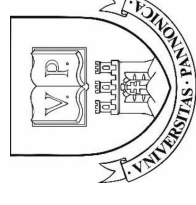


Tézisponatok alapjául szolgáló tudományos publikációk, előadások és posztterek

- [C1] **Tóth, Zs., Szalai, I. and Lukács, A.:** Ionic contamination reduction with dry ice cleaning, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (1757-8981 1757-899X): 1246 1 p. 012015. (2022)
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012015>
- [C2] **Tóth, Zs., Kocsis E., Szalai, I. and Lukács, A.:** “No-Clean” Flux Residues Detection With Impedance Measurements, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 14, no. 4, pp. 729-734, (2024),
<https://doi.org/10.1109/TCPM.2024.3382098>
- [C3] **Ható, Z., Horváth, B., Guba S., Tóth Zs., Kocsis E., Boda D. and Szalai, I.:** Electrochemical migration and dendrite growth between two electrodes: Experiments and Brownian dynamics simulations International Journal of Heat and Mass Transfer, 126108, ISSN 0017-9310, Volume 234, (2024)
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126108>
- [C4] **Tóth, Zs., Kocsis E., Szalai, I. and Lukács, A.:** No-clean flux residues detection with impedance measurements 19th IMEKO TC10 Conference “MACRO meets NANO in Measurement for Diagnostics, Optimization and Control” Delft, The Netherlands, September 21–22, 2023,
<https://doi.org/10.21014/1c10-2023.012>
- [K1] **Tóth, Zs., Szalai, I. és Lukács, A.:** Szárazjeges tisztítás lehetőségei az autóelektronikai gyártástechnológiában, ENELKO 2022 - XXIII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2022 - XXXII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2022) pp. 60-64., 4 p., ENELKO, Marosvásárhely, Románia, 2022. október 13-16.
<https://ojs.emt.ro/index.php/enelko-szamokt>

Egyéb tudományos publikációk, előadások

- Tóth, Zs.:** Fourier-transzformációs infravörös (FTIR) spektroszkópia alkalmazása az elektronikát gyártás területén, XII. Rendszermentes Anyagvizsgáló Konferencia és Kiállítás (RAKK) és 10. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban (AGY) Konferencia, Online, 2021. március 17-19.
- Tóth, Zs.;** Szalai, I. és Lukács, A.: Ionos szennyezettség csökkentése szárazjeges tisztítással, XIII. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese, 2021. október 10-12
- Tóth, Zs.;** Lukács, A. és Szalai, I.: Szárazjeges tisztítás ionos szennyezettség csökkentő hatásának vizsgálta, PhD hallgatók anyagtudományi napja XXI., Veszprém, 2021. november 8.
- Tóth, Zs.;** Lukács, A. és Szalai, I.: Szárazjeges tisztítás alkalmazása az elektronikai gyártástechnológiában, PhD hallgatók anyagtudományi napja XXII., Veszprém, 2022. november 14.
- Tóth, Zs.;** Kocsis E.: Elektronikai szerelvények forraszthatóságának növelése, Tudomány napi Konferencia a Zalaegerszegi Egyetemi Központban, Zalaegerszeg, 2022. november 16.



Pannon Egyetem

Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

Autóelektronikai szerelvények tisztítási folyamatának hatékonyság és megbízhatóság növelése

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

Tóth Zsolt

okleveles természettudomány-kommunikációs szakember

Témavezető:

Dr. Szalai István
egyetemi tanár

2025

Bevezetés

Az ionos szennyeződés a kezdetektől gondot jelent az elektronikai szerelvények gyártói számára. A folyaszűrőszerek feladata a forrasztásban résztvevő fémek oxidmentesítése, valamint a megfelelő nedvesíthetőség elősegítése az optimális forrasztott kötés kialakítása érdekében. Az autópipari elektronikai gyártástechnológiában előszeretettel alkalmaznak a forrasztási folyamat során „tisztítást nem igénylő”, úgynevezett „no-clean folyaszűrőszereket”. Ez hamis biztonságérzetet adhat és azt az illúziót kelti, hogy forrasztás után a termék tiszta. A forrasztást követően a gyengés szerves savak és más maradékok azonban elősegíthetik az elektrokémiai migrációt és korrózió okozta meghibásodásokat.

A termékek forrasztás utáni tisztítása, mosása a múlt század végéig mindennapos gyakorlat volt az elektronikai iparban. A modern folyaszűrőszerezrel kapcsolatos probléma része, hogyha nem tisztítjuk le a folyaszűrőszerez maradványait, akkor mást sem tisztítunk le. A panelelülletek minőségét a folyaszűrőszerez maradványokon kívül más szennyezőanyag is ronthatja. Az ionos és szerves szennyeződések számos forrásból származnak, és a gyártási folyamat során több alkalommal is a panelre juthatnak. A szennyeződések összességének letisztítása kulcsfontosságú a kiszámítható teljesítmény eléréséhez. A vizes, oldószeres mosás gyakran azonban nem kivitelezhető, mivel az alkatrész tokozás sérülését vagy bizonytalan működést okozva károsíthatja a modern termékek nedvességkritikus rendszereit. Ezért lehetnek praktikusak a vízmentes, de nem ronesoló tisztítási módszerek, mint a sűrített levegős tisztítás, a plazmatisztítás, vagy a kutatás egyik fókuszát jelentő szárazjég-havas lefűvás.

Modern autópipari rendszerekben a miniaturizáció és a nagyobb alkatrész sűrűség miatt a szabványos vizsgálati módszerek már gyakran nem elegendőek. A vita arról, hogy melyik tisztítási szabványt és tisztasági vizsgálati módszert alkalmazzuk, a közelmúltban felerősödött. A szabványok bővülnek, és magukban foglalják a tisztaság átfogóbb meghatározását is. Az ionkromatográfia (IC), az oldószerkivonat ellenállás (ROSE), valamint a felületi szigetelési ellenállás (SIR) vizsgálata mind hasznos eszközök annak meghatározására, hogy az egység tiszta-e, azonban mindegyiknek vannak hátrányai is. A mérések többnyire nem ismételhetők mivel a vizsgálat során a szerelvény tisztasági állapota megváltozik.

A biztonságkritikus termékek szennyezettségi szintjének ronesolásmentes meghatározása, és szükség esetén vegyszermentes tisztítása, kulcsfontosságú lehet az elvárt élettartam és a megbízható működés eléréséhez.

4. Megállapítottam, hogy az elektrokémiai migráció okozta dendritképződés modellezhető hibrid Brown-dinamikai szimulációval, ahol a részecskék mozgását az alábbi Langevin egyenlet határozza meg:

$$m_i \frac{dv_i(t)}{dt} = \left(\sum_j (\mathbf{f}_{ij}^C + \mathbf{f}_{ij}^{WCA}) + \mathbf{F}_i^{\text{appl}} \right) - m_i \gamma_i \mathbf{v}_i(t) + \mathbf{R}_i(t),$$

ahol a $-m_i \gamma_i \mathbf{v}_i(t)$ a sűrítődési erő,

$\mathbf{R}_i(t)$ a véletlenszerű erő,

\mathbf{v}_i , m_i és γ_i a helyzet, a sebesség, a tömeg és az i részecske súrlódási együtthatója.

A statisztikus erők a Coulomb erő (\mathbf{f}_{ij}^C) és a Weeks-Chandler-Anderson erő (\mathbf{f}_{ij}^{WCA}),

valamint az alkalmazott erők ($\mathbf{F}_i^{\text{appl}}$), amiket a fálak és a dendritek fejtenek ki.

(Vonatkozó publikációk: [C3])

4.1. A szimulációkból megállapítottam, hogy a dendritek növekedésének kezdeti sebessége kisebb, és a folyamat felgyorsul, ahogy a dendritek közelednek az anódhoz.

4.2. A szimulációban megfigyelt dendritnövekedési dinamika összhangban van a kísérleti tapasztalatokkal. Az elektromos térerősség vagy a szabad Sr^{2+} ionkoncentráció növelése az átvezető dendrit kialakulási idejének (TTT) csökkenését eredményezi.

3. Kifejlesztettem egy olyan impedancia mérésen alapuló módszert, amely képes az interdigitális struktúrák felületén lévő folyaszószter maradványok detektálására és mérésére. A kivezetések között 2V amplitúdójú AC jellel megtáplált PCB-ről gyűjtöttem a kapacitás/ellenállás-spektrumokat 20Hz-től 1MHz-ig C_p - R_p ekvivalens áramkörü modellt alkalmazva. AD5934 IC-n alapuló áramkörrel meghatározott jel (2V, 5kHz) hatására vizsgáltam a rendszer felületi kapacitás változását különböző szennyezettségi állapotokban. Ez a módszer lehetővé teszi a folyaszószterek felhasználhatóságának monitorozását, valamint tisztítási folyamatok hatékonyságának gyors minősítését. (Vonatkozó publikációk: [C2], [C4])

3.1. A „tiszítást nem igénylő” (OR/L0) folyaszószterek esetén felületi impedancia vizsgálattal egyértelmű összefüggést mutattam ki a maradványok mennyisége és a mért impedancia értékek között. Klíma- és a tárolástelemek után a folyaszószter maradványok jelenlétét ionos szennyeződés mérésel, vizuálisan és impedancia tesztekkel is igazoltam.

3.2. A folyaszószterrel kezelt összes szennyezett minta kapacitásában mérhető változást figyeltem meg, amelyet a nem-forrasztásgátló maszk által meghatározott forrasztási felület részeiben felhalmozott gyenge szerves sav (WOA) maradványok okoztak.

3.3. Az impedancia spektrumok elemzésével kimutatható a kapacitív tag jelentős növekedése és az ohmikus ellenállás csökkenése alacsony frekvenciákon (20-5000 Hz). A frissen szárított minták hasonló viselkedést mutattak, mint a hőkezelt minták, melynek oka, a csak részben aktivált folyaszószter maradványok jelenléte. Magasabb frekvenciákon (10000 Hz felett) a hatás kevésbé volt szignifikáns. Meghatároztam, hogy a felületek szennyezettségének detektálására az 5 kHz frekvencián mért kapacitásértékek vizsgálata optimális.

3.4. Impedancia konverter IC (AD5934) segítségével meghatározott frekvencián (5000 Hz) végzett kapacitásmérésekkel igazoltam, hogy az IC-alapú áramkörrel gyorsan és költséghatékonyan detektálhatók a folyaszószter maradványok. Így a roncsolásmentes és ismétélhető módszer ipari környezetben is gazdaságosan alkalmazható.

3.5. A felületi szigetelési ellenállás (SIR) teszt és pásziázó elektronmikroszkópos (SEM-EDS) eredmények alapján megmutattam, hogy a klímateszt során ónmigráció történt, de nem volt jellemző a tartós dendrit képződés a forrasztásgátló maszk felületén a vezető felületek között.

Céltűzés

A doktori kutatás célja, hogy megvizsgálja az elektronikai gyártás során keletkező ionos termeszettü szennyeződéseket csökkentő eljárás, a szárazjég-havas tisztítás hatékonyságát. Feltérképezzé, hogy a jelenlegi tisztaságra vonatkozó iparági előírások kritériumai milyen mértékben alkalmazhatóak a modern autópári termékek gyártása esetén. Valamint javasoljon egy felületi impedanciamérésen alapuló mérési módszert a folyaszószter maradványok mennyiségének meghatározására.

A doktori kutatás során alapvető szempont volt, hogy elősegítse az ionos szennyeződések okozta problémák tudományos megértését és olyan iparban is alkalmazható módszereket vizsgáljon, melyek segítik a meghibásodási kockázat felmérését és csökkentéséhez.

Kísérleti és szimulációs munka

A kísérleti munka 4 főbb részre tagolódik. Az első részében egy alsó infratűtéssel ellátott szárazjég-havas tisztítórendszer hatékonyságát vizsgálom képfeldolgozó, spektroszkópiai és helyi ionos szennyezettség alapú módszerekkel. Vizsgálom a CO₂-havas tisztítórendszer hatásmechanizmusát, és becslést adok az egyes részecskék kinetikus energiájára.

A kutatás másik fontos témája volt egy roncsolásmentes és ismétélhető folyaszószter detektálási módszer kifejlesztése. A vizsgálatokhoz többcélű tesztpanelt terveztem, és az azon kialakított interdigitális struktúrák (IDS) kapacitására adok elméleti becslést.

Váltakozó áramú felületi impedancia (kapacitás) mérésen alapuló módszerrel széles frekvenciatartományon vizsgálom az interdigitális struktúrák elektromos tulajdonságainak változását folyaszószter szennyezés hatására. Összehasonlító mérésekkel bemutatok egy költséghatékony, gyors alternatívát, mely impedancia konverter IC-re épülő áramkört használ a kapacitás mérésre.

Végezetül bemutatásra kerül egy Brown-dinamikai szimulációs módszer, ami az elektrokémiai migráció okozta dendritnövekedés dinamikáját írja le.

Új tudományos eredmények, tézisek

1. Kísértem egy olyan kezelési folyamatot, mely alsó infrafűtéssel és a szárazjég-hó sugár többciklusos pásztázásával eléri, hogy a felület a harmatpont felett maradjon, így elkerülve a páralecsapódást. A folyamat az OR/L0 besorolású, alacsony szilárdanyag-tartalmú, mesterségesen felvitt, és ipari környezetből származó folyaszószterrel szennyezett vegyi ón (ImSn) és kémiai nikkel/galván arany (ENIG) bevonatú panelek esetében hatékonyan távolítja el a maradványokat. (Vonatkozó publikációk: [C1], [K1])

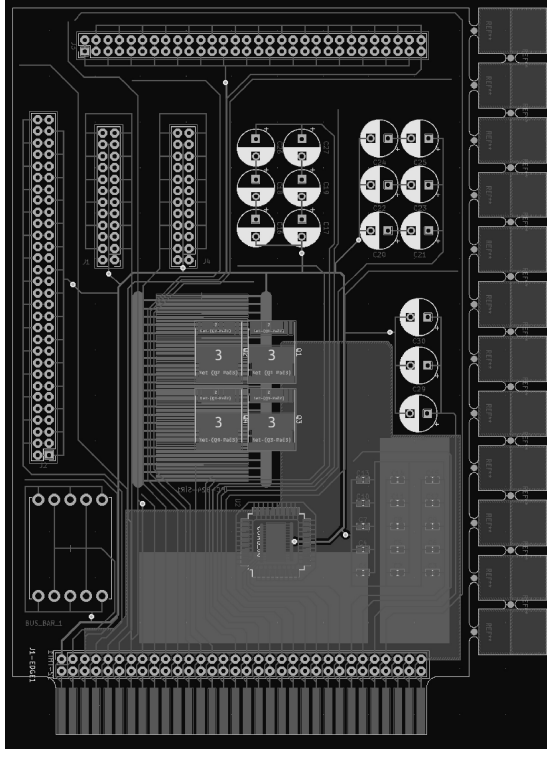
1.1. Meghatároztam, hogy a tisztítási folyamat 23,4 kg/h abszolút tömegáram és 30 mm/s pásztázási sebesség mellett, 3 ciklus után, az ENIG bevonatú panelek felületére felvitt folyaszószterből származó ionos szennyezettség korrozívitási indexét, az autoiparban alkalmazott 2.08 $\mu\text{A/s}$ határérték alá csökkenti. Infravörös spektroszkópiai és optikai vizsgálatok alapján a módszer a fehér maradványok eltávolítása esetében 95% feletti tisztítási hatékonyságot ért el.

1.2. Ülőcepp módszerrel kimutattam, hogy a szárazjég-havas tisztítás 23,4 kg/h abszolút tömegáram mellett 30 mm/s pásztázási sebességgel 3 ismétléssel tisztított eredeti állapotú arany (ENIG) és vegyi ón bevonatú panelek felületi szabadenergiájára nincs hatással.

1.3. Kimutattam, hogy 21 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ mennyiségben felvitt aktiválatlan és 140 °C-on 1 percre hőkezelt, aktivált folyaszószter maradványok szárazjég-havas eltávolítása eredményes. Ezek alapján látható, hogy a CO₂-havas tisztítás a nem aktivált folyaszószter okozta szennyeződést 16,4 kg/h abszolút tömegáram mellett 30 mm/s pásztázási sebességgel 3 ciklus után 90% feletti hatékonysággal távolítja el. Optikai analízis alapján igazoltam, hogy az aktiválatlan folyaszószterből származó fehér maradványok mértéke is csökkent.

1.4. A részecskék mozgásának mérésével 16,4 kg/h abszolút tömegáram mellett megbecsültem a szárazjégzemcsék kinetikus energiáját ($\sim 3 \times 10^{-7}$ mJ). Kimutattam, hogy szárazjéges tisztítással a fenti paraméterekkel 30 mm/s pásztázási sebességgel 3 ciklusban az összeszerelt elektronikai szerelvény felületén található folyaszószterből származó fehér maradványok eltávolíthatók, és a helyi ionos szennyezettség mértéke a kritikus (2,08 $\mu\text{A/s}$) szint alá csökkenthető.

2. Megterveztem az alábbi ábrán bemutatott speciális többcélú tesztpanel. (Vonatkozó publikációk: [C2], [C4])



1. ábra: A TTC tesztpanel kialakítása

2.1. A panelt ipari és kutatási célokra egyaránt alkalmazzzák anyag- és tisztasági vizsgálatokhoz, valamint forraszthatósági és élettartam tesztekhez. A kialakított SIR teszt kompatibilis csatlakozási lehetőség és az interdigitális struktúrák támogatják a szabványos és kutatási célú vizsgálatok megvalósítását egyaránt. A tesztpanel kialakítása lehetővé teszi furat- és felületeszerelt alkatrészek beültetését és azok forrasztásának, valamint környezetének vizsgálatát. Igény szerinti bevonattal – vegyi ón (ImSn), tűzi ón (HASL), kémiai nikkel/galván arany (ENIG), vegyi ezüst (ImAg), szerves védőbevonat (OSP) – legyártható és használható.

2.2. Többlemezes kondenzátor (MP) és Olthuis (Olt.) elméleti modellek alapján megbecsültem a tesztpanel felületén kialakított interdigitális struktúrák kapacitásának elméleti értékeit és meghatároztam az elektróda geometriára jellemző névleges négyzetszámok értékét. A számított érték a „Nagy IDS” (névleges négyzetszám: 1233) esetén: $C_N^{(MP)} = 1,4$ pF és $C_N^{(Olt.)} = 12,9$ pF; a „Kis IDS” (névleges négyzetszám: 720) esetén: $C_K^{(MP)} = 0,8$ pF és $C_K^{(Olt.)} = 1,8$ pF.