

# Újraömllesztés 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 forrasztás 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. újraömllesztés 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 forrasztás-szemcsék 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 forrasztás reológiai tulajdonságait [7] annak érdekében, hogy a numerikus modellezésénél figyelembe tudják venni a forrasztás nem-newtoni viselkedését, de nem vették figyelembe a forrasztás nyomtatás közbeni tixotropikus, időfüggő reológiai viselkedését. A forrasztás 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.

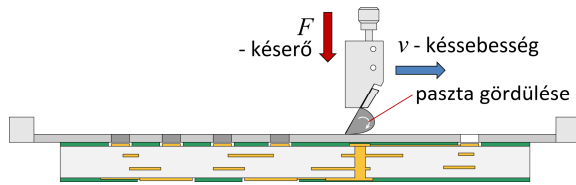
Nem elemezték eddig azt sem, hogy a különböző szemcseméretű forrasztás tartalmazó paszták eltérő tulajdonságai milyen hatással vannak a

numerikus modellek eredményeire. Elhanyagolták továbbá azt, hogy a stencilnyomtatás 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 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 apertúrákat. A nyomtatás sematikus képét az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A stencilnyomtatás sematikus ábrája

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

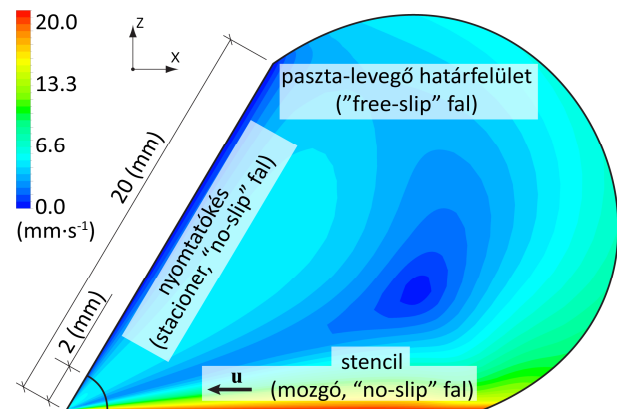
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (4)$$

Végezetül, Mannan és tsai. munkája alapján a stencilnyomtatás közben a forraszpaszta 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 stenciltől, a nyomtatókéstől 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 stencilnyomtatás 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. Viszkózitási anyagmodellek

A forraszpaszták szuszpenziók, forraszszemcséket és folyasztószert tartalmaznak kb. 50-50% térfogatszázalékban. A forraszpaszták viszkózitás szempontjából nem-newtoni tulajdonságokat mutatnak: a viszkózitásuk függ a nyírási rátától, azaz a nyírófeszültség a sebességgradienssel nem lineárisan változik (6), és a mutatott viszkózitásnak 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 viszkózitásukat 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 viszkózítások aszimptotikus értékei,  $\lambda$  idő dimenziójú állandó,  $n$  dimenzió nélküli konstans, és  $a$  a Yasuda együttható.

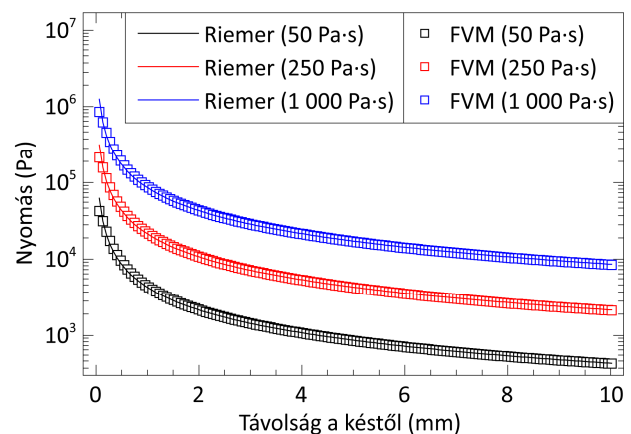
### 2.4. Stencilnyomtatás modelljének validálása

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 rácsmértét illetve a kalkuláció iterációs lépéseinek számát optimalizálni. A modell hiányossága, hogy csak newtoni tulajdonságokkal rendelkező folyadékokra alkalmazható, tehát a stencilnyomtatás numerikus modelljét konstans viszkózitású 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 viszkózitás 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 viszkózitási anyagmodellek használatára.

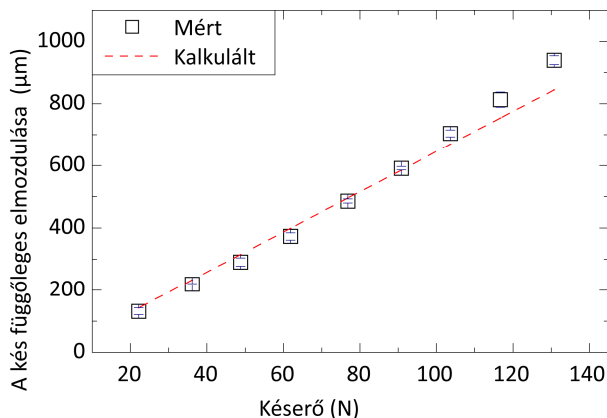
### 3. A PEREMFELTÉTELEK VIZSGÁLATA, FINOMÍTÁSA

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  $\eta_{\infty}$  viszkózitási értékek csökkennek szignifikánsan.

### 3.1 Terhelt kés érintkezési szögének meghatározása

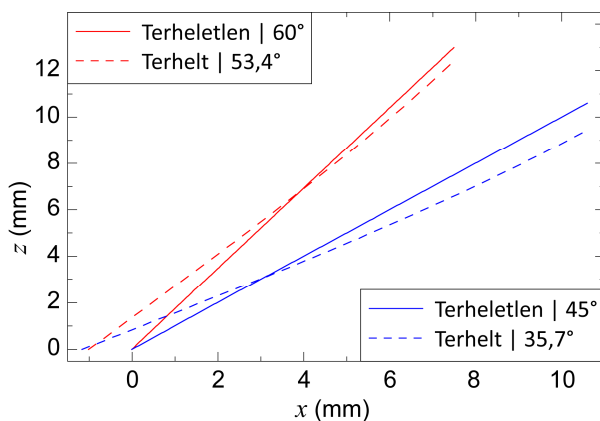
A terhelt kés (fajlagos nyomtatási erő kb. 0,3 N/mm) szögének meghatározására végelem közelítésen alapuló numerikus modellt készítettünk. A modell érvényességét empirikus úton ellenőriztük [18] oly módon, hogy különböző terhelések esetére mértük a kés függőleges elmozdulását, majd ugyanezt számítottuk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

A vizsgált nyomtatókés geometriai paramétereit: terheletlen készség  $60^\circ$ , 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 készségre, valamint 6, 20, 25 mm pengemagasságokra is [19].



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

Jelen cikkben csak a 15 mm-es pengemagasságra vonatkozó eredményeket mutatom be, amely alapján a 0,3 N/mm fajlagos késerő 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).

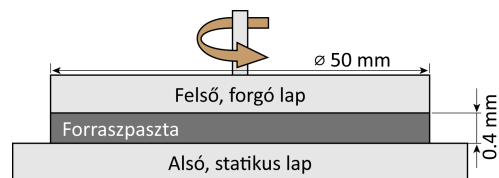


5. ábra. A nyomtatókés profilja és készsége terheletlen és terhelt esetekben

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 forraszpasztta anyagi tulajdonságai, melyről a 3.2 fejezet értekezik.

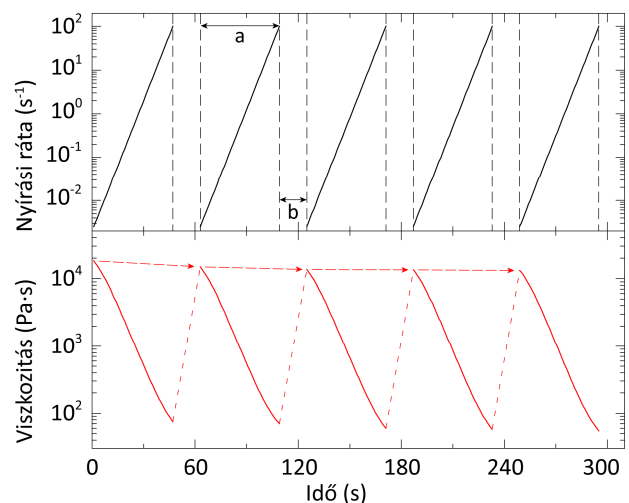
### 3.2 A forraszpasztta tixotropikus tulajdonságainak vizsgálata

A forraszpasztta 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.



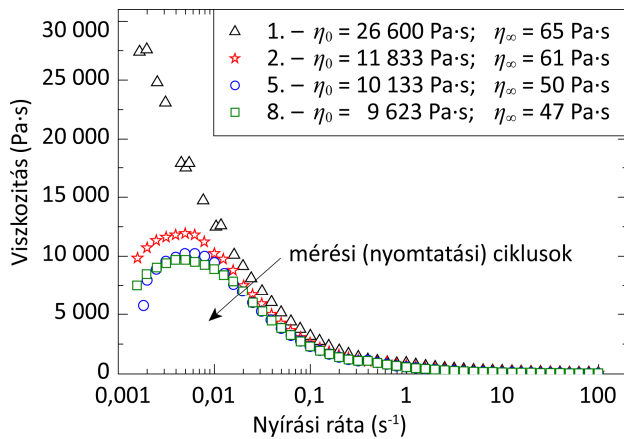
6. ábra. A forraszpasztta reológiai mérésének elvi ábrája

A mérési ciklusok között a stencilnyomtatási folyamat általános állásidejének (15, 30 vagy 60 s) megfelelő szüneteket iktattunk be [20]. Ezzel modelleztük a forraszpasztta 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 forraszpaszta 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.

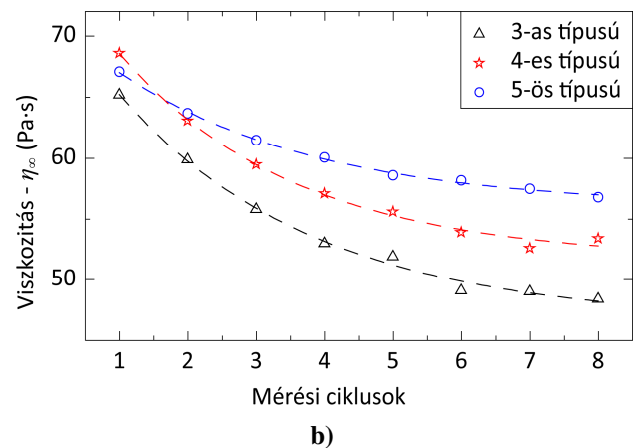
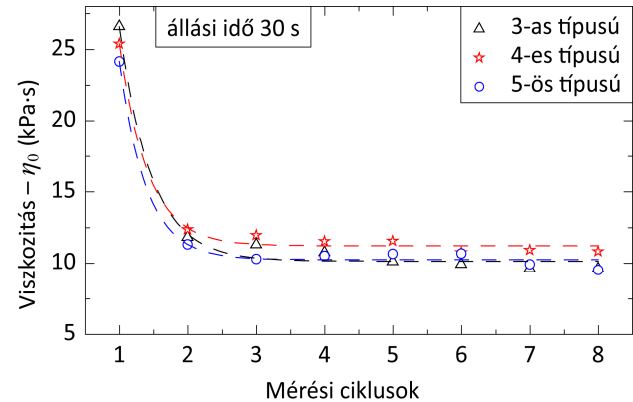


8. ábra. A viszkozitási görbék alakulása a mérési ciklusok számának függvényében (3-as típusú forraszpaszta – szemcseméret: 20–45 µm; állásidő: 30 s)

A forraszpaszta stabilizálódott állapotában az η<sub>0</sub> és η<sub>∞</sub> viszkozitási értékek akár 30%-kal is kisebbek lehetnek, mint ugyanezek a forraszpaszta 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 forraszpaszta-lenyomatokat kapjunk.

A mérési módszer alkalmazásával továbbá lehetőség nyílik a különböző szemcseméretű forraszpaszták közötti különbségek kimutatására a viszkozításban [21], mivel az csak a stabilizálódott állapotban jelentkezik, leginkább az η<sub>∞</sub> értékében. A kezdeti állapotban az irodalmi eredmények [22] és a méréseink alapján sem mutatható ki különbség a viszkozításban. Az η<sub>0</sub> és η<sub>∞</sub> 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 η<sub>0</sub> értékének alakulása – a forraszpaszták közötti különbség nem szignifikáns; b) az η<sub>∞</sub> 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
η <sub>0</sub> [Pa·s]	44 500	9 200	10 560	9 070
η <sub>∞</sub> [Pa·s]	19	17	24	26
Idő-konst. λ [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 ( $20\text{--}70$  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  $\mu\text{m}$ )

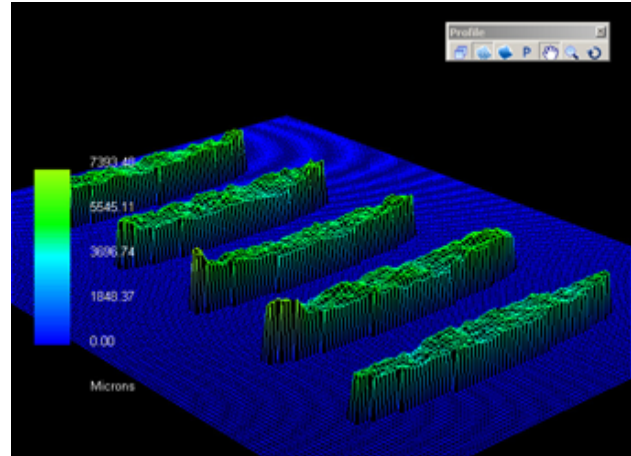


stencil

apertúrák

$AR$ : 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

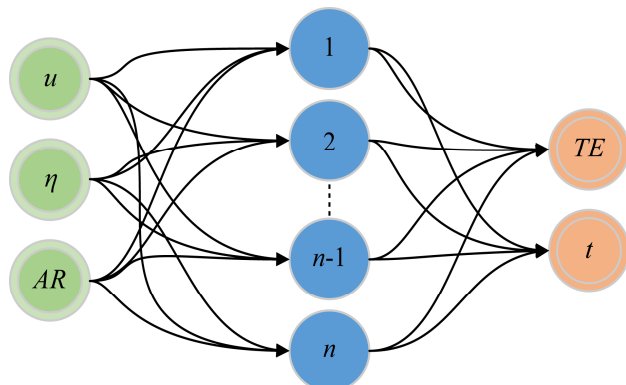
A tanítóhalmaz felépítéséhez szükséges mérések után a stencilnyomtatás optimalizálására a következő módszerek alkalmazhatók pl.: adaptív neuro-fuzzy rendszerek (ANFIS – Adaptive neuro fuzzy inference systems); döntési fák (Decision trees); mesterséges neurális hálók (ANN – Artificial neural networks). 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 becsülni 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 újraömllesztési 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>