

# Elektronikai gyártástechnológiákban alkalmazott stencilnyomtatás optimalizálási és modellezési aspektusai

Krammer Olivér, Martinek Péter

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

**Tartalmi kivonat.** Az elektronikai eszközök automatizált gyártásának legelterjedtebb technológia az ún. újraömllesztéses forrasztás, melynek az egyik legkritikusabb lépése a stencilnyomtatás; a forrasztási hibák akár 60%-a erre a folyamatra vezethető vissza. Jelen cikk célja, hogy bemutassa ezen folyamat optimalizálási és modellezési lehetőségeit irodalmi forrásokra alapozva. Az optimalizálási metódusok közül a régebbi források a DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) vagy Taguchi illetve RSM (response surface methodology – válaszfüggvényre illesztett felület) módszereket alkalmazták a stencilnyomtatási folyamat tekintetében, mely kutatások eredményeit a 2. fejezet mutatja be. A 3. 4. fejezet a stencilnyomtatás modellezési lehetőségeit ismerteti, valamint ahhoz kapcsolódóan a forraszpaszták reológiai tulajdonságait leíró anyagmodelleket. Végezetül az 5. fejezet ismerteti a stencilnyomtatási folyamat legújabb modellezési és optimalizálási lehetőségeit gépi tanulási módszerek alkalmazásával. Az ún. „zero-defect”, nulla-hibás gyártás eléréséhez elengedhetetlen a gyártási folyamatokhoz kapcsolódó optimalizációs módszerek folyamatos vizsgálata, elemzése, ehhez kíván a jelen cikk hozzájárulni.

**Kulcsszavak:** stencilnyomtatás; forraszpaszta; szuszpenziók reológiája; numerikus modellezés; gépi tanulás

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban az elektronikai eszközök tömeggyártását az automatizált felületszerelési technológia dominálja, melynél az alkatrészek rögzítésére az ún. újraömllesztéses forrasztást alkalmazzák. Ezen technológia lényege, hogy a forraszanyagot (2006 óta egyre elterjedtebben ólommenteset [1]) forraszpaszta formájában viszik fel a szerelőlemez kontaktusfelületeire, ebbe ültetik bele az elektronikus alkatrészeket, majd végül a szerelvény áthalad egy alagútkemencén. A kemencében a forrasz olvadáspontja fölé melegítik a teljes szerelvényt, a forrasz mindenhol megolvad, majd lehűtés és megszilárdulás után létrejönnek a forrasztott kötések.

A modern áramkörökben az alkatrézsméretetek 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 alkatrészeknél 200 x 100  $\mu\text{m}$ ) komoly kihívást jelent a forrasztási technológia legkritikusabb lépésénél, a forraszpaszta (folyasztószer és forraszszemcsék szuszpenziója) felvitelére szolgáló stencilnyomtatás során. A stencilnyomtatási folyamat során megadott sebességgel és megadott erővel húzzuk végig a

nyomtatókést a stencil felületén. Ennek hatására a forraszpaszta mozgásba jön, gördül a kés előtt, és kitölti a stencilen lévő, a forrasztási felületek felett elhelyezkedő apertúrákat. A stencil és a hordozó szétválasztása után a forraszpaszta a szerelőlemez kontaktusfelületeire kerül. Kutatások szerint a gyártási hibák akár 50-60%-a is a stencilnyomtatási folyamatra vezethető vissza [2]; ilyen hibák pl. az elégtelen forraszmennyiségből származó nyitott kötések jelensége vagy a forrasztöbbletből származó forraszhidak, rövidzárok kialakulása az alkatrészek kivezetései között. Annak érdekében, hogy a stencilnyomtatási folyamatot optimalizálhassuk, pontosan szabályozhassuk, továbbá az ún. „zero-defect”, nulla-hibás gyártás eléréséhez elengedhetetlen a nyomtatással felvinni kívánt forraszpaszta reológiai tulajdonságainak vizsgálata is. Ezen cikk a stencilnyomtatási folyamat optimalizálási lehetőségeit foglalja össze, és ismerteti a stencilnyomtatás numerikus modellezésének aspektusait. Tárgyalja továbbá a forraszpaszták reológiai tulajdonságait.

## 2. STENCILNYOMTATÁS FOLYAMAT OPTIMALIZÁLÁSA

A stencilnyomtatási folyamat optimalizálásával számos cikk foglalkozik. Edwards már 1994-ben megmutatta, hogy a folyamat „korai” optimalizálása

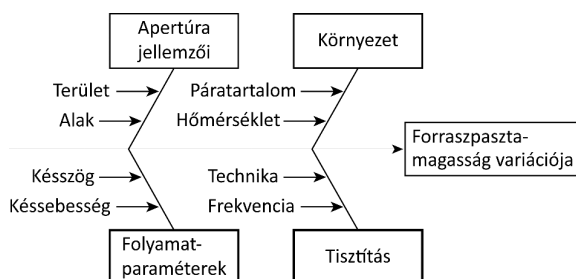
(még a termék- ill. gyártástervezés fázisában) szignifikánsan növeli a folyamat jóságát, az ún. „first-pass yield” (teljesítménykihozatal – hibamentes nyomtatások aránya a hibásokhoz képest az első sorozatoknál) mutatót és csökkenti a hibarátaát már a folyamat-beállítás szakaszában is [3]. Ezáltal a folyamat-beállítás gyorsabb, a tömegtermelés hamarabb indulhat és a gyártás során keletkező hibák is alacsonyabban tarthatók.

Korábban inkább empirikus optimalizálási módszereket pl. Taguchi vagy DMAIC-n (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) alapulókat alkalmaztak a stencilnyomtatási folyamat optimalizálására. Később elterjedtek a numerikus modellezésen-, újabban pedig a gépi tanuláson alapuló módszerek. A stencilnyomtatással kapcsolatban Li és társai végeztek DMAIC-n alapuló vizsgálatot 2008-ban [4]. A vizsgálatuk során a felvitt forraszpasztta vastagságát definiálták a folyamat minőségét leíró paraméterként és mérési sorozatok segítségével számolták a vizsgált folyamat képességi mutatóját (1):

$$\hat{C}_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \hat{x}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\hat{x} - LSL}{3\hat{\sigma}} \right\}, \quad (1)$$

ahol  $\hat{C}_{pk}$  a folyamat korrigált képességi mutatója,  $USL$  és  $LSL$  a felső- és alsó elfogadási határ (általában a stencilfólia vastagságának  $\pm 20\%$ -a),  $\hat{x}$  a mért átlagos pasztamagasság és  $\hat{\sigma}$  a mért pasztamagasság szórása.

Elemezték, hogy mely folyamat- és környezeti paraméterek hatnak leginkább a felvitt forraszpasztta magasságának szórására (pl. 1. ábra).



1. ábra. A stencilnyomtatási folyamatot reprezentáló halszálka diagram

A kísérlet során számos paramétert változtattak; mint pl. a nyomtatókés szöge ( $60^\circ$ ,  $45^\circ$ ), a nyomtatási sebesség (10, 25, 40 mm/s), apertúra területe a kontaktusfelülethez képest (80, 100, 120%), apertúra alakja (téglalap, négyzet, ellipszis),

környezeti hőmérséklet (20, 23, 25 °C), tisztítás frekvenciája (1, 5, 10 nyomtatásonként).

Az eredmények alapján megállapították, hogy a felvitt forraszpasztta magasságának szórására nagy hatással van a nyomtatókés szöge, és a környezeti hőmérséklet a nyomtatógépben (optimális az általuk alkalmazott forraszpasztta esetén 20 °C volt). Ezeket a paramétereket a későbbi, modellezési feladatoknál is szükséges figyelembe venni. A kísérleti paramétertér optimalizálásával a folyamatképességi mutatót 0,937-ről 1,432-re növelték, amely azt jelentette, hogy a várható hibaráta (a forraszpasztta- lenyomatok mekkora aránya esik ki a  $\pm 20\%$ -os elfogadási határból) nagyobb, mint 2700 ppm-ről kevesebb, mint 64 ppm-re csökkentették.

Tsai szintén 2008-as cikkében vizsgálta a stencilnyomtatási folyamatot, és optimalizálta egyrészt RSM (response surface methodology) módszerrel, másrészt saját fejlesztésű, neurális hálón alapuló hibrid optimalizációs technikákkal is [2]. Az RSM matematikai és statisztikai apparátust alkalmaz problémák elemzésére, és a célja egy adott folyamat – bemenő paramétertérre adott – válaszána optimalizálása. Képes az összefüggések feltárására számos leíró-paraméter és egy vagy több válaszparaméter között. A stencilnyomtatási folyamatot általában kvadratikus modellekkel (2) írják le az optimalizálási feladatokhoz.

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} x_i x_j + \varepsilon, \quad (2)$$

ahol  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  a folyamatot befolyásoló paraméterek,  $(B_1, B_2, \dots, B_n)$  a becsült modell-együtthatók,  $B_0$  az összes válasz átlaga (válaszfüggvény ofsetje) és  $\varepsilon$  a véletlen hiba komponense.

Tsai vizsgálatában a kiválasztott folyamatparaméterek nagymértékben egyeznek a Li kísérletében lévőkkel; plusz paraméterekként, amelyek hatással lehetnek a nyomtatás minőségére, vizsgálták a stencilfólia vastagságát (100, 120, 150  $\mu\text{m}$ ), a stencil-hordozó távolságát (0, 1, 2 mm), a forraszpasztta viszkozitását (800, 1050, 1300 Pa·s), és a paszta típusát (a benne lévő szemcsék átmérőjét) – Type-2 (45–75  $\mu\text{m}$ ), Type-3 (25–45  $\mu\text{m}$ ), Type-4 (20–38  $\mu\text{m}$ ). A forraszpasztta- lenyomatokat különböző raszterosztású (0,4, 0,5, 0,6 mm), QFP tokozású alkatrészekhez kialakított

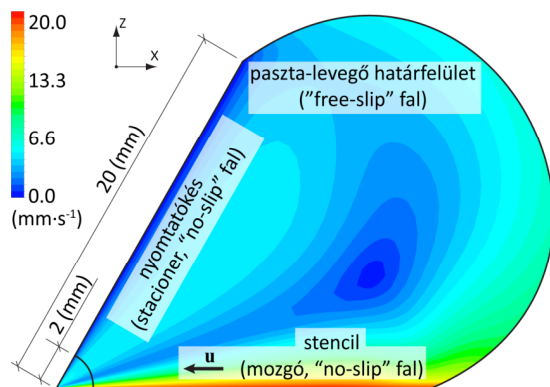
kontaktusfelületeken vizsgálták. Példaképp, a legkritikusabb, 0,4 mm raszterosztású alkatrészhez, a modell-együtthatók (3) a következőképp alakultak:

$$Y = 4,65876 + 0,00246 \cdot x_1 - 0,151 \cdot x_2 - 0,00365 \cdot x_3 - 3,08512 \cdot x_4 - 0,00769 \cdot x_2^2 + 0,26487 \cdot x_2 x_4 + 0,02883 \cdot x_3 x_4 \quad (3)$$

ahol  $x_1$  a nyomtatási sebesség,  $x_2$  a stencil és hordozó távolsága,  $x_3$  a stencilapertúra aránya a kontaktusfelülethez képest,  $x_4$  pedig a stencilfólia vastagsága. Az együtthatókból látható, hogy a lenyomat minősége finom raszterosztású alkatrészeknél nagymértékben függ a stencilfólia vastagságától. Minél vastagabb a stencilfólia, annál kevésbé jut át a forraszpaszta a hordozóra kisméretű apertúrák esetén. Az RSM alkalmazásával, Tsai a stencilnyomtatási folyamat hibarátáját hozzávetőleg 10–15%-kal tudta csökkenteni ipari körülmények között [2]. Mivel a forrasztási hibák nagy része származik a stencilnyomtatásból, ez szignifikáns megtakarítást eredményezhet.

### 3. STENCILNYOMTATÁSI FOLYAMAT NUMERIKUS MODELLEZÉSE

A stencilnyomtatás folyamatát vizsgáló numerikus modellek geometriája a stencilből, a nyomtatókésből és a gördülő forraszpasztából épül fel (2. ábra: sebességtér és peremfeltételek).



2. ábra. A stencilnyomtatás geometriai modellje

A forraszpaszta mozgásának leírásához a Navier-Stokes-féle mozgásegyenletből [5] indulhatunk ki. Mivel a forraszpaszták esetében az áramlási sebesség relatíve alacsony, a viszkozitás pedig relatíve nagy, a Navier-Stokes egyenletben (4) a konvektív gyorsulási tag ( $\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}$ ) elhanyagolható a súrlódási taghoz ( $\mu \cdot \rho^{-1} \nabla^2 \mathbf{u}$ ) képest.

$$-\frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} - \mathbf{f}, \quad (4)$$

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 (5) pedig nagyságrendekkel kisebb, mint egy ( $Re < 10^{-2}$ ) [6], ami lamináris áramlást indikál.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu}, \quad (5)$$

ahol,  $u$  az áramlási sebesség magnitúdója,  $L$  a karakterisztikus hossz és  $\mu$  a forraszpaszta dinamikai viszkozitása. Tehát a Navier-Stokes-féle mozgásegyenlet stacioner esetben a Stokes-féle áramlási egyenletre egyszerűsödik (6).

$$\nabla p = \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (6)$$

ahol az (4)-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 forraszpaszta kezelhető továbbá összenyomhatatlan folyadékként, melynek eredményeképp a tömegmegmaradásra vonatkozó kontinuitási egyenlet a térfogat-megmaradás (7) egyenletévé egyszerűsödik.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (7)$$

A stencil illetve szitanyomtatáshoz elsőnek Riemer hozott létre analitikus modellt a Navier-Stokes-féle mozgásegyenlet megoldásával. Az analitikus modell megoldása a stencil felületén kialakuló nyomásprofil (8):

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

ahol  $r$  a stencil és a nyomtatókés érintkezési pontjától vett távolság,  $\theta$  a késszög,  $\eta$  a viszkozitás és  $u$  a nyomtatási sebesség.

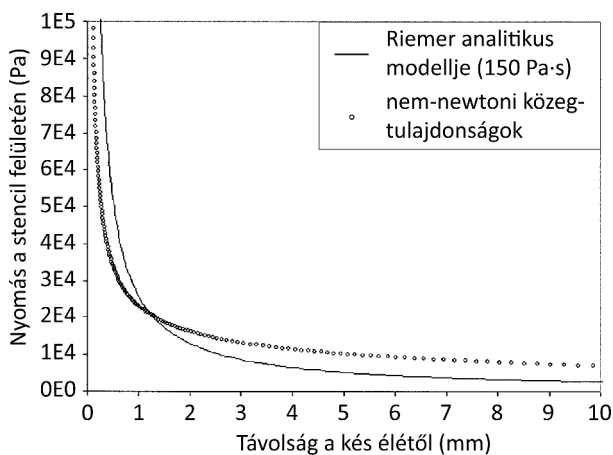
A modell hiányossága, hogy csak newtoni tulajdonságokkal rendelkező folyadékokra alkalmazható, viszont a forraszpaszta nem-newtoni tulajdonságokkal rendelkező (pseudoplasztikus) közeg. Ezen különbség hatását a stencilen kialakuló nyomásprofilra vizsgálta több kutató is numerikus modellek felhasználásával.

Glinski és társai 2001-ben egyértelműen megmutatták a két eset (newtoni és nem-newtoni közegtulajdonságok) közötti különbséget [7]. A modelljükben létrehozták a stencilnyomtatás geometriai modelljét a 2. ábrán mutatotthoz hasonlóan. Ezután ellenőrizték az érvényességét

newtoni közegtulajdonság beállításával (50 Pa·s viszkozitás) több késszög (30°, 45°, 60°) esetére valamint több nyomtatási sebesség (20–80 mm/s) esetére is. A forraszpaszta nem-newtoni viszkozitásának leírásához az ún. Cross modellt (10) [8] alkalmazták:

$$\eta_{Cross} = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^n}, \quad (10)$$

ahol  $\eta_0$  és  $\eta_{\infty}$  a nagyon alacsony ill. nagyon magas nyírási rátákhoz tartozó viszkozitások aszimptotikus értékei,  $\lambda$  idő dimenziójú állandó, és  $n$  dimenzió nélküli konstans. Végül kiszámították a stencilen kialakuló nyomásprofil newtoni (viszkozitás 150 Pa·s) és nem-newtoni viszkozitást feltételezve. A kapott diagramot a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra. Nyomás a stencil felületén stencilnyomtatás közben

Megfigyelhető, hogy a newtoni esethez képest a nyomás alacsonyabb a kés közelében, viszont magasabb értékű a késtől eltávolodva (a keresztezési pont ennél a vizsgálatánál kb. 1,3 mm-nél van). Ennek oka, hogy a forraszpaszták, mint nem-newtoni közegek által mutatott viszkozitás függ a nyírási rátától; alacsonyabb nyírási rátáknál magasabb-, míg nagyobb nyírási rátáknál alacsonyabb viszkozitást mutatnak. A kés közelében a forraszpasztát nagyobb nyírási ráták érik, míg a késtől távolodva a forraszpasztában kialakuló nyírási ráták csökkennek, a mutatott viszkozitás pedig ennek megfelelően csökken, illetve nő. A stencilen kialakuló nyomásprofil számítása után vizsgálható, hogy különböző peremfeltételek esetére milyen minőségű nyomtatás várható, illetve a stencilnyomtatás utáni furatkitöltés becslhető pin-in-paste technológia (furatszerelt alkatrészek forrasztása újrámlesztéses forrasztással) esetére.

#### 4. FORRASZPASZTÁK REOLÓGIAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA

A 2. fejezet és a 3. ábrán mutatott trend alapján a forraszpaszta hőmérsékletfüggő- illetve nem-newtoni viszkozitási tulajdonságai szignifikánsan befolyásolják a stencilnyomtatás numerikus modellezésével kapott eredményeket. Ezért kutatók intenzíven vizsgálták a paszták ezen tulajdonságait.

A forraszpaszta folyasztószer és forraszfém-szemcsék szuszpenziója; a különböző alkalmazásokhoz (stencilnyomtatás, cseppadagolás stb.) különböző fémtartalmú forraszpasztákat ajánlanak a forgalmazók. Pietriková és Kravčík ezért különböző fémtartalmú forraszpaszták esetére is elvégezték mérésüket annak tekintetében, hogy a hőmérséklet alakulása milyen hatással van a mutatott viszkozításra [9]. Kísérletükben a vizsgált forraszpaszta fémtartalma 88,5–95% között változott. A hőmérsékletet pedig a 20–30 °C-os tartományon változtatták. A kísérleti eredményüket az 1. táblázat foglalja össze, melyből megállapítható, hogy az általuk vizsgált forraszpaszták relatív viszkozitás-változása 35–50%-os tartományba esik a 20–30 °C-os hőmérsékleti tartományon.

1. táblázat. Különböző fémtartalmú forraszpaszták viszkozitása különböző hőmérsékleteken (nyír. ráta 9 s<sup>-1</sup>)

Hőmérséklet (°C)	Viszkozitás (Pa·s)			
	Fémt. 88,5%	Fémt. 90%	Fémt. 92%	Fémt. 95%
20	50	75	200	155
22	50	70	195	150
24	40	60	150	135
26	30	52	120	130
28	30	48	105	115
30	25	48	95	100
$\frac{\Delta\eta}{\eta_{max}}$	50%	36%	52,5%	35,5%

Durairaj és társai pedig különböző nyírási rátákon mutatott viszkozitását vizsgálták különböző forraszpasztáknak, illetve különböző (valószínűleg zselés kivitelű) folyasztószernek [10]. A nyírási ráta 0,01–10 s<sup>-1</sup> tartományon változott, és öt-öt fajta mintát (paszta: P1–P5; folyasztószer F1–F5) minősítettek. A mérési eredményekre a Cross modellt (10) illesztették, ezzel írva le a viszkozitás görbéjének nyírásra vékonyodó (növekvő ráta

mellett csökkenő viszkozitás) menetét. A mérési eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

**2. táblázat.** Különböző forraszpaszták és folyasztószerkezetek viszkozitási görbéjére illesztett Cross modell paraméterei

Minta	$\eta_0$ (Pa·s)	$\eta_\infty$ (Pa·s)	$\lambda$ (s)	$n$
P1	41 030	56	46	1
P2	64 440	42	75	1
P3	91 410	22	123	1
P4	28 760	53	40	1
P5	31 030	52	39	1
F1	30 470	11	102	1
F2	22 150	16	73	1
F3	41 340	9	138	1
F4	40 940	19	104	1
F5	35 040	15	103	1

A vizsgálatok alapján a folyasztószerkezetek viszkozitása szignifikánsabban csökkent a növekvő nyírási ráta hatására, mint a forraszpasztáké, de mindkét típusú minta esetén egyértelmű, hogy a nem-newtoni tulajdonságokat figyelembe kell venni, mivel a mutatott viszkozitás akár ezred részére is csökken a nyírási rátát növelve.

## 5. STENCILNYOMTATÁS VIZSGÁLATA GÉPI TANULÁSSAL

A legújabb kutatásokban a gépi tanulás lehetőségeit kezdték el kihasználni a stencilnyomtatási folyamat elemzésére, optimalizálására. A gépi tanulási módszerek tökéletesek az olyan nemlineáris folyamatok be- és kimenő paraméterei közötti összefüggések feltárására, mint a gyártási folyamatok, pl. a stencilnyomtatás.

Yang és szerzőtársai [11] mesterséges neurális hálózat (ANN – artificial neural network) alapú modellt használtak a stencilnyomtatás folyamatának modellezésére. A kísérletet Quad Flat Pack (QFP – négyzetes lapos tok) tokozású alkatrésztípusokon végezték három meghatározott beállítási konfiguráció mellett. Ezek főbb bemeneti paraméterei és azok értékei a 3. táblázatban találhatóak.

A kísérletek során egy jól meghatározott paraméterkombináció szerint összesen 243 mintára végezték el a méréseket az adatok előállításához. A neurális hálózat tanítóhalmaza az adatok véletlenszerűen kiválasztott 80%-a lett, míg a

maradék 20% a tesztadathalmazt képezte. A modell szerinti becslés (a neurális hálózat) hibáját a négyzetes középérték hiba (RMSE – root mean squared error) mennyiségének alapján minimalizálták. A használt neurális hálózat két rejtett rétegek tartalmazott, melybe a 3. táblázatban látható bemeneti paraméterek lettek bekötve a bemeneti oldalra; kimenete a forraszpaszta térfogata volt.

**3. táblázat.** A stencilnyomtatási kísérlet bemeneti paraméterei és azok értékei [11]

Paraméter	Beáll. 1	Beáll. 2	Beáll. 3
Stencil vastagsága ( $\mu\text{m}$ )	100	120	150
Alkatrész-raszter (mm)	0,4	0,5	0,625
Apertúra területe a padhez képest (%)	85%	100%	115%
Kontaktávolság (mm)	0	1	2
Nyomtatási sebesség (mm/s)	20	40	60
Paszta viszkozitása (Pa·s)	800	1050	1300

Az így kialakított, neurális hálózat alapú modell átlagos abszolút százalékos hibája (MAPE) a különböző méretű alkatrészekre átlagosan 3 és 6% között mozgott, mely elég pontos eredmény ahhoz, hogy valós segítséget nyújtson a paszta térfogatának pontos becsléséhez adott beállítások és bemeneti paraméterek mellett, jelentősen csökkentve ezzel a későbbi, stencilnyomtatással összefüggésbe hozható meghibásodás esélyét.

Tsai és Liukkonen [12] fuzzy logikán alapuló Taguchi módszerrel optimalizálták a stencilnyomtatás folyamatát. A kísérletben használt bemeneti paraméterek és választott értékeik a 4. táblázatban találhatóak.

Három különböző, optimalizációs módszer hatékonyságát vizsgálták:

1) Az első módszernél a kísérleti adatokból regresszió analízissel készítették el a két kimeneti paramétert (forraszpaszta térfogata és a lenyomat pozícióhibája) meghatározó egyenleteket. Az optimális bemeneti paraméter kombinációkat a 2. fejezetben bemutatotthoz hasonlóan, Response Surface Methodology (RSM – válaszfüggvény metódus) és Desirability Function (DR –

elfogadhatósági függvényoptimalizálás) technikák segítségével határozták meg.

2) A második módszernél fuzzy logikát használtak a kimeneti értékek meghatározására majd Taguchi módszerrel adták meg az optimális paraméterkombinációt a kimeneti paraméterek adott célértékeihez.

3) A harmadik módszernél mesterséges neurális hálózatot tanítottak be a kísérleti adatok alapján és genetikus algoritmus segített az optimális paraméterkombináció megtalálásában.

**4. táblázat.** A stencilnyomtatási kísérlet bemeneti paraméterei és azok értékei [12]

Paraméter	Beáll. 1	Beáll. 2	Beáll. 3
Elválasztási sebesség (mm/s)	1	3	–
Stenciltisztítás (ciklusszám)	1	3	5
Késerő (N)	50	70	90
Nyomtatás sebesség (mm/s)	20	40	60
Kontaktávolság (mm)	0	0,5	1
Apertúra területe a padhez képest (%)	90%	100%	110%
Stencil vastagsága (µm)	80	100	120
Pasztá viszkozitása (Pa·s)	900	1100	1300

A három megközelítés értékelésében a jel/zaj arányt, a korrigált folyamatképeségi mutatót (Cpk – corrected process capability) és egy, a szerzők által bevezetett egyedi százalékos teljesítményjavulást kifejező paramétert (Performance Improvement Rate – PIR) hasonlították össze. A szerzők által javasolt Fuzzy logikán és a Taguchi módszeren alapuló hibrid megközelítés bizonyult a leghatékonyabbnak a bemutatott kísérleti környezetben, mely átlagosan 23 és 27%-os a javulást mutatott a forraszpaszta lenyomatok és pozícióhibák becsülésében a korábbi megközelítésekhez képest.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk bemutatja a stencilnyomtatási folyamat optimalizálási és modellezési lehetőségeit. A korai források statisztikai módszerekre alapuló módszereket alkalmaztak, pl. Taguchi, RSM (response surface methodology), DMAIC (Define,

Measure, Analyze, Improve and Control). Már ezen módszerek alkalmazásával is szignifikáns, akár 10-15%-os javulást, csökkenést tudtak elérni a stencilnyomtatási folyamat hibarátájában. A folyamat során lezajló fizikai jelenségek mélyebb megértésében pedig a numerikus modellezési módszerek nyújtanak támogatást, melyek pontosságának javításához szükséges a forraszpaszta nem-newtoni (pseudoplasztikus) tulajdonságainak leírása. A legújabb kutatások a modellezési és optimalizálási célokra a gépi tanulási módszereket alkalmazzák, melyekkel a stencilnyomtatási folyamat minőségét jellemző paramétereket (felvitt forraszpaszta magassága, területe, térfogata, alakja) akár 20-25%-kal alacsonyabb hibával képesek becsülni, a korábbi módszerekkel becsültekhez képes.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.



A cikk az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Medgyes B., Illés B., Harsányi G., „Electrochemical Migration of Micro-alloyed Low Ag Solders in NaCl Solution”, *Period. Polytech. Elec. Eng. Comput. Sci.*, 57. évfolyam, 2. szám, 49-55 o., 2013. <https://doi.org/10.3311/PPee.2068>
- [2] 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>
- [3] Edwards K.L., „Towards more effective decision support in materials and design engineering”, *Mater. Design*, 15. évfolyam, 5 szám, 251-258 o., 1994. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(94\)90071-X](https://doi.org/10.1016/0261-3069(94)90071-X)
- [4] Li M.C., Al-Refaie A., Yang C., „DMAIC Approach to Improve the Capability of SMT Solder Printing Process”, *IEEE T. Electron. Pa. M.*, 31. évfolyam, 2 szám, 126-133 o., 2008. <https://doi.org/10.1109/TEPM.2008.919342>
- [5] Illés B., Géczy A., „Investigating the dynamic changes of the vapour concentration in a vapour phase soldering oven by simplified condensation modeling”, *Appl. Therm. Eng.*, 59. évfolyam, 1-2. szám, 94-100 o., 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.008>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] Ferguson J., Kemplowski Z., „Applied Fluid Rheology”, *Springer Netherlands*, 1991, ISBN 978-1-85166-588-4.
- [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] Durairaj R., Mallik S., Ekere N.N., „Solder paste characterisation: towards the development of quality control (QC) tool”, *Solder. Surf. Mount Technol.*, 20. évfolyam, 3. szám, 34-40 o., 2008.  
<https://doi.org/10.1108/09540910810885705>
- [11] Yang T., Tsai T.N., Yeh J., „A neural network-based prediction model for fine pitch stencil-printing quality in surface mount assembly”, *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 18. évfolyam, 335-341 o., 2005.  
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2004.09.004>
- [12] Tsai T.N., Liukkonen M., „Robust parameter design for the micro-BGA stencil printing process using a fuzzy logic-based Taguchi method”, *Appl. Soft Comput.*, 48. évfolyam, 124-136 o., 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.06.020>