérsékletéhez lett kalibrálva.

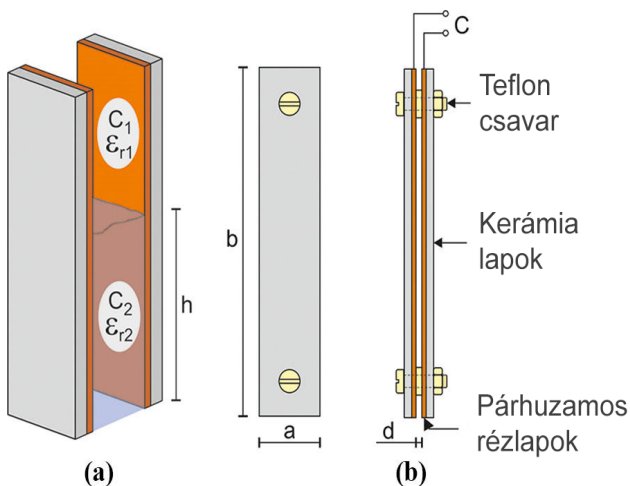




3. ábra. Infrakamerás felvétel a bemeírt szerelvényről

#### 4. A FOLYAMAT MEGFIGYELÉSE KAPACITÍV SZENZOROKKAL

Livovsky a magasság megfigyelését később egy kapacitív szenzorral bővítette ki, amely saját fejlesztésű egységből állt. Ez párhuzamos kerámialapok közé helyezett rézlapokból készült, amit a 4. ábra is mutat. A vertikálisan elhelyezett rézlapok közé törő gőz és folyadék dielektromos állandójának változásából lehet következtetni a telített gőz magasságára.



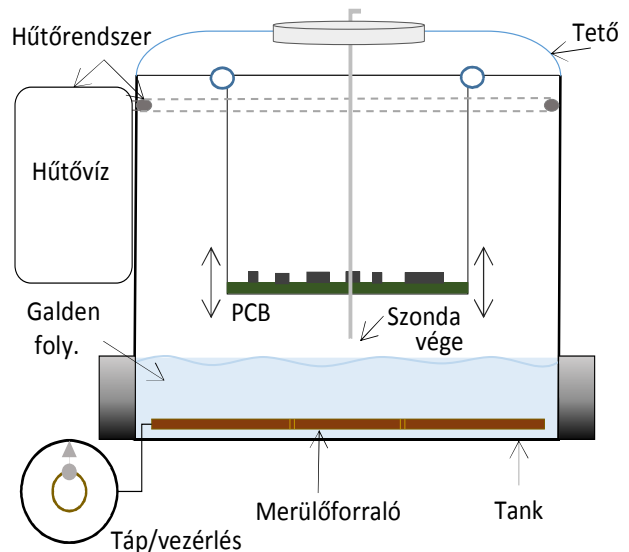
4. ábra. Kapacitív elven működő magasságérzékelő: a) kétféle anyag a fegyverzetek között; b) a konstrukció [12]

Amennyiben a szenzort a folyadékba is bemeírtik, úgy a Galden hőtágulását is vizsgálni lehet, amivel a forró folyadék felső szintjének pontos megfigyelése válik lehetővé. [12]

#### 5. A FOLYAMAT MEGFIGYELÉSE NYOMÁSMÉRŐ SZENZOROKKAL

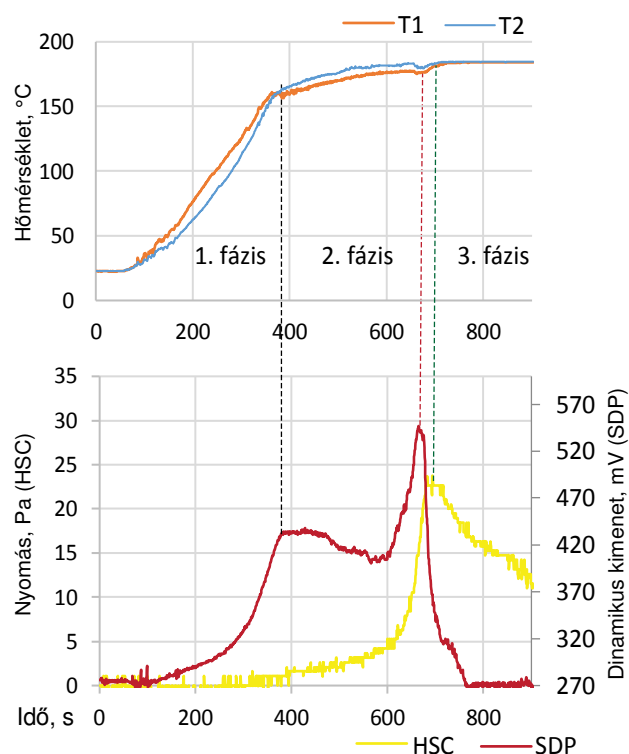
A nyomásmérő szenzorokra a hőmérsékletmérés időbeli bizonytalansága miatt lehet szükség. Különböző nyomásmérőkkel megállapítható a

gőztér változása (szaturált gőztakaró növekedése) lekövethetővé válik a készenléti állapot kialakulása, a folyadék felszínére merőlegesen, attól kis távolságra (pl. 1 cm) elhelyezett szondával. [11] A következő, 5. ábra bemutatja a mérési elrendezést.



5. ábra. Nyomásmérő szenzor szondájának elhelyezése a gőztérben

A módszert eleinte hőmérő szenzor és dinamikus átfolyásmérő szenzor fúziójával fejlesztettük ki, ez a közelmúltban egészült ki az újszerű, membrános „gage”-típusú nyomásmérő szenzorok alkalmazásával, amelyek a többletnyomás jelzésére alkalmasak. Ezek segítségével megállapítható, hogy amikor a gőztakaró hőmérséklete már nagyon kis meredekséggel közelíti a csúcshőmérsékletet, a maximális telítődés még nincs kialakulva. A dinamikus átfolyásmérővel (Sensirion SDP alkatrész) korábban is megfigyeltük, hogy a dinamikus csúcs precízebben definiálja a telítődést, most az új típusú szenzorokkal kimondható, hogy a tényleges telítődés (a hidrosztatikai nyomás maximuma) a dinamikus viselkedés visszaesésével valósul meg. A módszer további érdeme, hogy a korábbiaknál pontosabban jelezhető vele jelcsúcs formájában a készenléti állapot, így jelenleg szabályzás szempontjából ez tekinthető a leggyorsabb, legpontosabb telített gőztakaró kialakulását jelző megoldásnak. A módszerrel a teljesítmény/felfűtési idő függvények is felderíthetőek, a stabil gőztakaróhoz szükséges minimum teljesítmény meghatározásával. A hidrosztatikai nyomásmérés elvével a telített gőztakaró magassága nagy pontossággal (~mm nagyságrendben) mérhető.



6. ábra. Nyomásmérő szenzor és hőelem fűzítése jelzi a telített gőztakaró kifejlődését (3. fázis)

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra kerültek a gőzfázisú forrasztás vezérlési módszerei. Emellett bemutatásra kerültek a hőmérsékleti szenzoros, az infrakamerás, a kapacitív- és a nyomásmérők alkalmazásával történő folyamatmegfigyelési módszerek. Megállapítható, hogy a gyors ütemben fejlődő szenzorika adott határok között, de komoly lehetőségeket hordoz magában, a komplex kondenzációs folyamathoz alkalmazott kemencék állapotának megfigyeléséhez. A jövőbeli munka a nyomásmérés lehetőségeinek kiterjesztésére, valamint a kondenzáció vizsgálatának újszerű szenzoros megoldásaira (úgy mint Peltier elem és tömegmérő szenzorok használatára) irányul.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS



A kutatást a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatta. A cikk az emberi erőforrások minisztériuma ÚNKP-18-4 kód-számú új nemzeti kiválóság programjának támogatásával készült.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Lee N.C., „Reflow soldering processes and troubleshooting: SMT, BGA, CSP and flip chip technologies”, *BH Newnes kiadó*, Boston, 2002.
- [2] Sprovieri J., „Getting the vapors”, *Assembly Magazine*, 2002. Február.
- [3] Pfahl R.C., Ammann H.H., „Method for Soldering, Fusing or Bracing”, US Patent 3,866,307, 1975.
- [4] Leider W., „Dampfphasenlöten – Grundlagen Und Praktische Anwendung”, *E.G. Leuze Verlag kiadó*, Bad Saulgau, 31-39 o., 2002.
- [5] Leicht H., Thumm A., „Today’s vapor phase soldering – an optimized reflow technology for lead free soldering”, *SMTA conf.*, Orlando, 2008.
- [6] Lipp J., Thumm A., „High Quality Vapor Phase Reflow Soldering, The Advanced Soft Soldering Technology”, *SMTA Arizona conf.*, 2012.
- [7] Synkiewicz B.K., Skwarek A., Witek K., „Voids investigation in solder joints performed with vapour phase soldering (VPS)”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, 26. évfolyam, 1. szám, 8-11 o., 2013. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2013-0028>
- [8] Géczy A., Kiss B.P., Alaya A.M., Illyefalvi-Vitéz Z., „Refined Approach on Controlling Heat Transfer in a Vapour Phase Soldering Oven”, *42nd ISSE conf.*, Poland, 2019. (közlésre elfogadva).
- [9] Livovsky L., Pietrikova A., Durisin J., „Monitoring of the temperature profile of vapour phase reflow soldering”, *31st ISSE conf.*, 667-669. o., 2008. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2008.5276585>
- [10] 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>
- [11] Géczy A., „Investigations into the process of vapour phase soldering, A gőzfázisú forrasztási technológia folyamatának vizsgálata”, PhD Disszertáció; *BME*, 2014.
- [12] Livovsky L., Pietrikova A., „Measurement and regulation of saturated vapour height level in VPS chamber”, *Solder. Surf. Mt. Tech.*, (közlésre elfogadva), 2019. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2018-0040>

# Integrált induktivitások lézeres megmunkálással segített készítése

Berényi Richárd, Ruzinkó Miklós

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

**Tartalmi kivonat.** A lézeres technológiák közül a kutató munka részeként a lézeres direkt levilágítást (Laser Direct Imaging – LDI) és a lézeres direkt megmunkálást (Laser Direct Structuring – LDS) mutatjuk be részletesen, illetve ezt használjuk a teszt struktúra elkészítéséhez. Részletesen ismertetésre kerül a technológiák felépítése, sajátossága és beállítási lehetőségei. Ezek a technológiák megfelelő beállítások mellett jobb eredményeket mutatnak, mint a hagyományos technológiával készült lemezek. Ezen lézeres technológiák felhasználásával sikerülhet az elektronikai áramkörök egyik fontos alkatrészének, az induktívitás méretének csökkentése. Az egyre kisebb és emellett több funkcióval rendelkező készülékek iránti igény továbbra sem lankad, így a fejlesztések az eddig még nem megoldott kérdésekre próbálnak választ adni. Ilyen kérdés az induktívitasok, kiváltképp a vasmagos tekercsek és transzformátorok sorozatgyártható miniatürizálása lézeres direkt megmunkálás segítségével.

**Kulcsszavak:** lézeres direkt megmunkálás; nyomtatott huzalozás; mikromegmunkálás; nanoszerkezet; többrétegű hordozó; eltemetett alkatrész

## 1. BEVEZETÉS

Vasmagos tekercsekkel gyakran találkozunk mindennapi életünkben. Például nagyfrekvenciás áramkörökben (rádió adó- és vevőkészülékek rezgőkörei, szűrők), rádiófrekvenciás azonosító címkékben valamint a szenzorikában (érzékelés, vezeték nélküli átvitel, kapcsolat, különféle mikrorendszerek akár mechanikai szabályozása) alkalmazzuk ezeket leggyakrabban.

A tekercsek induktívitasát a menetek közé helyezett anyagokkal, pl. vasmaggal növelhetjük: ezek az áramjárta vezeték körül keletkező elektromágneses teret mintegy „befogják”, „összesűrítik”, vagyis kevésbé engedik azokat elveszni a szabad térben. Annál jobb ez a képességük, minél nagyobb a vasmag permeabilitása. Ilyenek a gyakran alkalmazott ferromágneses anyagok. Transzformátorok esetén, ahol az energia átvitele a cél egyik tekercsről a másikra, a légmaggal szemben a vasmag alkalmazása sokszoros átvitt teljesítményt és sokkal kisebb alkatrész méretet jelent. A váltakozó irányú mágnesezés során fellépő átmágnesezési veszteség (vasvesztés) csökkentése érdekében kis hiszterézis alatti terület, azaz kis telítési mágnesezettség az ideális.

A hagyományosan alkalmazott vasmagok használatának hőmérsékleti korlátja van: 120 °C felett nem alkalmazhatók, ez problémát jelenthet

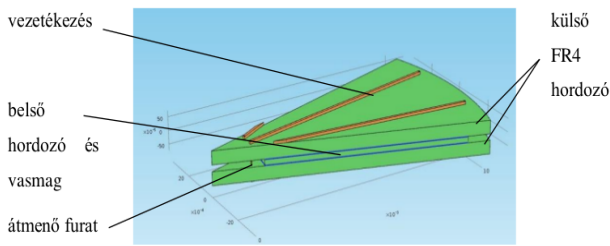
különösen a nagy teljesítményű és miniatűr áramkörök esetén, hiszen ezeknél kevesebb a lehetőség a hűlésre, hűtésre. Emellett a főként amorf vas alapú mágneses szalagok tulajdonságai csak középfrekvenciáig jók; ennél nagyobb frekvenciák esetében szintén szükség van további fejlesztésekre.

A vasmagos tekercsek miniatürizálásának egyik új módszere az áramköri hordozóba épített induktívitas. Ez lapos (planáris) kivitelű toroid kivittel valóvalósítható meg.



1. ábra. A toroid tekercs felépítése

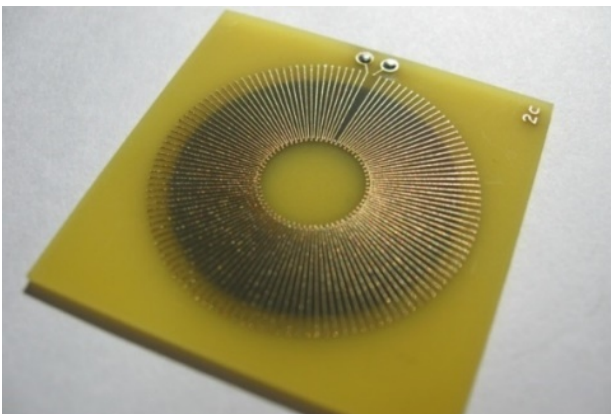
Planárisan kialakított tekercsokat, tekercsantennákat ma is gyakran alkalmazunk, de ezeknek a vezetősávokból létrehozott tekercseknek az induktívitasuk természetesen elmarad a vasmagos típusoktól, mivel a menetek között elhelyezkedő műanyag réteg miatt majdhogynem légmagosoknak tekinthetők.



2. ábra. Planáris tekercs egy cikkelyének 3D szerkezete

## 2. KÍSÉRLETI ÁRAMKÖR

Erre a problémára nyújt megoldást a nanotechnológiával a hordozó belső rétegére felvitt ferromágneses réteg. Kísérletünkben toroid geometriájú, 32 illetve 128 menetes tekercseket alakítottunk ki réz vezető réteggel borított epoxi-üvegszövet hordozón. A meneteket a nyomtatott áramköri hordozók gyártási technológiájával tökéletesen kialakítható, fémezett falú furatokkal összekötött, a hordozó felső illetve alsó rétegén létrehozott vezetékadás adja.



3. ábra. A kísérleti toroid tekercs. Jól látható a hordozó rétegei között áttűnő sötétebb színű vasmag, valamint meneteknek a hordozó felső rétegére eső szakaszai

A tekercs különlegessége a vasmag kialakításában rejlik, a vezetékadást LDS-LDI technológia ötvözésével alakítottuk ki.

Az irodalmakban többféle közvetlen lézeres mintázatkialakítással lehet találkozni. Az egyik lehetőség hogy az egész ábrát a mikromegmunkálásra kialakított lézer segítségével alakítjuk ki [1,2], de a hátránya az, hogy a nagy felületek eltávolítása sok ideig tart, ezért úgy kell kialakítani a nyák rajzolatát, hogy az ilyen területek mérete minél kisebb legyen, és utána alkalmazhatunk nagyobb folt átmérőjű durvább megmunkálásra szánt lézert. Ha ez nem megvalósítható, akkor a nagy felületeket hagyományos litográfiával is kialakíthatjuk.

## 3. A LÉZERES TECHNOLÓGIA LÉPÉS MATEMATIKAI LEÍRÁSA

A közvetlen lézeres megmunkálásnál abláció segítségével távolítjuk el a felületről a nem kívánt rézréteget. A szakirodalomban felállított matematikai modell szerint a megmunkáló lézernyaláb sebessége meghatározható. Mivel nagy intenzitású rövid lézerpulzussal alakítjuk ki a kívánt mintázatot, a modellnek tartalmaznia kell a nagy intenzitású lézersugár besugárzása esetén a vezető réteg felszínén kialakult jelenségeket; például melegítés, olvadás, párolgás; az ionizált elpárolgott anyagot, és a plazma anyagfelhő kialakulását. A vezető réteg melegedése hatással van a gőzképződésre és a plazma anyagfelhő kialakulására. A lézerek elnyelődése a plazmában csökkenti a vezető rétegre jutó energia intenzitását és ennek következtében kevésbé melegszik a vezető réteg. A szakirodalomban alkalmazott számítási mód szerint a gőzképződés a fő folyamat,  $j_s$  jelenti az olvadt felületről eltávozott anyagot.

$$j_s(T_s) = \frac{\beta p_0}{\sqrt{2\pi k_B m_c T_s}} \exp\left(\Delta H_{lv} \frac{M_C T_s - T_{lv}}{R T_s T_{lv}}\right) \quad (1)$$

Az egyenletben  $\Delta H_{lv}$  az anyag párolgáshője,  $T_{lv}$  az anyag forráspontja,  $p_0$  a környezeti nyomás,  $T_s$  a felület hőmérséklete,  $M_C$  moláris tömege a vezető réteg anyagának,  $m_c$  az elpárolgott részecskék tömege,  $\beta$  a gőzképződés korrekciós tényezője,  $k_B$  a Boltzmann állandó és  $R$  az univerzális gázállandó. A  $T_s$  felületi hőmérséklet kiszámítható a beérkező lézerek energiájából:

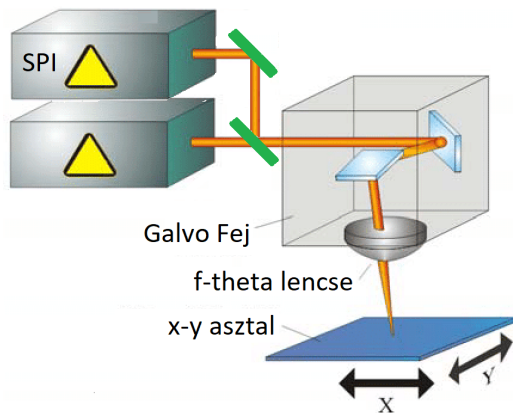
$$\rho_c c_p \frac{\partial T_c}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla T_c) + Q \quad (2)$$

$T_c$  a vezető réteg hőmérséklete,  $t$  az idő,  $Q$  a lézer sugár energiája,  $\rho_c$  az anyag sűrűsége,  $c_p$  a hőkapacitása,  $\kappa$  a hővezetés.

## 4. KÍSÉRLET LÉZERES ÖSSZEÁLLÍTÁS

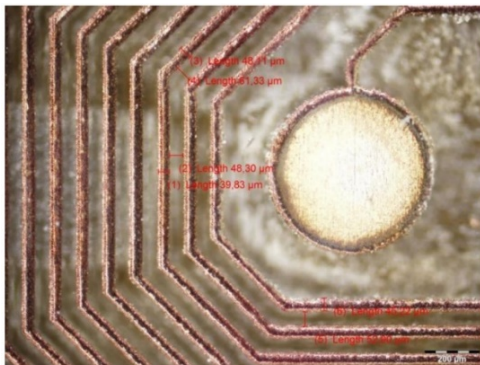
Az általunk használt lézer berendezéssel (4. ábra) (SPI fiber lézer,  $\lambda = 1070$  nm,  $r_0 = 20$   $\mu$ m,  $P = 20$  W átlagos teljesítmény, galvo eltérítés, 100 mm f-theta objektív és 5 x 5 cm-es megmunkálható terület) az optimális sebesség 170 mm/s, 18  $\mu$ m vastagságú rézzel bevont hordozón 45 kHz-es ismételési frekvencia mellett. Mivel a kísérleti rendszerünk képes egymás után a kis fókuszfoltú, kisebb energiasűrűségű, majd nagyobb fókuszfoltú

nagyobb energiájú lézersugár precíz pozícionálására, ezért az LDS eljárást használhatjuk az egész felületen további litográfias fázis használata nélkül. Ez jelentősen meggyorsítja a munkálatokat prototípusok előkészítésére.



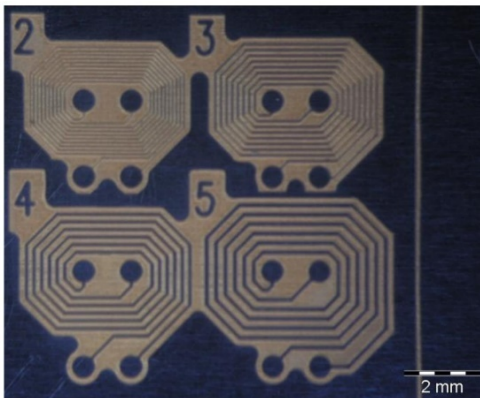
**4. ábra.** A kísérleti lézer berendezés, dupla lézerforrással

Kísérleti eredményünket mutatja be az 5. ábra. Látható, hogy képes a rendszer  $50\ \mu\text{m}$  vezeték szélesség kialakítására egyenes, illetve  $45^\circ$ -os szögű vezeték esetén is.



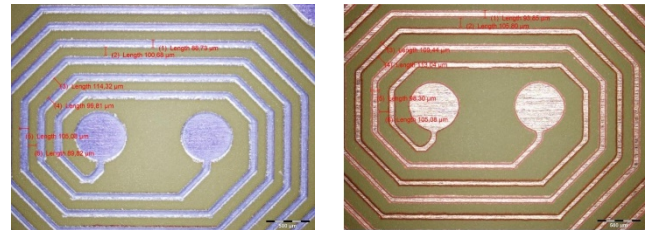
**5. ábra.** Lézeres direkt mintázatkialakítással készített vonalak  $18\ \mu\text{m}$  rézvastagságú NyHL-en

Az LDS és LDI eljárás egy speciális ötvözetét is kipróbáltuk munkánk során, miszerint a fotoreziszt lakk lett eltávolítva szelektív anyageltávolítással [3].



**5. ábra.** Lézeres direkt mintázatkialakítással készített fotomaszk ábrák NyHL-en különböző csíkszélességekkel

Ebben az esetben, mivel a fotolakk ablációs küszöbe sokkal kisebb a rézénél, ezért az anyageltávolítás megoldható a réz vezetőréteg minimális sérülése nélkül is.



**7. ábra.** A  $100\ \mu\text{m}$  vezeték szélességű ábra kialakítása: a) maratás előtt; b) maratás után

Az integrált induktivitás kialakításához eltervezett  $100\ \mu\text{m}$  vezeték szélességű hordozókat sikerült lézeres szelektív anyageltávolítással megfelelő minőségben kialakítanunk. A megfelelő alapanyag és NyHL technológia segítségével folytattuk munkánkat mely során célunk kis vasvesztéssel rendelkező lágy mágneses réteg sorozatgyártásban is alkalmazható kialakítása volt, melyet elektrokémiai módszerrel állítottunk elő. A többrétegű hordozók előállításának technológiai folyamatába könnyen beilleszthető, hiszen előimpregnált rétegre visszük fel a vasmag anyagát, melyet azután a külső hordozók közé helyezve a többrétegű áramköri hordozóknál megszokott módszerrel összelaminálunk. Azon kívül a pulzáló áramú elektrolízis folyamata [4], így a rétegvastagság kiválóan kontrollálható a gyártósorban is, a gyártásközi ellenőrzés és monitorozás is könnyen megoldható. A vasvesztés csökkentésére – ami az alkalmazható frekvencia felső határát is növeli – nanokristályos vasat, valamint vas-nikkel ötvözetet kell alkalmaznunk. Ismert, hogy a mágneses szemcsék átlagos méretének a domén-fal szélesség alá csökkentésével lágymágneses anyagot kapunk. Így az általánosan alkalmazott vasmagokkal szemben a nanoméretű szemcsék jelenléte esetén a telítési mágnesség nagyobb, valamint a tekercs magasabb hőmérsékleten is jól használható.

## 5. NANOSZEMCSÉS VASMAG KIALAKÍTÁSA

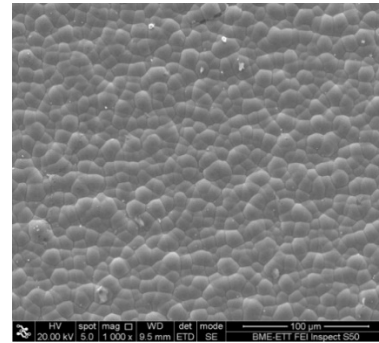
Vizes oldatokból pulzáló áramú elektrolízissel egyszerűen, gyorsan, ismételhető módon lehet pórusmentes nanoszerkezetű vas vékony-rétegeket képezni. Ezzel a módszerrel a leválasztott tiszta fém

vagy ötvözetréteg összetétele, vastagsága igen jól szabályozható, vele gyorsan és akár bonyolult – nem csak planáris! – alakzatokra is könnyedén vihetünk fel ilyen anyagot. Sőt, a különböző elektrolit oldatok és leválasztandó fém változtatásával több különböző rétegből álló szendvicsszerkezeteket is alkothatunk. Más fizikai rétegleválasztó módszerekkel szemben, mely nanoszerkezetű vékonyréteg előállítására alkalmasak – mint például az ionbombázásos vagy molekulásugaras rétegleválasztás – a pulzáló áramú elektrolízises eljárás nem igényel költséges vákuumtechnikai berendezéseket valamint alacsony hőmérsékleten végezhető. Ez abból a szempontból is előnyös, hogy így a legelterjedtebben használt, viszonylag olcsó hordozókra, mint amelyet mi is használtunk, le lehet választani a kívánt réteget annak károsodása nélkül.

Célfelületként az eleve a hordozón levő, 5  $\mu\text{m}$  vastag rézréteget használjuk (nanoszemcsés vashoz), vagy árammentes nikkellréteget (FeNi azaz permalloy réteghez) választunk le. Ezt a rajzolatot katódnak kötjük. A leválasztandó fémet vagy fémeket anódnak kötjük be, majd az egészet elektrolitba helyezzük. Az oldatban a leválasztandó fém pozitív ionjai vannak, melyek az elektromos hatásra a katódhoz vándorolnak, majd az ott rendelkezésre álló elektronok segítségével redukálódnak, vagyis kiválnak a felületre. Az oldatok összetételének, hőmérsékletének és az árampulzus paramétereinek változtatásával a bevonatok tulajdonságai könnyedén változtathatók. Az áramot tekintve négyszögjellel dolgozunk; a bekapcsolt állapot hossza, a kikapcsolt állapot hossza, valamint a kialakuló maximális áramsűrűség határozza meg a kialakuló szemcsegeometriát és annak méretet. Az elektrolit összetétele esetünkben vas-szulfát, valamint nikkell-szulfát és nikkell-klorid vizes, bórsavas oldata. Az elektrokémiai módszerrel leválasztott Fe-Ni rétegek kiváló mechanikai, mágneses valamint kopásállósági tulajdonságokkal rendelkeznek. Amikor a leválasztott réteg vastartalmát 35% fölé viszik, olyan, a rétegleválasztásból eredő belső feszültségek keletkeznek, melyek repedéseket okoznak benne. A repedési mintázat a hordozóanyagtól, a vastartalomtól és a réteget alkotó ötvözetek kristályszerkezetétől függ.

A tiszta vas réteg mágneses mérései alapján az 50  $\mu\text{m}$  szemcseméretű vas elfogadhatóan jó

lágymágneses anyag, lapos hiszterézis hurokkal. A nanoszemcsés vasréteget 0,6–0,8 MHz-ig használhatjuk.  $\text{MgSO}_4$  hozzáadásával még tovább csökkentettük (mintegy 10  $\mu\text{m}$ -esre) a vasszemcsék méretét. A leválasztott vasmagrétegek vastagsága 20-25  $\mu\text{m}$  körüli, az egész szendvics-szerkezet összesen kb. 800  $\mu\text{m}$  vastagságú.



**8. ábra.** A nanoszemcsés vas-nikkel vékonyréteg elektronmikroszkópos képe. 10  $\mu\text{m}$  vastag, egyenletes, átlagosan 10  $\mu\text{m}$  szemcseméretű vékonyréteg

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓ

Az elkészített tekercsek jellemzésére elektromos méréseket végeztünk. A permeabilitás frekvenciafüggésének mérése megmutatta, hogy ezek a vasmagok 10–20 MHz-es tartományban is alkalmazhatók, akár transzformátor vasmagként is. A mágneses hiszterézis mérések lapos hiszterézis-hurkokat adtak, ami kis vasvesztést jelent.

A nanoszerkezetű mágneses rétegek kutatásaink alapján előállíthatók egyszerű és gazdaságilag olcsó elektrokémiai eljárásokkal is. A kutatás eredményeképpen kisebb, olcsóbb, megbízhatóbb elektronikák gyártása válik lehetségessé. Reméljük, hogy a jövőben sikerül a sorozatgyártásban megvalósítani ezeket a kisméretű, az áramköri hordozóba integrált ferromágneses anyagok alkalmazásával készülő tekercseket, hogy a nehéz vasmagok helyett ugyanolyan vagy hatékonyabb induktivitásokat hozhassunk létre akár egy bankkártyán.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Rozman R., Kmetec B., Podobnik B., Kovačič D., Govekar E., „Optimisation of direct laser structuring of printed circuit boards”, *Appl. Surf. Sci.*, 254. évfolyam, 17. szám, 5524-5529 o., 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.02.169>
- [2] Zhang B., Yung K.C., „Frequency-tripled Nd:YAG laser ablation in laser structuring process”, *Opt. Laser Eng.*, 44. évfolyam, 8. szám, 815-825 o., 2006. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.06.008>

- [3] Berényi R., Ruzinko M., Szekely I., „UV Laser Based Direct Structuring”, *39th ISSE conf.*, Czech Republic, 367-371 o., 2016.  
<https://doi.org/10.1109/ISSE.2016.7563222>
- [4] Lakatos-Varsányi M., Murányi R., Hajdu F., Berényi R., Varga L.K., „Nanostructured pulsed current metal coatings of Fe and Fe–Ni for microelectronic applications”, *T. I. Met. Finish.*, 95. évfolyam, 1. szám, 6-8 o., 2017.  
<https://doi.org/10.1080/00202967.2017.1256061>

# UNIPCB szolgáltatások

## NYOMTATOTT ÁRAMKÖRI LEMEZEK GYÁRTÁSA:

- Legkisebb vezeték szélesség egy- és kétoldalas lemezeknél: 0,2 mm, többrétegű áramköröknél: 0,25 mm
- Legkisebb vezeték-vezeték szigetelő köz: 0,25 mm
- Legkisebb vezeték-forraszszer, szigetelő köz: 0,2 mm
- Legkisebb furatátmérő: 0,3 mm
- Merev, egyoldalas, kétoldalas és többrétegű kivitel 8 rétegig
- FR4-es epoxigyanta-üvegszövet hordozó különböző vastagságban
- Fényes galvanizált ónbevonat, vagy szelektív kémiai ezüst bevonat
- Fotoszenzitív forrasztásgátló maszk és beültetési rajz
- CNC kontúrmarás egyedi méretre, vagy táblában, kitördelhető kivitelben

## FELÜLETSZERELÉS (SMT):

- Felületszerelt alkatrészek beültetése és forrasztása ólommentes technológiával, ESD környezetben
- A 0402-es méretű SMD alkatrészekről kezdve a TQFP, QFN és BGA tokozású integrált áramkörökig minden fajta alkatrész beültetését vállaljuk
- Saját készítésű lézerrel vágott stencil prototípusokhoz
- Gőzfázisú forrasztás (akár 12 rétegű vagy alumínium hordozós panelek is könnyen forraszthatóak)
- Furatszerelés mini hullámforrasztóval
- Röntgenes ellenőrzés
- Kész termékek vizuális ellenőrzése

